

Tesina



Facultad de Ciencias Sociales y Administrativas

Ingeniería en Telecomunicaciones

Metodología orientada a maximizar la disponibilidad de sistemas de
radio enlaces

Alumno: Alejandro Francisco

Año: 2011

Tutor: Ing. Guillermo Sandez

Calificación

Índice de contenidos

Metodología orientada a maximizar la disponibilidad de sistemas de radio enlaces	2
Índice de imágenes	10
Índice de tablas	11
1 Resumen	12
2 Introducción	13
2.1 Formulación y fundamentación	13
2.1.1 Hipótesis	13
2.1.2 Objetivo general	13
2.1.3 Objetivos específicos	14
3 Marco Teórico-Conceptual	15
3.1 MBTF	15
3.2 MTTR	16
3.3 DISPONIBILIDAD	16
3.4 Radio Enlaces	17
3.4.1 Ondas de Radio	17
3.4.1.1 Frente de Onda	18
3.4.1.2 Ley del Cuadrado Inverso	19
3.4.1.3 Propagación y Pérdidas en Espacio Libre	20
3.4.1.4 Atenuación	23
3.4.1.5 Absorción	23
3.4.1.6 Perdidas por Vegetación	25
3.4.1.6.1 Terminal en Zona Boscosa	25
3.4.1.7 Desvanecimiento por Multipletrayectoria	30
3.4.1.7.1 Desvanecimiento Plano	31
3.4.1.7.2 Desvanecimiento Selectivo de Frecuencia	32
3.4.2 Propiedades de las Ondas de Radio	34
3.4.2.1 Refracción	34
3.4.2.1.1 Principio de Huygens	36
3.4.2.1.2 Radio o Curvatura de la Tierra	38
3.4.2.2 Reflexión	39
3.4.2.3 Difracción	40

3.4.2.3.1	Impacto de la Difracción de Acuerdo a las Zonas de Fresnel	41
3.4.2.3.2	Modelo de Difracción Knife-Edge	47
4	Implementación de Sistemas de Radio Enlaces Maximizando su MTBF	50
4.1	Etapa de Relevamiento	51
4.1.1	Relevamiento de las coordenadas de los extremos del Radio Enlace	51
4.1.2	Condiciones Meteorológicas del Terreno.....	52
4.1.3	Características del Ambiente o Terreno	53
4.1.4	Equipamiento Existente.....	54
4.1.4.1	Torres	54
4.1.4.2	Alimentación	55
4.1.5	Barrido de Frecuencias o Análisis de Espectro	56
4.2	Etapa de Diseño.....	57
4.2.1	Selección del Equipamiento del Sistema de Radio Enlace	57
4.2.1.1	Selección de Radio Frecuencia a Utilizar.....	58
4.2.1.1.1	Frecuencias Libres y Frecuencias de Uso Bajo Licencia	58
4.2.1.1.2	Según la Topografía y Características del Terreno	59
4.2.1.2	Necesidades del Canal de Información	60
4.2.1.2.1	Cantidad de Información	60
4.2.1.2.2	Tipo de Información.....	61
4.2.1.2.2.1	Nivel de Capa Física.....	61
4.2.1.2.2.2	Nivel de Capa de Enlace	62
4.2.1.2.2.3	Nivel de Capa de Red y de Transporte.....	62
4.2.1.3	Selección de las Antenas	63
4.2.1.3.1	Return Loss	63
4.2.1.3.2	Según la Arquitectura de Red.....	64
4.2.1.3.3	Según sus Características Constructivas	65
4.2.1.4	Funcionalidades del Hardware	65
4.2.1.4.1	Watchdog	66
4.2.1.4.2	Diversidad	66
4.2.1.4.2.1	Diversidad en Espacio	66
4.2.1.4.2.2	Diversidad en Frecuencia	66
4.2.1.4.2.3	Diversidad Mixta.....	67
4.2.1.4.2.4	Diversidad de Polarización.....	67

4.2.1.4.3	Redundancia a Nivel de Hardware.....	67
4.2.1.4.4	Registro de Eventos o Log	68
4.2.1.4.5	Personalización.....	68
4.2.1.4.6	Contactos Auxiliares	69
4.2.1.4.7	MTBF	69
4.2.1.4.8	Esquema de Modulación	69
4.2.1.5	Calculo del Enlace.....	70
4.2.1.5.1	Pérdidas en Cables y Conectores.....	70
4.2.1.5.2	Margen de Intensidad de Señal	70
4.2.1.5.3	Despeje en la Elipse de Fresnel.....	71
4.3	Etapa de Implementación	72
4.3.1	Montaje	72
4.3.1.1	Elección del Cableado y su Correcta instalación	72
4.3.1.1.1	Cableado Coaxil	72
4.3.1.1.2	Cableado Estructurado de Red	73
4.3.1.2	Instalación Eléctrica	74
4.3.1.3	Alineación de Antenas	75
4.3.1.3.1	Condiciones Meteorológicas	75
4.3.1.3.2	Metodología para el Alineamiento	76
4.3.2	Configuración.....	78
4.3.2.1	ACK	78
4.3.2.2	Fallback Automático	79
4.3.2.3	Ancho del Espectro del Canal	80
4.3.2.4	Barrido de Espectro y Selección del Canal	80
4.3.2.5	Polaridad de Antena	80
4.3.2.6	Watchdog	81
4.3.2.7	Registro de Eventos.....	81
4.3.2.8	Backup de Configuración.....	81
4.4	Etapa de Mantenimiento.....	81
4.4.1	Análisis y Reparación.....	82
4.4.1.1	Lote de Repuestos	83
4.4.1.2	Asistencia In Situ	83
4.4.1.3	Procedimiento para el Análisis, Identificación y Solución de Fallas	83

5	Conclusiones	86
6	Anexo	88
6.1	Frecuencia	89
6.1.1	Codificación y Modulación	91
6.1.1.1	Introducción	92
6.1.1.2	Conversión de Analógico a Digital	92
6.1.1.2.1	Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM).....	92
6.1.1.2.2	Modulación por Codificación en Pulsos (PCM)	93
6.1.1.2.3	Frecuencia de Muestreo.....	95
6.1.1.3	Conversión de Digital a Analógico	95
6.1.1.3.1	Tipos de Modulación.....	96
6.1.1.3.1.1	Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK).....	96
6.1.1.3.1.2	Modulación por Variación de Frecuencia (FSK)	97
6.1.1.3.1.3	Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK).....	98
6.1.1.3.1.4	Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)	101
6.1.1.3.1.5	Modulación Por Espectro Ensanchado Por Salto de Frecuencia (FHSS).....	103
6.1.1.3.1.6	Modulación Por Espectro Ensanchado Por Secuencia Directa (DSSS)	104
6.1.2	Multiplexación	104
6.1.2.1	Multiplexacion por División de Frecuencia (FDM).....	105
6.1.2.2	Multiplexacion por División de Onda (WDM)	105
6.1.2.3	Multiplexacion por División de Tiempo (TDM).....	105
6.1.2.4	Multiplexacion por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM).....	106
6.1.3	Estándares y Tecnologías	108
6.1.3.1	Estándares 802.11.....	108
6.1.3.1.1	802.11a.....	109
6.1.3.1.2	802.11b.....	109
6.1.3.1.3	802.11g.....	110
6.1.3.1.4	802.11n.....	110
6.1.3.2	Sistemas de Radio Enlaces PDH	110
6.1.3.3	Sistemas de Radio Enlaces SDH	111
6.1.3.4	Sistemas de Radio Enlaces Routerboard	113
7	Glosario	114
8	Bibliografía	119

8.1	Libros	119
8.2	Publicaciones.....	119
8.3	Sitios Web	121

Índice de imágenes

Figura 1: Grafico de Propagación de Ondas Electromagnéticas	18
Figura 2: Grafico de Frente de Onda Electromagnética.....	19
Figura 3: Absorción Atmosférica de las Ondas Electromagnéticas en Función de su Frecuencia.....	25
Figura 4: Representación de trayecto Radio Eléctrico en Zona Boscosa.....	27
Figura 5: Atenuación Especifica en Zona Boscosa.....	28
Figura 6: Desvanecimiento selectivo de frecuencia.....	33
Figura 7: Refracción de un Frente de Onda.....	35
Figura 8: Creación de Nuevas Ondas Producto de la Difracción.....	36
Figura 9: Reflexión de Ondas Electromagnéticas en una Superficie Terrestre.....	40
Figura 10: Geometría de Difracción cuando el transmisor y el receptor no se encuentran a la misma altura.....	42
Figura 11: Geometría equivalente cuando la altura más pequeña es substraída de todas las otras alturas.....	43
Figura 12: Círculos concéntricos que definen los limites de las zonas sucesivas.....	44
Figura 13: Ilustracion de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son positivas debido a que h es positiva	46
Figura 14: Ilustracion de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son cero debido a que h es cero.....	46
Figura 15: Ilustracion de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son negativas debido a que h es negativa.....	47
Figura 16: Ilustracion de la geometría debida a la difracción de la punta del obstáculo en donde el receptor se encuentra en una región de sombra.....	48
Figura 17: Representacion Grafica de Gd(dB) como función de v.....	50
Figura 18: Onda Senoidal Cuantificada	93
Figura 19: Cuantificación de valores obtenidos.....	94
Figura 20: Ilustracion de notificación y signos de cuantificación.....	94
Figura 21: Transformacion de digitos binarios.....	95
Figura 22: Modulación Analógica/Digital.....	96
Figura 23: Modulación ASK.....	97
Figura 24: Modulación FSK.....	98
Figura 25: Modulación PSK.....	99
Figura 26: Diagrama de constelación binario.....	99
Figura 27: Modulación PSK de 10 bits.....	100
Figura 28: Diagrama de constelación de 2 bits.....	100
Figura 29: Diagrama de constelación de 3 bits.....	101
Figura 30: Diagrama de constelación QAM de 4 y 8 fases.....	102
Figura 31: Modulación PSK de 8 fases.....	102
Figura 29: Grafico demostrativo – Modulacion OFDM.....	108

Índice de tablas

Tabla 1: Factor Climático para Cálculo de Desvanecimiento Plano	32
Tabla 2: Rangos de frecuencia y su clasificación	89
Tabla 3: Esquemas de modulación.....	103

1 Resumen

El trabajo aquí expuesto señala que existen factores clave para la correcta utilización de tecnologías de radio enlaces y que no son comúnmente aplicados, ya que estos están dados por la brecha que surge entre la teoría sobre estos sistemas y la implementación práctica de la misma en un contexto real. Este proyecto se basó en una investigación teórica y análisis de casos prácticos reales, a partir de los cuales se resaltan las precauciones o recaudos que deben ser tomados en cuenta en orden de reducir fallas y ahorrar los costos que conlleva la reparación de las mismas.

Este proyecto resulta una guía útil para empresas o personas que hagan uso de estas tecnologías por primera vez o cuenten con sistemas similares ya implementados, sin una metodología adecuada de diseño, implementación y mantenimiento de dichos sistemas.

Palabras claves: 802.11, Wi-Fi, MTBF, comunicaciones, Mikrotik, PDH, SDH, metodología, RadioFrecuencia.

2 Introducción

2.1 Formulación y fundamentación

El presente proyecto tiene por objeto elaborar una metodología y/o guía para obtener la máxima disponibilidad en sistemas de Radio Enlace, indicando los procedimientos y enfoques a tener en cuenta durante las etapas de diseño, implementación y mantenimiento de sistemas de este tipo.

Se analizan estos sistemas desde un enfoque orientado a la aplicación práctica, basándolo en fundamentos teóricos y con la finalidad de que permita ser usado como una herramienta útil en un ámbito real por parte de personal idóneo y/o de mantenimiento.

2.1.1 Hipótesis

Es posible maximizar la disponibilidad en sistemas de radio enlace mediante la implementación práctica de procedimientos y metodologías que surgen de la experiencia en campo y de aspectos particulares del diseño, implementación y mantenimiento que deben ser tenidos en cuenta en ámbitos reales de aplicación de estas tecnologías.

2.1.2 Objetivo general

Desarrollar una metodología de diseño, implementación y mantenimiento de sistemas de radio enlace que permita maximizar la disponibilidad de dichos sistemas, logrando un ahorro de recursos tanto económicos, como humanos y de logística para empresas o personas que hagan uso de estos sistemas y tecnologías.

2.1.3 Objetivos específicos

- Destacar los aspectos importantes a tener en cuenta desde el punto de vista práctico en las etapas de relevamiento, diseño, implementación y mantenimiento de radio enlaces.
- Brindar una herramienta para el análisis de fallas y reparación de las mismas en sistemas de radio enlace.
- Elaborar una guía que sirva de orientación a personas con poca experiencia en el uso de estas tecnologías.

3 Marco Teórico-Conceptual

3.1 MBTF

Todos aquellos sistemas que operan en ambientes reales son susceptibles a perturbaciones, estas pueden tener su origen en fenomenos naturales (tormentas electricas, vientos de fuerza considerable, humedad, etc.), efectos colaterales (perdidas de información o cortes de servicio que sean causados fuera de la competencia de nuestro sistema) o ser causadas por errores humanos (operación o manipulación indebida de los elementos del sistema, instalación del sistema erronea, etc...). Adicionalmente los sistemas en si mismos son sujetos a degradaciones que pueden llevar a fallas o interrupciones en su funcionamiento.

La periodicidad de estas fallas puede ser cuantificadas de forma tal de poder estimar el tiempo de funcionamiento correcto de un sistema. A este tiempo se lo conoce como MBTF de un sistema. El MBTF (Medium Time Between Faults o Tiempo Medio Entre Fallas) representa el tiempo real de funcionamiento correcto e ininterrumpido dentro del cual un sistema cumple con su funcionamiento sin fallas, este valor se obtiene de la razon entre el tiempo total de operación del sistema y el numero de fallas que presentó.

$$MTBF = TTO / Nf$$

Donde “TTO” es el tiempo total de operación y “Nf” el numero total de fallas. El resultado de esta operación, se representa por lo general en horas continuas de funcionamiento como por ej 100.000 o 150.000 hs. Por lo general esta información (dentro del marco de un sistema que es considerado crítico), es declarada por el fabricante de cada equipamiento, es obtenida en funcion de pruebas de calidad a las que estos sistemas son sometidos y nos permite saber la confiabilidad de los mismos.

- Confiabilidad: La IEEE define a la confiabilidad como “la habilidad que tiene un sistema o componente de realizar sus funciones requeridas bajo condiciones específicas en periodos de tiempo determinados”.

3.2 MTTR

El MTTR (Medium Time To Restore o Tiempo Medio Para Reparar) es un índice que está dado por el tiempo promedio que lleva restaurar una falla operativa o funcional de un equipo y volver a un estado de operación normal. Este valor, comprende el tiempo que lleva analizar y diagnosticar la falla ocurrida, obtener una refacción o repuesto, el traslado de personal hacia el lugar físico y la reparación final del equipo, es decir todo el tiempo desde que se detecta la falla hasta su correcta reparación.

Este índice se deduce de la siguiente expresión matemática :

$$MTTR = TTR / Nf$$

En esta ecuación encontramos que “TTR” es el tiempo total empleado para la resolución de la falla y la restauración operacional del equipo en cuestión y “Nf” es el número total de fallas ocurridas. Al reducirse este valor, se está mejorando la mantenibilidad o facilidad de reparación de un sistema o equipo.

3.3 DISPONIBILIDAD

Al evaluar un sistema desde el punto de vista de que existe la posibilidad de que el mismo falle y teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de que esta situación suceda, así como también un vez que esa falla ha sucedido, el tiempo que llevara repararla, estamos hablando de la **DISPONIBILIDAD** de un sistema.

Este valor es un indicador de que tan frecuentemente el sistema se encuentra en condiciones de operación normales y está dado por la siguiente relación:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \text{MTBF}/(\text{MTBF}+\text{MTTR})$$

Esto es la razón de tiempo en el que el sistema se encuentra en servicio por la suma de el tiempo que se encuentra en servicio más el tiempo que demora repararlo o llevarlo de vuelta a una situación de operabilidad funcional.

3.4 Radio Enlaces

Se denomina Radio Enlace a cualquier interconexión entre terminales de telecomunicaciones efectuados por ondas electromagnéticas. Esta comunicación cuenta con un receptor y transmisor en cada extremo de la misma utilizados para el envío y recepción de información de distinto tipo. Estas comunicaciones son realizadas a través de ondas de radio que viajan a través de grandes distancias.

3.4.1 Ondas de Radio

Según las leyes de electromagnetismo, una corriente variable con el tiempo produce una electromagnética en el espacio que la rodea, estas relacionan campos eléctricos y magnéticos con las cargas y corrientes que los crean. Estas ondas electromagnéticas generalmente están relacionadas con una estructura o libres en el espacio, que al alejarse de la fuente la onda es esférica y se propaga hacia el infinito.

La propagación de ondas se refiere a la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio libre. Aunque el espacio libre realmente implica en el vacío, con frecuencia la propagación por la atmósfera terrestre se llama propagación por el espacio libre y se puede considerar siempre así. La principal diferencia es que la atmósfera de la Tierra introduce pérdidas de la señal que no se encuentran en el vacío.

Toda onda se caracteriza por su frecuencia (**f**) y su longitud de onda (**λ**), estas se relacionan por la velocidad de propagación del medio, para el caso de antenas, ésta es la velocidad de la luz

($c=3.108 \text{ m/s}$) para el aire o vacío, siendo $c= f \cdot \lambda$. En el aire de la atmósfera terrestre las ondas viajan a una velocidad algo menor y en una línea de transmisión es bastante menor, dependiendo del tipo de línea. La relación de los campos E y H en una onda electromagnética se puede ver en la figura siguiente

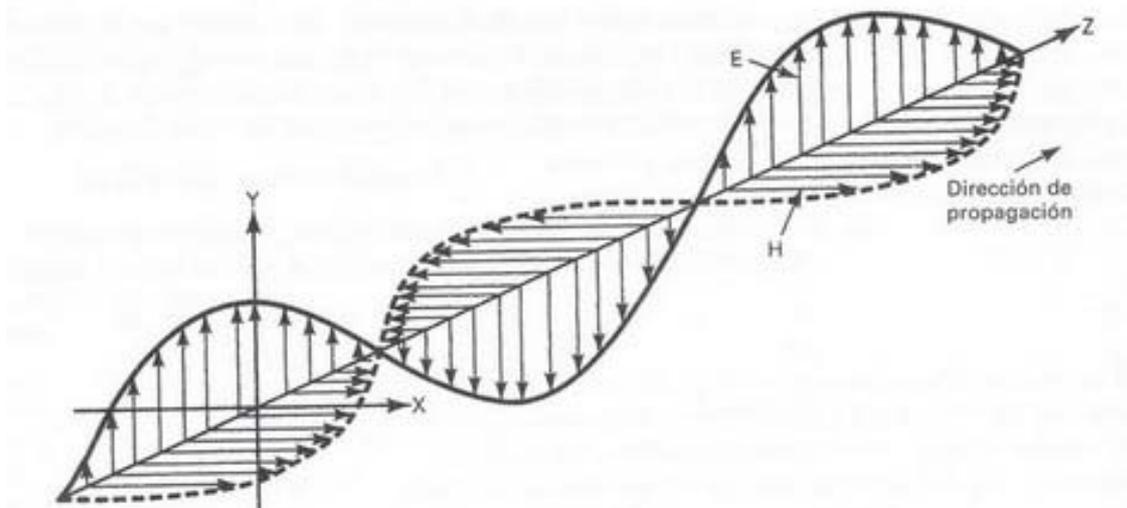


Figura 1: Grafico de Propagación de Ondas Electromagnéticas.¹

La polarización de una onda electromagnética depende de la posición del vector campo eléctrico respecto de la superficie de la tierra. Si el campo eléctrico se propaga en dirección paralela a la superficie de la tierra, la polarización de la onda es horizontal, si en cambio la dirección de propagación del campo eléctrico es perpendicular a la superficie de la tierra la polarización de la onda es vertical. Si el vector polarización gira 360° a medida que la onda recorre una longitud de onda y la intensidad del campo es igual en todos los ángulos, la polarización es circular (sentido horario o anti horario), en cambio si la intensidad del campo varía entonces la polarización es elíptica.

3.4.1.1 Frente de Onda

¹Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 4 pág 68.

Un frente de onda lo representa una superficie de ondas electromagnéticas de Fase constante, un frente se forma cuando se unen puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente, esto se puede ver en la figura siguiente:

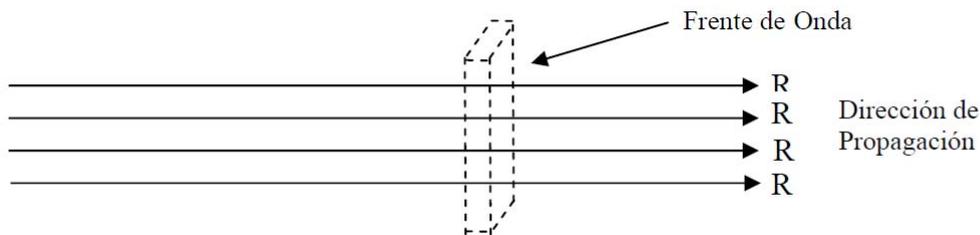


Figura 2: Grafico de Frente de Onda Electromagnética.²

Gran parte de los frentes de onda son por lo general más complicados que los frentes de onda plana, en una fuente puntual, varios rayos son propagados desde ella en todas direcciones. Esta fuente se considera una fuente isotrópica y el frente de onda generado por la fuente puntual se considera una esfera con su respectivo radio y en la cual su centro está en el punto donde se originan las ondas.

En el espacio libre, y a una distancia de la superficie de la fuente, los rayos dentro de una superficie pequeña del frente de onda esférico son casi paralelos a la dirección de propagación mostrados en la figura anterior, por lo tanto, a mayor distancia de la fuente la propagación, el frente de onda se parece más a un frente de onda plano por lo que en la mayoría de los casos los frentes de onda esféricos se pueden simplificar como frentes de onda planos.

3.4.1.2 Ley del Cuadrado Inverso

La ley del cuadrado inverso nos dice que entre más lejano va el frente de onda de la antena transmisora, la densidad de potencia es más pequeña. En estos casos la potencia total distribuida

²Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 9 pág 348.

sobre la esfera queda de la misma cantidad. Por otro lado el área de la esfera aumenta en proporción directa a la distancia a la que se encuentra de la fuente elevada al cuadrado, es decir, el radio de la esfera elevado al cuadrado y esto nos causa una menor densidad de potencia ya que ésta disminuye inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente.

3.4.1.3 Propagación y Pérdidas en Espacio Libre

Se llama propagación al conjunto de fenómenos físicos que conducen a las ondas del transmisor al receptor. Una onda electromagnética en su trayecto puede atravesar diferentes medios o encontrarse con obstáculos y como resultado de ello sufrir importantes cambios de dirección e intensidad en el proceso debido a diferentes fundamentos y propiedades físicas de las mismas.

El espacio libre se define como un medio dieléctrico homogéneo, isótropo y alejado de cualquier obstáculo, como se puede comprobar en nuestro entorno, esta circunstancia se da pocas veces. La superficie de la tierra no es uniforme y además la tierra presenta una curvatura, de cualquier manera si las antenas están dispuestas de forma conveniente, sin ningún obstáculo intermedio, se puede considerar que la única atenuación producida es la del espacio libre.

Para calcular las pérdidas, se debe suponer un equipo transmisor con una potencia denominada P_t , además se debe considerar que la antena de dicho equipo radia igual en todas las direcciones del espacio; si el medio no posee pérdidas, no se produce absorción de energía. Por lo tanto cualquier superficie esférica centrada en la antena será constante, con lo que la densidad de potencia S en cualquiera de las esferas centradas en la antena será proporcional al inverso del cuadrado de la distancia R a la antena; de lo anterior se deduce que:

$$P_T = 4\pi SR^2$$

Debido a que las antenas no son omnidireccionales, sino que concentran la energía en determinadas direcciones (y se supone que lógicamente la dirección de máxima radiación es la que

“se apunta” hacia el equipo receptor), se denominará $T G$ (ganancia) al incremento de radiación en la dirección preferente, con lo que en dicha dirección se tendrá que:

$$P_T \cdot G_T = 4\pi S R^2 \Rightarrow S = \frac{P_T \cdot G_T}{4\pi R^2}$$

El equipo receptor poseerá una antena que captará parte de esa densidad de potencia y la entregará al receptor, para calcular cuánto es dicha energía, se define el área efectiva o apertura $E A$ de la antena receptora, como la relación de potencia captada por la antena receptora y la densidad de potencia incidente sobre ella; por lo tanto la potencia recibida ($R P$) será:

$$P_R = S \cdot A_E = \frac{P_T}{4\pi R^2} \cdot G_T \cdot A_E$$

Si se tiene en cuenta otros factores como la polarización (C_p) y las posibles pérdidas en el medio (C_m), se obtiene la siguiente ecuación:

$$P_R = S \cdot A_E = \frac{P_T}{4\pi R^2} \cdot G_T \cdot A_E \cdot C_M \cdot C_P$$

Además existe una expresión que relaciona la apertura efectiva con la directividad (D) de la antena receptora. Dicha expresión es:

$$A_E = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot D$$

Recordando la ecuación de “Pr” inicial y la expresión de la última ecuación expuesta, se tiene en cuenta la eficiencia de las antenas, sustituyendo la directividad por la ganancia (La directividad y la ganancia difieren sólo en el término de eficiencia de antena), se puede calcular la atenuación como el cociente entre la potencia recibida y transmitida. Siendo igual a:

$$A_E = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \cdot \frac{1}{G_R \cdot G_T}$$

Se denomina además atenuación en el espacio libre, a la atenuación, sin tener en cuenta la ganancia de las antenas receptora (G_r) y transmisora (G_t), por lo que la ecuación de la atenuación en espacio libre se expresa:

$$A_{EL} = \frac{P_T}{P_R} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

En dB será $10 \times \log (A_{EL})$, y se puede expresar la relación anterior, en unidades más prácticas, quedando:

$$A_{EL} (dB) = 32.45 + 20 \log f (Mhz) + 20 \log d (Km)$$

Como se observa la atenuación del espacio libre depende únicamente de la frecuencia y la distancia de separación de los equipos, conforme aumenta la frecuencia aumenta la atenuación. Si se considera la ganancia de las antenas receptora (GR) y transmisora (GT) en dB, se encuentra con la siguiente fórmula de transmisión.

$$A_{EL} (dB) = 32.45 + 20 \log f (Mhz) + 20 \log d (Km) - G_T - G_R$$

Al conocer el valor de la atenuación en el espacio libre, y al suponer que no existe otro fenómeno, dado que se tiene un medio ideal, se puede fácilmente calcular la potencia recibida:

$$10.\log P_R = 10.\log P_T - A(\text{dB})$$

La atenuación del espacio libre es únicamente debida a la expansión de las ondas electromagnéticas en el espacio y al tamaño físico limitado de las antenas y no a ningún otro fenómeno.

3.4.1.4 Atenuación

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que describe cómo es que se reduce la densidad de potencia con la distancia a la fuente. El campo electromagnético continuo se dispersa a medida que el frente de onda se aleja de la fuente, lo que hace que las ondas electromagnéticas se alejen cada vez más entre sí. En consecuencia, la cantidad de ondas por unidad de área es menor.

Cabe destacar que no se pierde ni se disipa nada de la potencia irradiada por la fuente a medida que el frente de onda se aleja, sino que el frente se extiende cada vez más sobre un área mayor lo que hace una pérdida de potencia que se suele llamar atenuación de la onda. La atenuación de la onda se debe a la dispersión esférica de la onda, a veces se le llama atenuación espacial de la onda.

3.4.1.5 Absorción

La causa de la absorción de las ondas electromagnéticas al viajar por el aire es que el aire no es un vacío, sino que está formado por átomos y moléculas de distintas sustancias gaseosas, líquidas y sólidas. Estos materiales pueden absorber a las ondas electromagnéticas causando pérdidas por absorción. Cuando la onda electromagnética se propaga a través de la atmósfera terrestre, se transfiere energía de la onda a los átomos y moléculas atmosféricas.

La absorción de onda por la atmósfera es análoga a una pérdida de potencia $R/2$. Una vez absorbida, la energía se pierde para siempre, lo que provoca una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. Así también la absorción de una onda depende del medio en el que se propague. Las pérdidas por absorción no dependen de la distancia a la fuente de radiación, sino más bien a la distancia total que la onda se propaga a través de la atmósfera, es decir, cuando la onda se propaga a través de un medio homogéneo y cuyas propiedades son uniformes, las pérdidas por absorción en el primer kilómetro de propagación son las mismas que en el último kilómetro.

En caso de contar con lluvias intensas y neblina densa, las ondas electromagnéticas tienden a ser absorbidas en mayor proporción que cuando se encuentran en una atmósfera normal. En la figura 3 se tiene la absorción en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética en frecuencias de los 10 a 200 GHz cuando se propaga en oxígeno y vapor de agua.

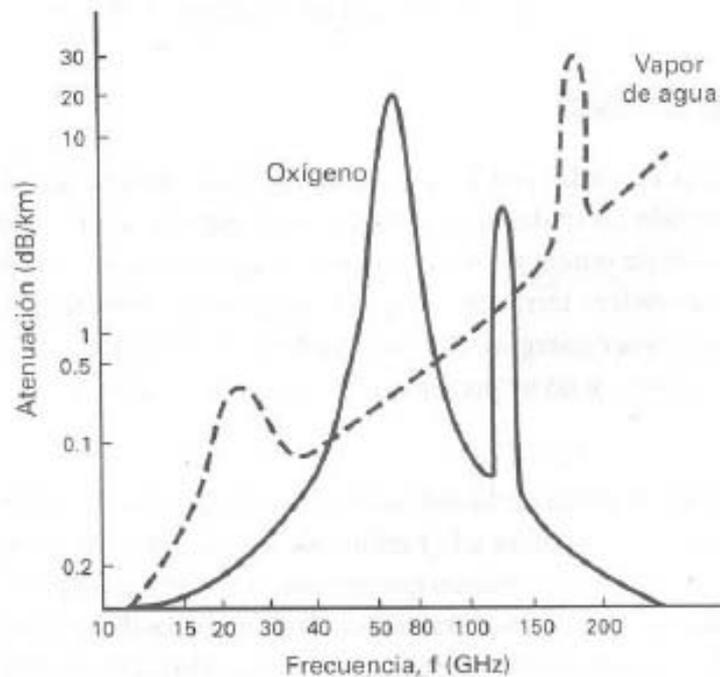


Figura 3: Absorción Atmosférica de las Ondas Electromagnéticas en Función de su Frecuencia³

3.4.1.6 Perdidas por Vegetación

En ciertos casos, la atenuación debida a la vegetación puede ser importante, tanto para los sistemas terrenales como para los sistemas Tierra-espacio. Pero la gran diversidad de condiciones y tipos de follaje dificultan la elaboración de un procedimiento de predicción general. Además, existe una falta de datos experimentales convenientemente verificados.

3.4.1.6.1 Terminal en Zona Boscosa

Para un trayecto radioeléctrico terrenal, uno de cuyos terminales está situado en un bosque o en una zona similar de vegetación extensa, la pérdida adicional debida a la vegetación puede describirse en base a dos parámetros:

³Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 9 pág 352.

- El índice de atenuación específica (dB/m) debida fundamentalmente a la dispersión de energía fuera del trayecto radioeléctrico, que se mediría en un trayecto muy corto;
- La atenuación adicional total máxima debida a la vegetación en un trayecto radioeléctrico (dB) limitada por el efecto de otros mecanismos, entre ellos, la propagación de ondas de superficie por encima del medio vegetal y la dispersión dentro del mismo.

En la Fig. 4, el transmisor está fuera de la zona boscosa y el receptor está a una cierta distancia, d , dentro de la misma. La atenuación excesiva, A_{ev} , debida a la presencia de la vegetación viene dada por:

$$A_{ev} = A_m [1 - \exp (- d Y / A_m)]$$

Siendo:

d : longitud del trayecto dentro de la zona boscosa (m)

Y : atenuación específica para trayectos en vegetación muy cortos (dB/m)

A_m : atenuación máxima cuando un terminal está dentro de una zona de vegetación de un tipo y profundidad específicos (dB).

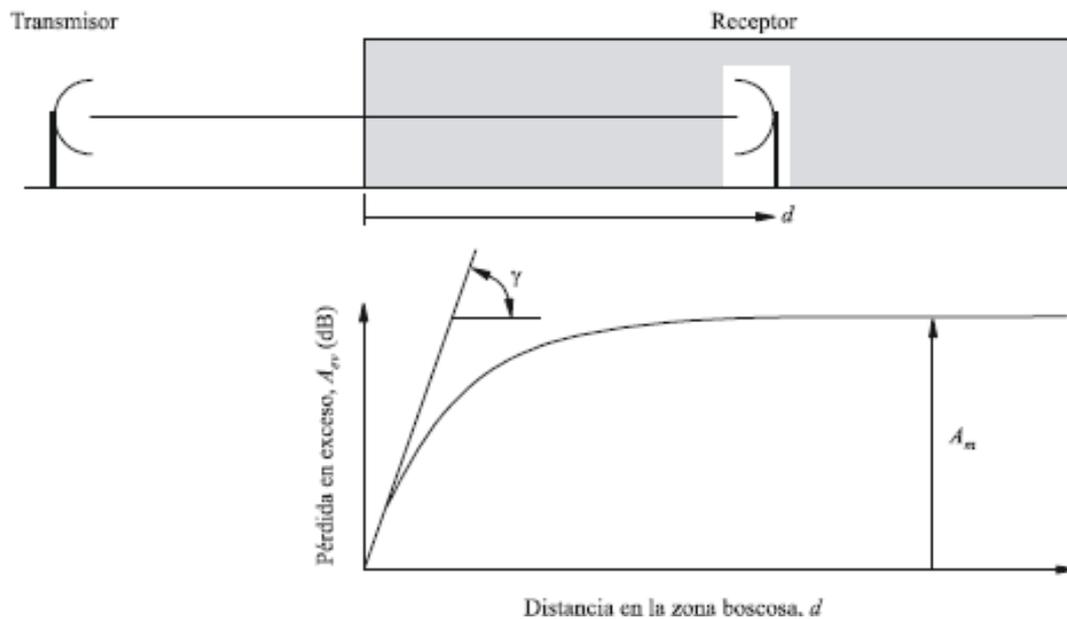


Figura 4: Representación de trayecto Radio Eléctrico en Zona Boscosa.⁴

Es importante observar que en la definición de exceso de atenuación, A_{ev} , se incluye el exceso debido a todos los demás mecanismos, y no sólo la pérdida en espacio abierto. Por consiguiente, si la geometría del trayecto radioeléctrico de la Fig. 4 fuese de tal forma que el despeje total de Fresnel del terreno no existiera, A_{ev} sería el exceso de atenuación producido tanto en espacio abierto como por la pérdida por difracción. De igual forma, si la frecuencia fuera suficientemente alta como para que la absorción gaseosa resultara significativa, A_{ev} sería también el exceso producido por la absorción gaseosa.

Debe observarse asimismo que, A_m , es equivalente a la pérdida por ocupación del suelo observada frecuentemente en el caso de terminales obstruidos por alguna forma de cobertura del terreno u ocupación del suelo.

⁴Recomendación UIT-R P.833-6 – Atenuación debida a la vegetación. Pág 2.

El valor de la atenuación específica debida a la vegetación, A_{ev} dB/m, depende de la especie y la densidad de dicha vegetación. En la figura siguiente se proporcionan valores aproximados en función de la frecuencia.

En la Fig. 5 se muestran valores típicos de atenuación específica obtenidos a partir de diferentes mediciones en la gama de frecuencias que va de 30 MHz a 30 GHz aproximadamente en zona boscosa. Por debajo de 1 GHz las señales polarizadas verticalmente tienen tendencia a experimentar una atenuación superior a la que experimentan las polarizadas horizontalmente, aunque esto se debe a la dispersión causada por los troncos de los árboles.

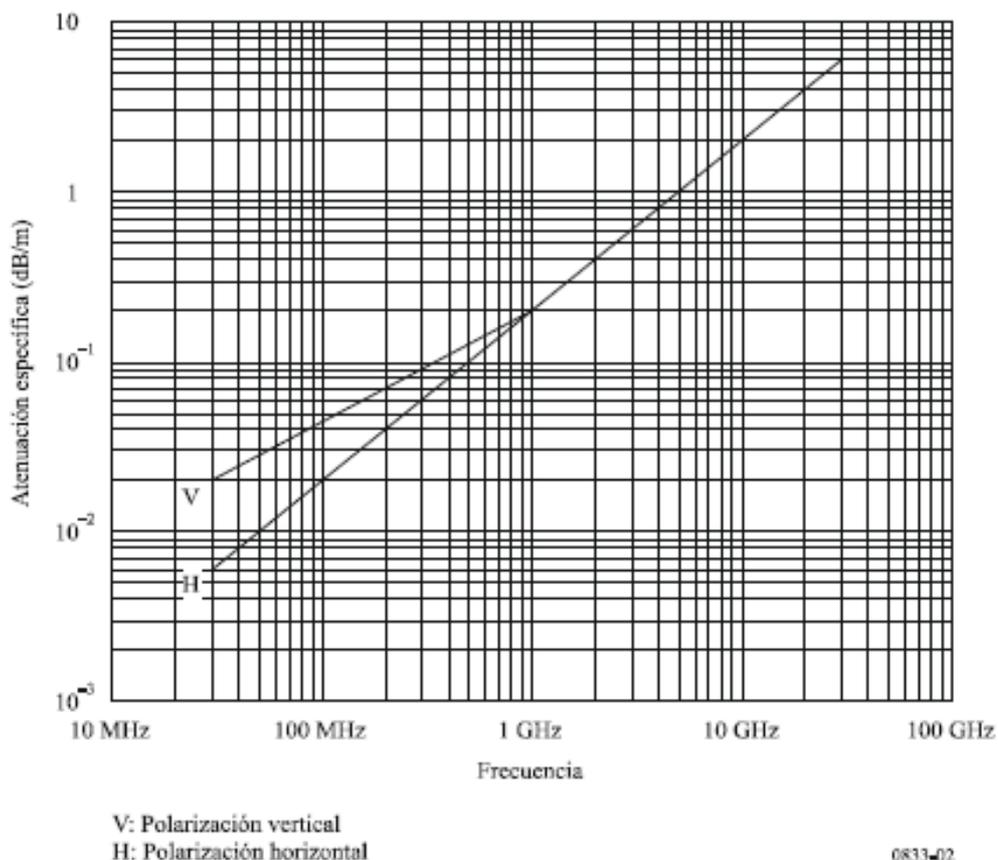


Figura 5: Atenuación Especifica en Zona Boscosa.⁵

⁵Recomendación UIT-R P.833-6 – Atenuación debida a la vegetación. Pág 3.

Se hace hincapié en que la atenuación debida a la vegetación varía ampliamente debido a la naturaleza irregular del medio y a la gran variedad de especies, densidades y condiciones de humedad que se da en la práctica. Los valores que se muestran en la Fig. 2 deben considerarse únicamente como ejemplos.

A frecuencias del orden de 1 GHz, la atenuación específica en zonas de árboles con hojas es normalmente un 20% superior (dB/m) que en las zonas de árboles sin hojas. También puede haber variaciones de la atenuación debido al movimiento del follaje, por ejemplo a causa del viento.

El valor de la atenuación máxima, A_m , limitada por la dispersión de la onda de superficie, depende del tipo y la densidad de la vegetación, así como del diagrama de radiación de la antena del terminal que se encuentra dentro de la vegetación y de la distancia en vertical entre la antena y el punto más alto de la vegetación.

La dependencia de la frecuencia de A_m (dB):

$$A_m = A_1 f \lambda$$

Donde f es la frecuencia (MHz), se ha obtenido mediante diversos experimentos:

– Mediciones en la gama de frecuencias 900-1 800 MHz realizadas en un parque con árboles tropicales en Río de Janeiro (Brasil) con una altura media de los árboles de 15 m. Se obtuvieron valores de $A_1 = 0,18$ dB y $\lambda = 0,752$. La altura de la antena receptora era de 2,4 m.

– Mediciones en la gama de frecuencias 900-2 200 MHz realizadas en un bosque cerca de Mulhouse (Francia) en trayectos de longitudes diferentes, desde unos pocos cientos de metros hasta 6 km con diversos tipos de árboles de altura media de 15 m. Se obtuvieron valores de $A_1 = 1,15$ dB

y $\lambda = 0,43$. La antena receptora en el bosque era un monopolo de $\lambda/4$ montada sobre un vehículo a una altura de 1,6 m y la antena transmisora era un dipolo de $\lambda/2$ con una altura de 25 m. La desviación típica de las mediciones fue de 8,7 dB. Se observaron unas variaciones según la estación del año de 2 dB a 900 MHz y de 8,5 dB a 2200 MHz.

3.4.1.7 Desvanecimiento por Multipletrayectoria

Para planificar enlaces de más de unos pocos kilómetros de longitud deben tenerse en cuenta diversos mecanismos de desvanecimiento en condiciones de cielo despejado originados en las capas extremadamente refractivas de la atmósfera, a saber: dispersión del haz, desalineamiento de antena y propagación por trayectos múltiples en la superficie y en la atmósfera. La mayoría de estos mecanismos pueden aparecer aislados o en combinación unos con otros (véase la Nota 1). Cuando la dispersión del haz de la señal directa se combina con una señal reflejada en una superficie dando lugar a desvanecimiento por trayectos múltiples se produce un tipo de desvanecimientos selectivos en frecuencia especialmente acusados.

El desvanecimiento debido a las capas de la atmósfera es el factor dominante en la degradación de los radioenlaces. Las condiciones meteorológicas en el espacio que separa el transmisor del receptor, pueden causar algunas veces efectos perjudiciales a la señal recibida. Los rayos que normalmente tendrían que haberse perdido en la troposfera se pueden refractar hacia la antena receptora donde se sumarían a la señal deseada. Las relaciones de fase y de amplitud entre las señales, determinan la señal de entrada resultante en el receptor. Esto afecta a la transmisión de las señales digitales de dos formas. En algunas ocasiones, todas las componentes del espectro de la señal útil se reducen por igual. A esto se le da el nombre de desvanecimiento no-selectivo o plano. Otras veces solo parte de las componentes espectrales serán reducidas, causando que el espectro se distorsione. A esto se le llama desvanecimiento selectivo de frecuencia. Estos dos efectos serán tratados por separado

El corte total debido al desvanecimiento multitrayecto es la suma del corte por desvanecimiento plano y el corte por desvanecimiento selectivo

$$P_{tot} = P_{flat} + P_{sel}$$

3.4.1.7.1 Desvanecimiento Plano

Indican que la probabilidad de que el nivel recibido se desvanecerá F dB por debajo del nivel del espacio libre es:

$$P_{flat} = P_o \cdot 10^{-f/10}$$

Donde f es el margen de desvanecimiento

El parámetro P_o , factor de ocurrencia de desvanecimiento, está relacionado con los parámetros del vano.

El factor de ocurrencia de desvanecimiento en $P_{flat} = P_o \cdot 10^{-f/10}$ esta en función de la localización del vano, del terreno y de la frecuencia de radio utilizada.

$$P_o = 0.3 \cdot a \cdot b \cdot \frac{f}{4} \cdot \left(\frac{d}{50}\right)^3$$

Donde f es la frecuencia de radio en Ghz

d es la longitud del vano en km

$$b = \left(\frac{1s}{5}\right)^{1.3}$$

Donde S es la desviación estándar de las elevaciones del terreno, medidas en intervalos de 1 Km a lo largo del vano, excluyendo los emplazamientos de la estación de radio.

Donde a es un factor climatico dado por la siguiente tabla

a	Región climática
4.00	Ecuatorial, regiones de alta humedad y temperatura, el valor medio anual de N se aproxima a 360 Unidades N.
3.00	Desiertos, fuertes variaciones térmicas entre el día y la noche, el valor de N se aproxima a 280 Unidades N, pero varía enormemente. También regiones costeras con terrenos bastante llanos en climas más templados.
2.00	
1.50	Invierno seco y verano lluvioso en climas continental y subtropical, a menudo enlaces de radio sobre tierra seca, el valor medio de N se aproxima a 320 Unidades N, pero la variación es casi de 100 Unidades N durante un año.
1.00	Fuertes variaciones de temperaturas diurnas en climas continental templado, media altitud, terreno medianamente irregular, condiciones de propagación más favorables en verano, valor medio de N es 320 Unidades N, y la variación ronda de 2' a 40 unidades N a lo largo del año.
0.50	Regiones altas, ligeramente secas, tierra adentro, terreno regular.
0.25	Montañas, terreno muy irregular, ligeramente seco.
0.05	Polar temperaturas relativamente bajas y pocas precipitaciones.

Tabla 1: Factor Climático para Cálculo de Desvanecimiento Plano

3.4.1.7.2 Desvanecimiento Selectivo de Frecuencia

El funcionamiento de enlaces de radio digital de visibilidad directa puede estar seriamente perjudicado por el desvanecimiento selectivo de frecuencia, debido a distorsiones de amplitud en banda y de fase. Este desvanecimiento multirayecto (o selectivo) puede ser el resultado de reflexiones sobre la superficie, o inducidas por anomalías atmosféricas como fuertes gradientes de

conducción. Durante algunas condiciones atmosféricas con capas horizontales estáticas, el gradiente vertical del índice de refracción atmosférico produce múltiples caminos de propagación entre el transmisor y el receptor en un enlace radioenlace de visibilidad directa, tal como se muestra en la figura 35. La Figura 36 muestra la respuesta en el dominio del tiempo del enlace de radio multirayecto de la figura 35. Esta respuesta, durante las condiciones de propagación multirayecto, indica que la radio recibirá múltiples pulsos para cada pulso digital enviado por el transmisor. Estas figuras ilustran solo el caso simplificado de dos rayos. De cualquier modo, en los análisis se utiliza un modelo más complicado de tres rayos, y será descrito más tarde.

Si T es el retardo relativo en tiempo entre los dos caminos de propagación, la fase relativa entre los dos caminos será $2\pi fT$ y, por lo tanto, función de la frecuencia, f . La amplitud y la fase de la señal recibida varía con la frecuencia como se muestra por la función de transferencia del vano de la siguiente figura. Tal variación de la frecuencia de transferencia del vano se conoce como desvanecimiento selectivo de frecuencia.

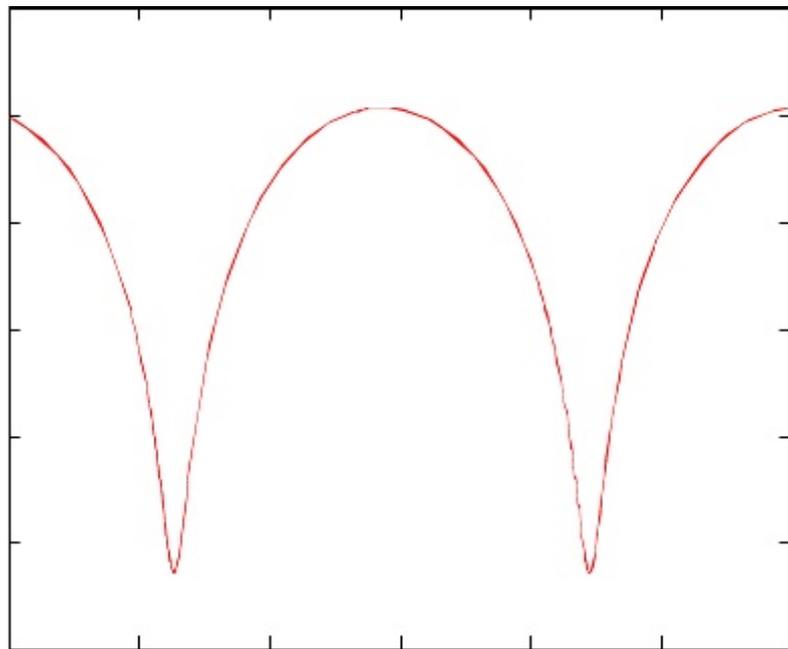


Figura 6: Desvanecimiento selectivo de frecuencia.⁶

⁶Recomendación UIT-R P.1411-5 – Datos de Propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa.

Los impactos del desvanecimiento por multitrayecto en la radio digital se pueden resumir brevemente:

- Se reduce la relación señal/ruido y consecuentemente se incrementa la relación de error de bit (BER).
- Se reduce la relación portadora/interferencia (CIR) y consecuentemente aumenta el BER.
- Se distorsiona la forma de onda de un pulso digital, provocando una mayor interferencia entre símbolos y un mayor BER.
- Se introduce atenuación diafónica entre las dos portadoras ortogonales, consecuentemente se incrementa el BER.

Claramente, la dispersión por multitrayecto puede degradar seriamente el funcionamiento y causar cortes e interrupciones en un sistema digital de radio por medio de diversos mecanismos.

3.4.2 Propiedades de las Ondas de Radio

En la atmósfera terrestre, la propagación de frentes de onda y rayos puede diferir del comportamiento en el espacio libre debido a efectos ópticos. Estos efectos ópticos son principalmente clasificados en refracción, reflexión, difracción e interferencia llamándose ópticos debido a que fueron primeramente observados en la ciencia óptica que se encarga de estudiar a las ondas luminosas.

Debido a que las ondas luminosas son ondas electromagnéticas de alta frecuencia también se pueden aplicar los mismos conceptos a las ondas de radio. Por esto se pueden sustituir las ecuaciones de Maxwell por el trazo geométrico de rayos haciendo los cálculos mucho más sencillos.

3.4.2.1 Refracción

La refracción se refiere al cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por lo tanto, hay refracción siempre que una onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad como se muestra en la figura

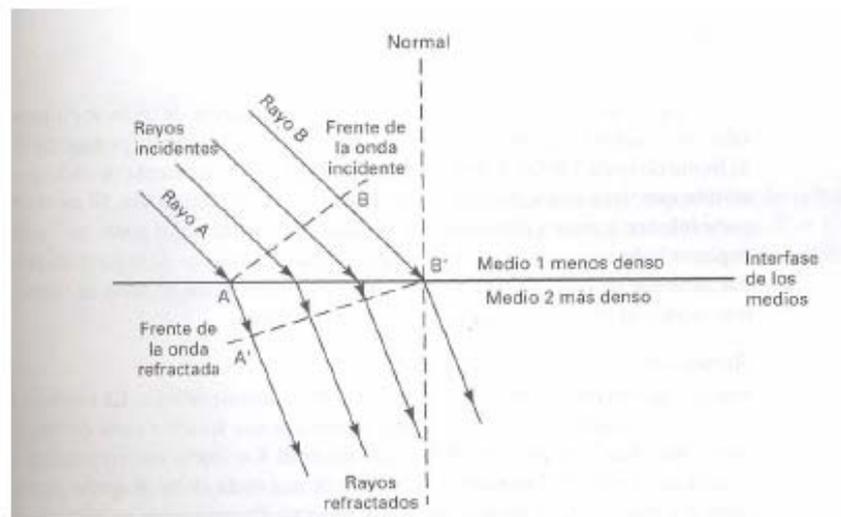


Figura 7: Refracción de un Frente de Onda.⁷

En la figura 7 se muestra cómo el rayo A se propaga del medio 1 al medio 2 siendo el medio 1 menos denso que el 2. El rayo A proveniente del medio 1 con menos densidad experimenta un cambio de dirección al propagarse dentro del medio 2.

El ángulo de incidencia es llamado al ángulo que forma la onda incidente y la normal y el ángulo de refracción es el formado por la onda propagada en el medio y la normal, así, el índice de refracción no es más que la relación entre la velocidad de propagación de la luz en el espacio vacío y la velocidad de propagación de la luz en determinado material.

⁷Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 9 pág 353.

3.4.2.1.1 Principio de Huygens

En el tratado de Huygens publicado hace mas de 300 años (1629-1695) se propone un nuevo mecanismo para la propagación de la luz conocido hoy en día como principio de Huygens. En una analogía con el sonido, se consideraba que la luz viajaba como ondas en una especie de materia ficticia llamada éter que se suponía que llenaba el espacio entero.

Cada partícula de éter puesta a vibrar por la onda era vista como el origen de nuevas ondas. Como se muestra en la figura

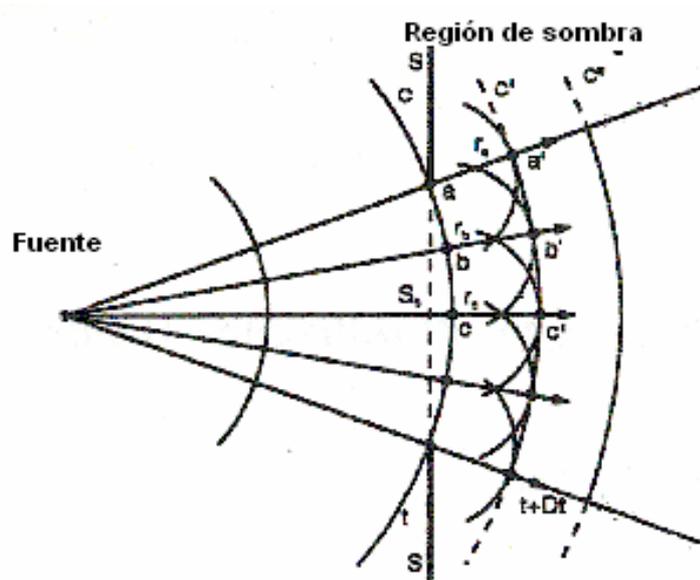


Figura 8: Creación de Nuevas Ondas Producto de la Difracción.⁸

Las ondas esféricas iniciales originadas de una fuente puntual son parcialmente oscurecidas por una pantalla infinita S. El movimiento de estas ondas es definido por una velocidad v en el cono limitado por la apertura de la pantalla S_o . Suponiendo que al tiempo t el frente de onda esférico se encuentra situado dentro de la apertura, donde se considera que el frente de onda se compone de partículas en fase que radian de igual forma ondas esféricas secundarias y de esta forma las ondas traseras desaparecen a medida que persisten las posteriores.

⁸Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 9 pág 358.

Al momento siguiente $t + \Delta t$ un nuevo frente de onda v es formado con radio $ra=rb=rc$ y producen nuevas generaciones de ondas y de esta forma el frente de onda va avanzando hacia delante con la misma dirección.

El principio de Huygens es usado también para probar las leyes de reflexión y refracción de ondas planas. En su forma inicial, el principio de Huygens es únicamente relevante para la geometría óptica y es válido para longitudes de onda extremadamente pequeños, así también, es inadecuado para la explicación de todos los fenómenos de las ondas. Por ejemplo, la desviación de ondas de una propagación rectilínea de rayos cuando pasa por el borde de un objeto o a través de pequeñas aperturas.

A pesar de que Huygens creó su mecanismo de movimiento de luz usando las ideas acerca de ondas secundarias y su suma para formar un nuevo frente de onda, él no estaba consciente de la naturaleza periódica de la luz y del hecho de que ésta periodicidad se encuentra ligada al espacio y al tiempo. El mecanismo de Huygens para propagación de ondas fue olvidado y por un largo tiempo solo el modelo de propagación de luz fue tomado como la raíz de la óptica.

Más de un siglo después de Huygens, Thomas Young (1773-1829) descubrió el principio de interferencia de rayos y explica cualitativamente que ocurre cuando dos rayos de luz se combinan. Young explicó las propiedades periódicas de la luz como resultado de combinar rayos con magnitudes positivas y negativas. Posteriormente Agustín Fresnel reavivó el principio de Huygens para establecer la teoría de las ondas de luz.

El principio de Huygens básicamente explica que todos los puntos de un frente de onda pueden ser considerados como una fuente de puntos que producen ondas secundarias y éstas se combinan para producir un nuevo frente de onda en la dirección de propagación y de esta forma la difracción es causada por la propagación de estas onditas secundarias en una región de sombra. El campo de una onda difractada en una región de sombra es una suma de vectores de componentes de campos eléctricos de todas las ondas secundarias en el espacio alrededor del obstáculo.

3.4.2.1.2 Radio o Curvatura de la Tierra

De lo mencionado anteriormente se hace conveniente analizar el gradiente del índice de refracción o factor K que corresponde al radio eficaz de la tierra, el cual se lo define como el grado y la dirección de la curvatura que describe el haz de microondas durante su propagación y se obtiene según las ecuaciones vistas con anterioridad.

$$K = R' / R_t$$

Donde R_t es el radio real terrestre y R' es el radio de la curvatura ficticia de la tierra.

Cualquier variación del índice de refracción provocada por la alteración de las condiciones atmosféricas, se expresa como un cambio del factor K. En condiciones atmosféricas normales, el valor de K varía desde 1.2 para regiones elevadas y secas (o 4/3 en zonas mediterráneas), hasta 2 o 3 para zonas costeras húmedas.

Cuando K se hace infinito, la tierra aparece ante el haz como perfectamente plana, ya que su curvatura tiene exactamente el mismo valor que la terrestre.

Si el valor de K disminuye a menos de 1, el haz se curva en forma opuesta a la curvatura terrestre. Este efecto puede obstruir parcialmente al trayecto de transmisión, produciéndose así una difracción.

El valor de la curvatura terrestre para los distintos valores de K se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$h = \frac{d^2 x}{2K} \times 1000 [mts]$$

Donde:

h = Cambio de la distancia vertical desde una línea horizontal de referencia, en metros.

d_1 = Distancia desde un punto hasta uno de los extremos del trayecto, en Kilómetros

d_2 = Distancia desde el mismo punto anterior hasta el otro extremo del trayecto, en Kilómetros.

K = Factor del radio eficaz de la tierra.

Con excepción del desvanecimiento por efecto de trayectos múltiples, los desvanecimientos son fácilmente superables mediante:

- Diversidad de espacio.
- Diversidad de frecuencia.
- Diversidad de polarización.

La alteración del valor de K desde 1 hasta infinito (rango normal de K), tiene escasa influencia en el nivel de intensidad con que se reciben las señales, cuando el trayecto se ha proyectado en forma adecuada.

Las anomalías de propagación ocurren cuando K es inferior a 1, el trayecto podría quedar obstruido y por lo tanto sería vulnerable a los fuertes desvanecimientos provocados por el efecto de trayectos múltiples.

Cuando K forma un valor negativo, el trayecto podría resultar atrapado entre capas atmosféricas y en consecuencia sería susceptible a sufrir desvanecimiento total.

3.4.2.2 Reflexión

La reflexión refiere al choque de la onda electromagnética con la frontera entre dos medios y parte o toda la potencia de la onda no se propaga en el medio si no que es reflejada en dirección opuesta al segundo medio como se muestra en la figura 9 en donde el frente de onda incidente

choca con el medio 2 con un ángulo de incidencia $i\theta$. Este frente de onda es reflejado en su totalidad con un cambio de dirección llamado $r\theta$.

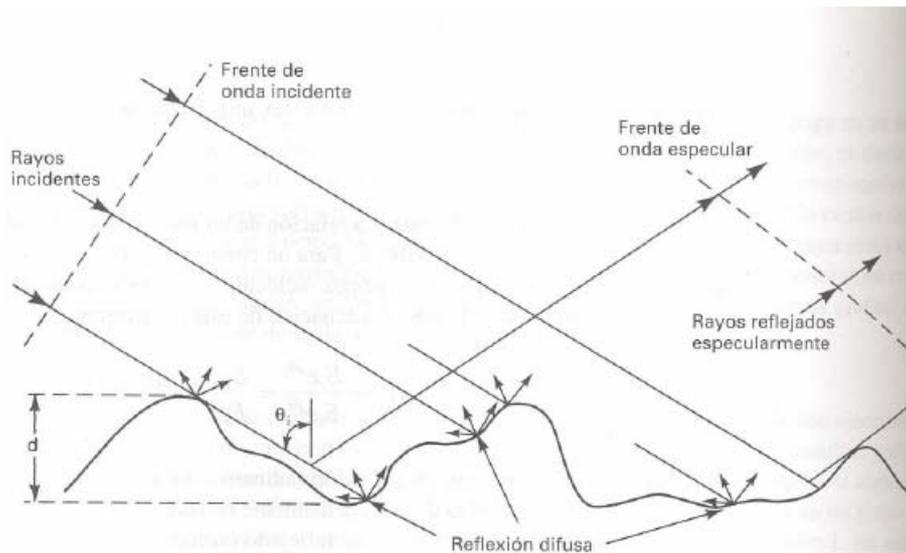


Figura 9: Reflexión de Ondas Electromagnéticas en una Superficie Terrestre.⁹

3.4.2.3 Difracción

La difracción refiere a la modulación o redistribución de la energía dentro de un frente de onda al pasar cerca de la orilla de un objeto opaco. La difracción es el fenómeno que permite que las ondas luminosas o de radio se propaguen en torno a las esquinas. Cuando un frente de onda pasa cerca de un obstáculo o discontinuidad cuyas dimensiones sean del tamaño comparable a una longitud de onda, no se puede usar el análisis geométrico como en los casos anteriores. En estos casos se debe de usar el principio de Huygens.

En los casos en el que el frente de onda es considerado plano y finito, es incompleta la anulación en direcciones aleatorias. En consecuencia, el frente de onda se reparte hacia fuera, o se dispersa a lo que en este caso se le llama difracción. Este fenómeno es comúnmente observado

⁹Transmision de Datos y Redes de Comunicación.Behrouz.Forouzan.Mcgraw-Hill. Cap 9 pág 356.

cuando se abre la puerta de un cuarto oscuro. Los rayos de luz se difractan en torno a la orilla de la puerta, e iluminan lo que hay detrás de ella.

La energía electromagnética puede considerarse que se propaga de una fuente puntual en ondas planas. La ley de cuadrado inverso no solo se aplica a la fuente de energía sino también a cualquier punto en una onda plana. Es decir, de cualquier punto en una onda plana, la energía se propaga como si el punto fuera la fuente de energía. Por lo cual, las ondas pueden ser consideradas que son creadas continuamente desde cada punto en el plano y propagadas en todas direcciones.

3.4.2.3.1 Impacto de la Difracción de Acuerdo a las Zonas de Fresnel

Fresnel al entender la deducción del mecanismo de las ondas de Huygens, tomó en cuenta la periodicidad del espacio y tiempo de las ondas de luz, interferencia mutua y polarización de los efectos para formar un nuevo principio aplicado a las ondas electromagnéticas. De acuerdo a Fresnel, el frente de onda adquiere un claro significado físico como una superficie en la cual las onditas secundarias contienen amplitudes y direcciones de radiación de interferencia dadas. De esta forma, el principio de Huygens modificado y perfeccionado toma el nombre de Principio de Huygens-Fresnel que se convierte en un método fundamental para resolver problemas de difracción de las ondas.

Este método es usado para describir la propagación de las ondas electromagnéticas en el espacio.

Considerando que el transmisor está separado del receptor en el espacio libre y una pantalla obstruyendo el enlace con una altura efectiva h y con un ancho infinito se encuentra a una distancia $d1$ del transmisor y a $d2$ del receptor, las ondas que viajan por arriba de la pantalla a una distancia mayor que si existiera una línea de vista entre las antenas transmisora y receptora. Asumiendo que $h \ll d1, d2$ y $h \gg \text{longitud de onda } \lambda$, entonces la diferencia entre la línea de vista y el camino

difractado llamado *longitud del camino en exceso* (Δ), puede ser obtenido por la geometría de la figura

$$\Delta \cong \frac{h^2}{2} \frac{(d_1 + d_2)}{d_1 d_2}$$

Donde

h = es la altura efectiva de la pantalla.

d_1 = distancia de la pantalla al transmisor.

d_2 = distancia de la pantalla al receptor.

Δ = longitud de la trayectoria en exceso.

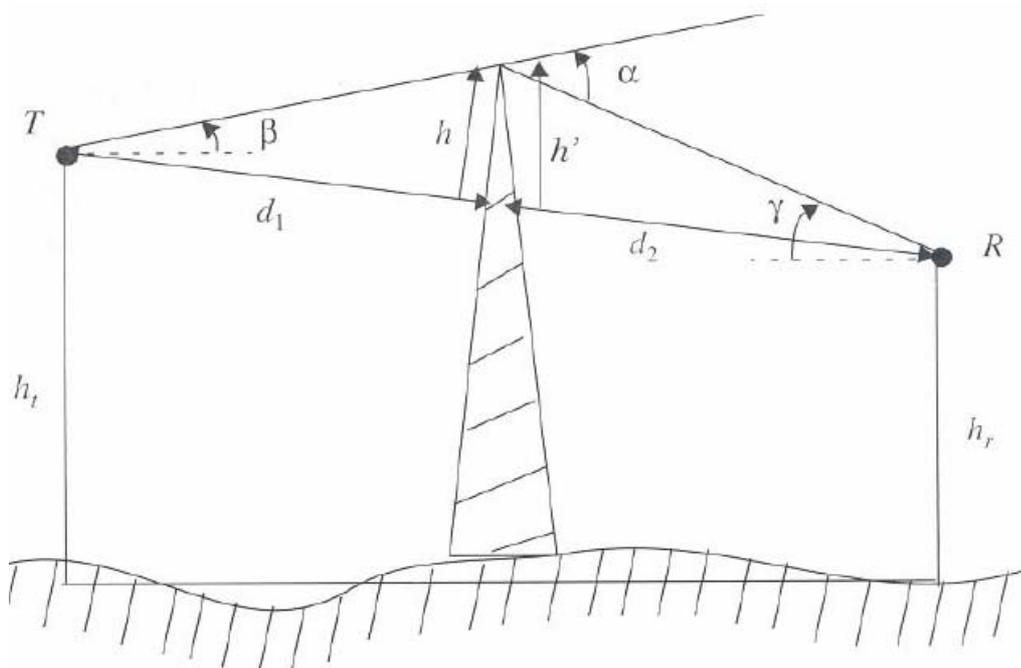


Figura 10: Geometría de Difracción cuando el transmisor y el receptor no se encuentran a la misma altura.¹⁰

¹⁰ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 16

De esta forma la fase correspondiente está dada por:

$$\phi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda}$$

Donde:

Δ = longitud de la trayectoria en exceso.

λ = longitud de onda

Debido a estas ecuaciones, se puede deducir que la diferencia de fase entre la línea de vista y el camino difractado es función de la altura y posición de la obstrucción, así como también de la posición de la antena transmisora y receptora.

En los problemas por difracción, es ventajoso reducir todas las alturas por una constante para que la geometría pueda ser simplificada sin cambiar los valores de los ángulos como se muestra en la figura

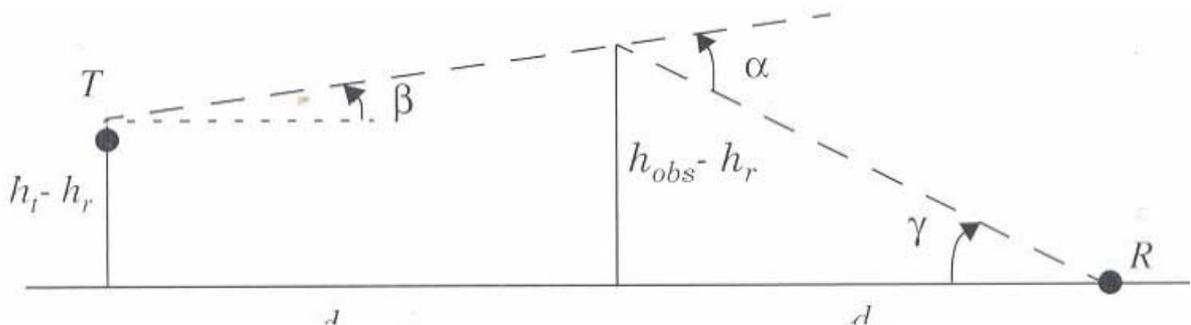


Figura 11: Geometría equivalente cuando la altura más pequeña es sustraída de todas las otras alturas.¹¹

El concepto de pérdidas por difracción es función de la diferencia del camino alrededor de la obstrucción explicado por las zonas de Fresnel. Las zonas de Fresnel representan regiones sucesivas

¹¹ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 17

donde las ondas secundarias tienen un camino con una longitud desde el transmisor hasta el receptor que es $n\lambda/2$ más largo que el camino de línea de vista. La figura 12 demuestra un plano transparente puesto entre el transmisor y el receptor. Los círculos concéntricos en el plano representan el punto de origen de las ondas secundarias que se propagan hacia el receptor y así, la longitud del camino total se incrementa por $\lambda/2$ para los círculos sucesivos.

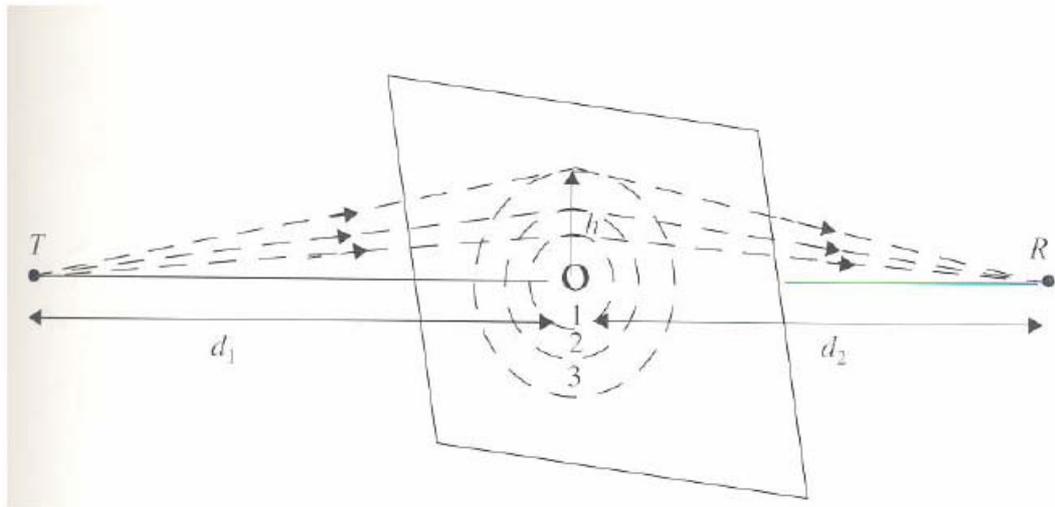


Figura 12: Círculos concéntricos que definen los límites de las zonas sucesivas.¹²

Los círculos concéntricos son llamados zonas de Fresnel. Las zonas de Fresnel posteriores tienen un efecto que alternadamente proveen interferencia constructiva y destructiva para la señal total recibida por la antena receptora. El radio del n -ésimo círculo de la zona de Fresnel denominado r_n y está determinado por n , λ , d_1 , d_2 .

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

¹² Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente. Pag 17

Donde

λ = longitud de onda.

$d1$ = distancia de la pantalla al transmisor.

$d2$ = distancia de la pantalla al receptor.

Esta aproximación es válida para $d1, d2 \gg r_n$

La trayectoria que viaja a través del círculo más pequeño corresponde a $n = 1$ en la figura 2.3 se tiene un exceso de camino de $\lambda/2$ comparado con la línea de vista, así los círculos correspondientes a $n = 2, 3$ etc. tendrán un exceso de longitud de camino de $\lambda, 3\lambda/2$, etc. el radio de los círculos concéntricos depende de la posición del plano. Las zonas de Fresnel mostradas en la figura 2.4 tendrán un máximo de radio si el plano se encuentra a la mitad del receptor y el transmisor y viene siendo más pequeño a medida que se acerca a cualquiera de las dos antenas.

Este efecto muestra como la sombra es sensible a la frecuencia, así también a la posición de la obstrucción con relación del transmisor y receptor.

En los sistemas de comunicación, las pérdidas por difracción ocurren por el bloqueo de ondas secundarias tal que sólo una porción de la energía es difractada alrededor el obstáculo. Esto es, una obstrucción causa el bloqueo de la energía de alguna de las zonas de Fresnel. Por esto, solo una parte de la energía transmitida es alcanzada por el receptor. Dependiendo de la geometría de la obstrucción, la energía recibida es la suma de vectores de contribuciones de energía de todas las zonas de Fresnel no obstruidas.

Como se muestra en las figuras 13, 14 y 15, un obstáculo puede bloquear el camino de transmisión y una familia de elipsoides pueden ser construidas entre el transmisor y receptor. Los elipsoides representan las zonas de Fresnel y se puede observar que las zonas de Fresnel tienen una forma elíptica con la antena transmisora y receptora en sus extremos. En general, si una obstrucción no bloquea el volumen contenido en la primera zona de Fresnel, las pérdidas por difracción son mínimas y los efectos de difracción pueden ser cancelados.

Así la regla usada para el diseño de línea de vista para enlaces de microondas es que si al menos el 55% de la primera zona de Fresnel es librado, no se altera significativamente la pérdida por difracción.

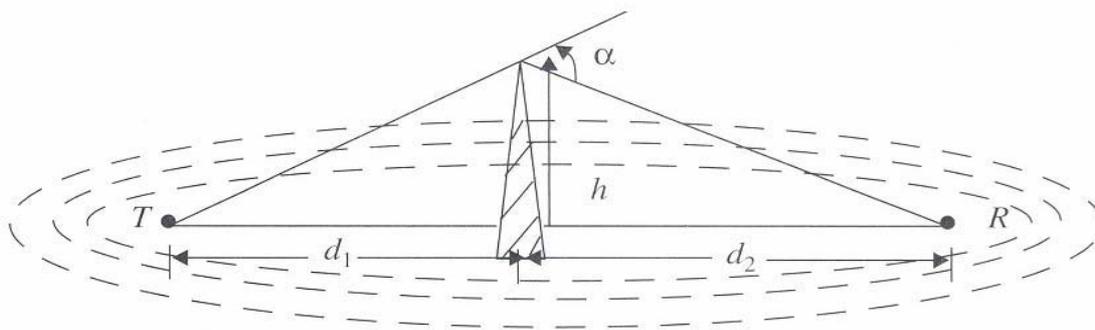


Figura 13: Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son positivas debido a que h es positiva¹³

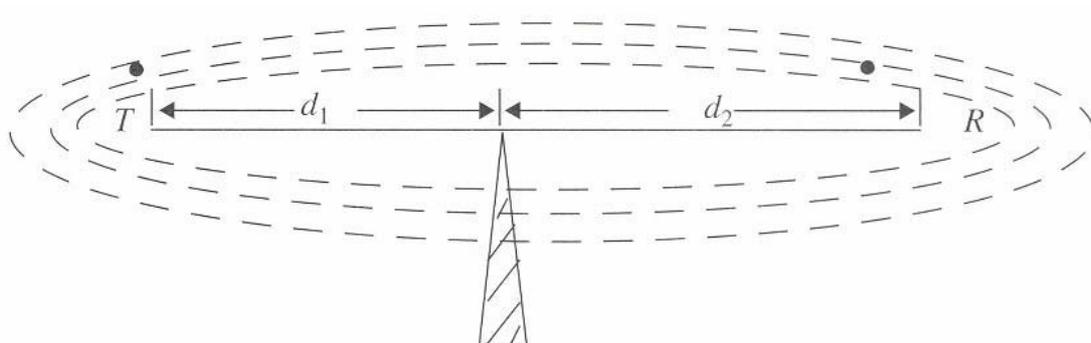


Figura 14: Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son cero debido a que h es cero.¹⁴

¹³ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 18

¹⁴ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 19

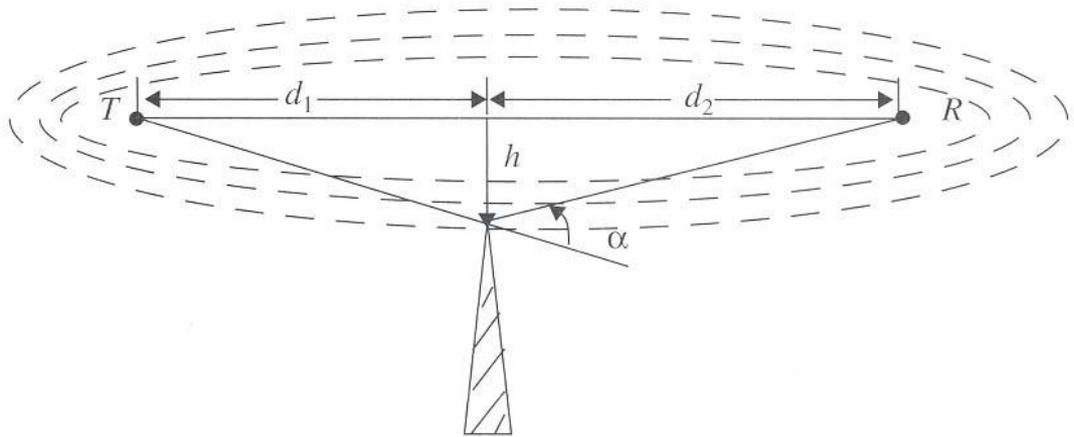


Figura 15: Ilustración de las zonas de Fresnel en diferentes posiciones del obstáculo en el que a y v son negativas debido a que h es negativa.¹⁵

3.4.2.3.2 Modelo de Difracción Knife-Edge

Estimando la atenuación de la señal causada por la difracción de las ondas de radio sobre colinas o edificios, es esencial predecir el campo en un área determinada. Generalmente, es imposible hacer cálculos exactos de las pérdidas por difracción y en la práctica la predicción es un proceso teórico de aproximación modificado por correcciones empíricas.

Para los cálculos por pérdidas por difracción sobre terrenos complejos e irregulares representa un problema matemático muy complejo, pero se han derivado expresiones por pérdidas por difracción para casos simples. Cuando la sombra es causada por un solo objeto como una colina o un edificio, la atenuación causada por la difracción puede ser estimada como difracción de knife edge. La pérdida por difracción puede ser calculada usando la solución clásica de Fresnel para el campo atrás del obstáculo.

¹⁵ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 20

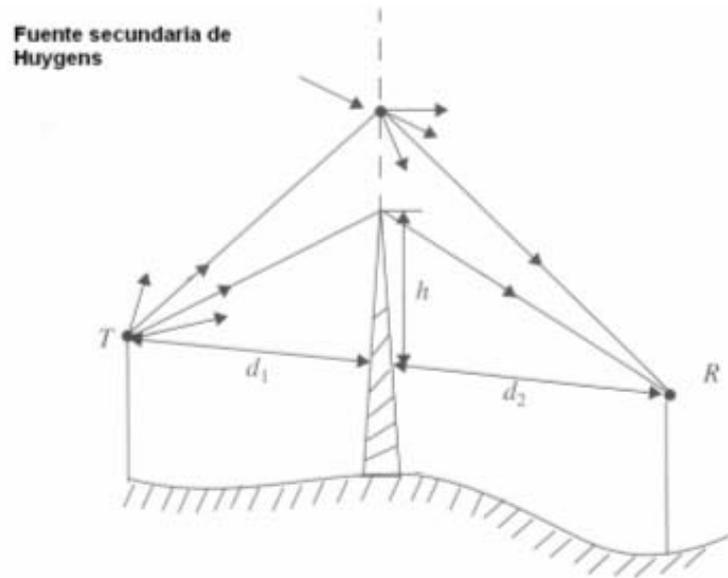


Figura 16: Ilustración de la geometría debida a la difracción de la punta del obstáculo en donde el receptor se encuentra en una región de sombra.¹⁶

Considerando el receptor en un punto R, localizado en la región de sombra también llamada zona de difracción, el campo directo en el punto R mostrado en la figura 16, es la suma de vectores de los campos debido a todas las fuentes secundarias de Huygens en el plano sobre la punta del obstáculo. El campo eléctrico E_d de la onda difractada por el obstáculo es dado por.

$$G_d(dB) = 20 \log |F(v)|$$

En la práctica, las soluciones graficas y numéricas son calculadas para obtener la ganancia de difracción. En la figura 17 se muestra una representación de cómo $G_d(dB)$ función de v . así también una solución aproximada para la ecuación anterior está dada por.

¹⁶ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 Ghz aproximadamente. Pag 21

$$\begin{aligned}
 G_a(dB) &= 0 & v &\leq -1 \\
 G_a(dB) &= 20 \log(0.5 - 0.62v) & -1 &\leq v \leq 0 \\
 G_a(dB) &= 20 \log(0.5 \exp(-0.95v)) & 0 &\leq v \leq 1 \\
 G_a(dB) &= 20 \log(0.4 - \sqrt{0.1184 - (0.38 - 0.1v)^2}) & 1 &\leq v \leq 2.4 \\
 G_a(dB) &= 20 \log\left(\frac{0.225}{v}\right) & v &> 2.4
 \end{aligned}$$

Donde

v = parámetro de difracción Fresnel-Kirchoff y esta dado por:

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

Donde

h = altura del obstáculo.

d_1 = es la distancia del transmisor al obstáculo.

d_2 = distancia entre el obstáculo y la antena receptora.

λ = longitud de onda.

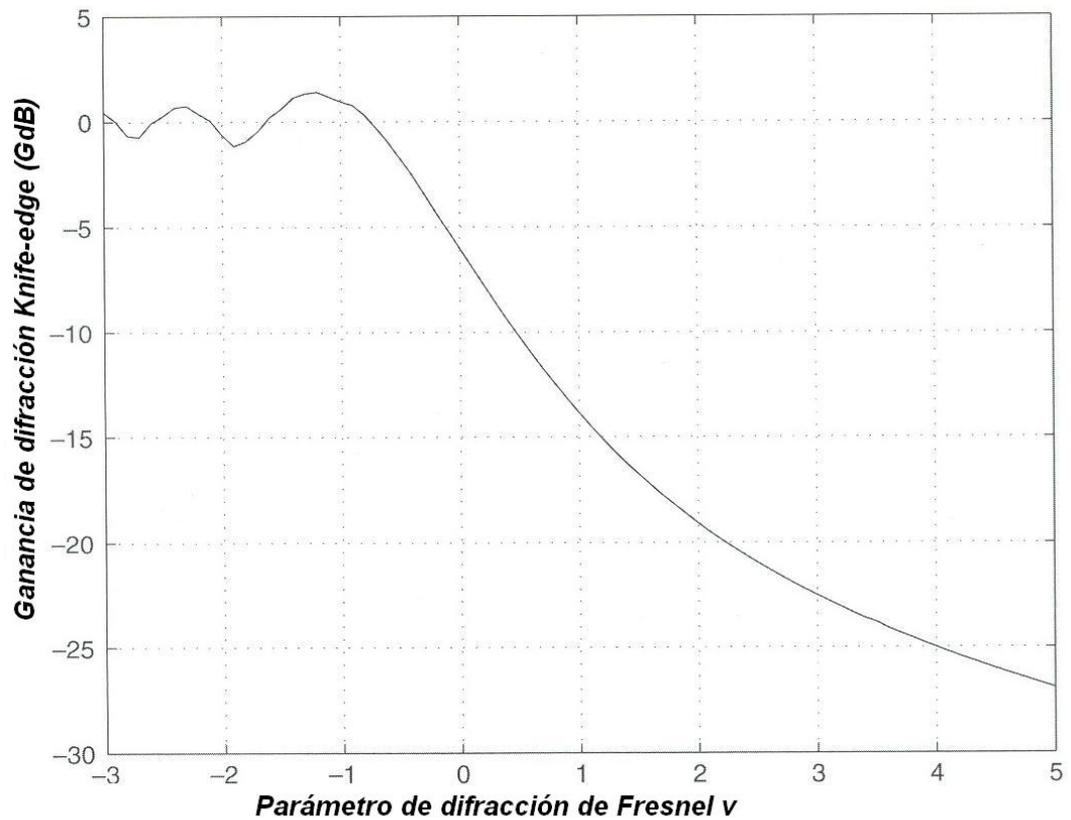


Figura 17: Representación Grafica de Gd(dB) como función de v^{17}

4 Implementación de Sistemas de Radio Enlaces Maximizando su MTBF

¹⁷ Recomendación UIT-R P.1410-4 Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente. Pag 21

A los efectos de cumplir con el objetivo propuesto en este proyecto de tesis, se realizara un análisis de las etapas de “Relevamiento”, “Diseño”, “Instalación” y “Mantenimiento” de un sistema de radio enlace, haciendo un breve repaso teórico en los puntos en donde sea necesario a los efectos de plantear o demostrar los pasos o recaudos necesarios para obtener una máxima disponibilidad en estos sistemas teniendo presente además, el ahorro de recursos por parte de la persona o empresa que utilice esta guía.

4.1 Etapa de Relevamiento

Antes de implementar un radio enlace, primero es necesario saber las características del entorno o ámbito que deben tenerse en cuenta.

En una primera instancia, es imprescindible hacer un correcto relevamiento de forma de poder contar con la mayor cantidad de información posible, esto nos permitirá tomar decisiones correctas en el diseño del sistema. Un error durante esta etapa podría ser crítico y tener como consecuencia un sistema mal dimensionado para la aplicación que fue requerida y ocasionar que la corrección de este error, en el peor caso, sea casi tan cara como el costo total de la implementación del sistema.

4.1.1 Relevamiento de las coordenadas de los extremos del Radio Enlace

Para comenzar es necesario contar con las coordenadas satelitales de ambos sitios, por lo que será necesario tener un dispositivo GPS que pueda tomar los puntos en ambas locaciones. Dentro del equipamiento GPS que podemos utilizar cabe destacar que si bien basta con tener las coordenadas de los sitios, hay dispositivos en el mercado más especializados o adecuados para este propósito. No es necesario contar con demasiada precisión, la mayoría de los dispositivos son capaces de brindar una precisión de entre 2 y 10 metros, pero si es interesante conocer el valor de la altura a la que nos encontramos en cada punto, mas adelante será necesaria para hacer el cálculo del radio enlace y si bien actualmente existen programas como “Google Earth” entre otros que pueden contar con esa información, nunca está de más asegurarse o contrastar esta información con la relevada por nosotros mismos con un dispositivo adecuado.

Otra funcionalidad interesante que algunos GPS poseen es el “Azimut”, esto es el ángulo de una dirección contado en el sentido de las agujas del reloj a partir del norte geográfico. El acimut de un punto hacia el este es de 90 grados y hacia el oeste es de 270 grados sexagesimales. El término azimut sólo se usa cuando se trata del norte geográfico. Cuando se empieza a contar a partir del norte magnético, se suele denominar rumbo o acimut magnético. En la geodesia o la topografía geodésica, el azimut sirve para determinar la orientación de un sistema de triangulación.

Esto resultara de mucha utilidad cuando en la etapa de “Instalación” del radio enlace sea necesario orientar las antenas, habiendo guardado los puntos en la memoria del GPS, contaremos con una orientación grafica similar a la de una brújula que además de marcar el norte, marcara la orientación o rumbo en el que se encuentra la antena hacia la que debemos orientarnos sirviendo como un mecanismo más para asegurarnos una correcta alineación de las antenas.

4.1.2 Condiciones Meteorológicas del Terreno

Es un detalle necesario considerar los factores meteorológicos del lugar en donde se implementara el sistema, si bien algunos de ellos en la mayoría de los casos suelen ser depreciables, como por ejemplo el caso de la lluvia, que si bien puede afectar en cierta medida las ondas electromagnéticas, ya que en un medio de transmisión dieléctrico como lo es la atmosfera, el agua de las gotas suele causar un efecto de “absorción” que a su vez es intensificado cuando la frecuencia aumenta por encima de los 10 Ghz, ya que es cuando la longitud de onda para estos casos se acerca al tamaño que las gotas de lluvia suelen tener. A pesar de esto resulta irrelevante considerar esta información en ese sentido, debido a que las frecuencias típicas de radio enlaces utilizadas no superan estos valores. Adicionalmente la mayoría de los equipos del mercado están preparados para soportar condiciones extremas y poco habituales.

De todas formas, no está de más observar la temperatura media del lugar, la humedad, si es una zona de vientos fuertes, etc.... ya que toda esta información nos será de utilidad en el momento

de elegir el equipamiento y al realizar el montaje del mismo como ya veremos más adelante en este análisis.

4.1.3 Características del Ambiente o Terreno

Con respecto al ambiente o terreno, es necesario hacer una distinción aparte en el relevamiento. Es importante no pasar por alto el paisaje en el que estará situado el Sistema de Radio Enlace.

Resulta una buena práctica, introducir las coordenadas tomadas anteriormente en algún software que permita visualizar las mismas en un mapa y estimando la trayectoria entre ambos puntos, identificar los puntos que a simple vista puedan representar una interferencia en la trayectoria del radio enlace, los cuales pueden ser: una agrupación de arboles de gran altura, una lomada, edificios o estructuras artificiales, etc. Es conveniente realizar un relevamiento visual de estos elementos, trasladándose al lugar mediante un vehículo u observándolos con equipamiento que permita una mejor inspección visual, como por ejemplo binoculares, ya que estos factores no aparecerán en mapas topográficos o información sobre los perfiles de terreno que podamos encontrar, por lo que es necesario identificar y cuantificar esta información para luego determinar si deberá ser tomada en cuenta en el momento de realizar el cálculo del radio enlace.

Por ejemplo: al término del relevamiento de las coordenadas en donde serán situadas las terminales de comunicación, podemos observar que hay una diferencia de 20 metros de altura entre ambos puntos, lo que sería favorable y tenido en cuenta en el momento de realizar el cálculo y diseño del sistema, pero se podría dar el caso de que hubiese una hilera de álamos en el contorno de una finca ubicada entre medio de ambos puntos del radio enlace que no tuvimos en cuenta y cuya elevación sea de más de 20 metros, o una lomada que justo se eleva y se encuentra dentro del radio de nuestra elipse de fresnel, esto sin duda podría afectar el rendimiento del radio enlace y en ciertos casos inclusive provocar un costo considerable si luego de que tenemos montadas las torres y el equipamiento, llegamos a la conclusión que es conveniente aumentar la altura de alguno de los

extremos por no haber previsto ese detalle anteriormente y encontrarnos con que el sistema no responde como lo planificamos.

4.1.4 Equipamiento Existente

Puede darse el caso de que el sistema a implementar sea para reemplazar uno existente por lo que podría contar con la infraestructura de un equipamiento anteriormente instalado o vaya a compartir la misma con un equipamiento que se encuentre en funcionamiento actualmente. Para estos casos es necesario evaluar algunos puntos en particular ya que fácilmente podrían pasar cosas por alto creyendo que están presentes o que cumplen con lo que van a requerir para su sistema.

4.1.4.1 Torres

Sin duda será necesario relevar la altura de las torres, esto deberá ser tenido en cuenta en el momento de realizar el cálculo del sistema, pero ese no es el único detalle que será conveniente observar en estos elementos, existen otros que no deben ser pasados por alto y ellos son:

- **Tensores:** En el caso de que la torre existente no sea auto soportada, deberá tenerse en cuenta el estado de estos elementos. Basta con observar a simple vista, con una mínima brisa, si la torre oscila o si los tensores están algo curvos, esto significa que la torre no ha recibido mantenimiento en un tiempo considerable y deberemos tener en cuenta en los costos de implementación, el tensado de las riendas de la torre por parte de personal idóneo para esta tarea. Una torre con tensores sueltos, realiza movimientos oscilatorios que en radio enlaces de altas frecuencias y a grandes distancias, puede perjudicar la calidad del enlace debido a que al incrementar la frecuencia, la dispersión de las ondas electromagnéticas disminuye y se vuelve más focalizada, haciéndola más vulnerable a este tipo de perturbaciones.
- **Cable de vida:** Si bien no hace al funcionamiento del sistema, resulta un elemento de seguridad con el que resulta necesario contar. Inclusive puede ser exigido por algún

cliente o empresa involucrada en el proyecto como un requisito. Por lo que en el caso de no encontrarse en alguna de las torres existentes, deberá considerarse su instalación.

- **Área de Emplazamiento:** Es necesario medir el área o al menos tomar conocimiento de las dimensiones que abarca la estructura de la torre contando sus anclajes y muertos de hormigón, teniendo en cuenta además las estructuras lindantes del terreno en que la misma se encuentra emplazada. Esto es importante porque durante la etapa de diseño podría resultar que del análisis y cálculo realizado se llegue a la conclusión de que sea necesario aumentar la altura de la torre existente para lograr un mejor despeje de la zona de elipse de Fresnel y si no hubo un relevamiento correcto de este elemento, se podrían producir costos no previstos que tengan como consecuencia un impacto severo en el presupuesto, ya que se podría dar el caso, que a la torre existente no se le puedan agregar tramos, ya que no habría espacio suficiente en el sitio actual para el despejo que requieren los nuevos anclajes. Esto tendría como resultado en el peor de los casos, la necesidad de desmontar todo el equipamiento con la torre incluida y emplazarlo en una ubicación que cumpla con lo requerido.
- **Accesorios:** Será necesario inspeccionar que las torres existentes cuenten con un sistema de pararrayos adecuado, con puesta a tierra a través de un cable de cobre conectado desde el mismo y un sistema de balizamiento nocturno

4.1.4.2 Alimentación

Será necesario, contar con una fuente de alimentación segura, es decir un sistema de alimentación con respaldo de baterías y protección contra variaciones en la tensión de alimentación, debido a que el equipamiento de comunicación suele ser muy sensible a este tipo de incidentes. Contando también con una puesta a tierra adecuada ya que al contar con elementos exteriores, como antenas y cableado de alimentación y de datos, se está expuesto a inducción de cargas externas que de no ser canalizadas pueden provocar un daño en parte o en la totalidad del equipamiento.

4.1.5 Barrido de Frecuencias o Análisis de Espectro

Resultara de utilidad, que durante la etapa de relevamiento se realice un análisis del espectro de radio frecuencias presentes en los puntos en donde se implementara el radio enlace. Este paso no es de mucha importancia si tenemos pensado utilizar equipamiento que trabaje con uso de frecuencias bajo licencias. Ya que debido a esto, no debería haber demasiada “contaminación” en él la frecuencia que utilice nuestro sistema. Por otro lado si deberemos dar la debida importancia a este factor si nuestro sistema trabajara en una frecuencia libre y no licenciada, como lo son las frecuencias bajo la denominación “ICM” (Aquellas reservadas para su uso en aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas) y que comprenden los siguientes rangos de frecuencias:

- 13.553-13.567 KHz (frecuencia central 13.560 KHz) .
- 26.957-27.283 KHz (frecuencia central 27.120 KHz).
- 40,66-40,70 MHz (frecuencia central 40,68 MHz).
- 902-928 MHz en la Región 2 (frecuencia central 915 MHz).
- 2.400-2.500 MHz (frecuencia central 2.450 MHz).
- 5.725-5.875 MHz (frecuencia central 5.800 MHz).
- 24-24,25 GHz (frecuencia central 24,125 GHz).

Por lo general los sistemas de Radio Enlaces que trabajan bajo alguna de las normas de la serie 802.11, lo hacen dentro del rango de frecuencias de 2.4 o 5.8. Por esto, si no realizamos un previo relevamiento del uso del espectro de radio frecuencia en las ubicaciones adonde se instalaran las terminales de comunicación, podemos encontrarnos con la situación de que al realizar la puesta en marcha del sistema detectemos que los valores de intensidad de señal se encuentran por debajo de lo estimado al haber realizado el cálculo inicial del enlace durante la etapa de diseño.

Esto se debe al incremento en el “Noise Floor” ocasionado por el solapamiento de radio frecuencia de otros sistemas con el nuestro. Esta situación es improbable en sistemas de radio enlaces que se encuentran en zonas poco pobladas pero sí lo es en zonas urbanizadas, pudiendo agravarse conforme aumentan el uso de frecuencias reduciendo la intensidad de la recepción señal

produciendo a su vez, una reducción en el Troughput o ancho de banda efectivo del enlace por lo que, si no se dejó un margen considerable de intensidad de señal (Al menos 23 dbm) y no se tuvo en cuenta cómo afectaría la reducción del ancho de banda en el caudal que se requiere transmitir, podríamos encontrarnos con que debemos reemplazar el equipamiento con todo lo que ello implica.

Por todas estas razones, es que resulta conveniente realizar un relevamiento de este tipo. El mismo puede ser realizado, en el caso de que sea para frecuencias “ISM” por una simple notebook con placa Wi-Fi incorporada o haciendo uso de un adaptador externo USB. Para ello se puede hacer uso del software llamado “wireshark” o “Netstumbler”, el mismo detectará las transmisiones en esos rangos de frecuencia y cuantificará las lecturas obtenidas (intensidad de señal, cantidad, etc..) pudiendo guardar un registro de la lectura para luego analizar la información obtenida.

Otra alternativa de bajo costo es el software “Airview” de la empresa “Ubiquiti”, el mismo viene integrado en el equipamiento de la empresa, este nos permitirá contar con indicaciones visuales mediante gráficos precisos que representan el uso de los canales comprendidos estos rangos de frecuencia.

Si nuestra intención es evaluar un rango de frecuencias licenciadas, deberemos utilizar equipamiento más costoso y específico, como lo puede ser un analizador de espectro profesional, pero como se mencionó, resulta innecesario para frecuencias licenciadas ya que no encontraremos interferencias para los mismos y en el caso de haberlas serían desestimables desde el punto de vista de la confiabilidad del sistema.

4.2 Etapa de Diseño

4.2.1 Selección del Equipamiento del Sistema de Radio Enlace

Una vez realizado el relevamiento, deberemos proceder a seleccionar la plataforma o equipamiento que implementaremos de acuerdo a las necesidades y requerimientos esperados del

sistema y las condiciones que tendrá su funcionamiento. Pero antes de ello, deberemos tomar en cuenta ciertos aspectos que harán a las ventajas y desventajas de la elección que realicemos.

4.2.1.1 Selección de Radio Frecuencia a Utilizar

Para realizar la elección de la frecuencia en la que implementaremos nuestro sistema de radio enlace deberemos tener en cuenta la información recolectada durante el relevamiento, como así también el comportamiento o características de las ondas electromagnéticas en función de su frecuencia.

4.2.1.1.1 Frecuencias Libres y Frecuencias de Uso Bajo Licencia

Uno de los principales puntos que deberán ponderarse en la elección de la radio frecuencia será el uso del espacio radio eléctrico relevado. En el caso de que el espectro de radio frecuencia de las bandas Libres se encuentre con poco uso, tendremos la posibilidad de hacer uso de estas frecuencias, las ventajas de ello son que las plataformas de sistemas de radio enlace que hacen uso de frecuencias libres y no licenciadas son por lo general menos costosas y más personalizables. Por lo que no tendremos que atarnos a una solución propietaria de la cual se contara menos información y soporte por parte de la empresa o al menos no por costos menores.

Como punto positivo de las frecuencias licenciadas podemos decir que el uso de ellas asegura en cierta forma que el canal usado no tendrá interferencias por parte de otro equipamiento que pueda estar transmitiendo en la zona en la que estará emplazado el nuestro. Pero hay que señalar que desde el punto de vista de la disponibilidad, no resulta mejor una opción que la otra, si el relevamiento fue correctamente hecho y se encuentra que no existe contaminación de otras transmisiones en las bandas libres, no hay razón por la cual no hacer uso de ellas. Por otro lado, si en el relevamiento este aspecto no fue tenido en cuenta, la contaminación en el espectro de frecuencia que hayamos seleccionado podrá tener como consecuencia un aumento en el valor de

“Noise Floor” de nuestro equipamiento lo que se traduce en una pérdida en la intensidad de la señal en uno o en ambos extremos del enlace.

4.2.1.1.2 Según la Topografía y Características del Terreno

En función de la topografía y características del terreno relevado, podemos mencionar los siguientes aspectos que están relacionados con la frecuencia de trabajo que seleccionemos para realizar nuestro enlace.

Es necesario destacar que no existe una frecuencia que resulte ideal para todos los escenarios o características que puedan presentarse, pero sí resulta importante observar que en un rango de frecuencias desde VHF (hasta 300 mhz) hasta UHF (hasta 900 Mhz) es posible establecer enlaces NLOS (non-line-of-sight) o “Sin Línea de Vista”. Esto se debe a que los rangos por debajo de las frecuencias de microondas tienden a tener más inmunidad frente a obstáculos entre los extremos de recepción y transmisión. Por otro lado, las frecuencias por encima de estos valores se ven más afectados por objetos dentro del campo de radiación y requieren una “línea de vista” para establecer un enlace exitoso conforme aumenta la frecuencia.(hacer referencia al marco teórico)

Otro fenómeno que se presenta conforme aumenta la frecuencia es el aumento en la atenuación que sufre la onda electromagnética en el espacio libre, es decir que ocurre un aumento en la pérdida de db por km, este factor puede y deberá ser tenido en cuenta en el momento de dimensionar el sistema por lo que no necesariamente puede considerarse como algo negativo. De hecho en ciertos casos resulta mejor considerar utilizar una frecuencia elevada (5,8 Ghz en adelante), ya que al aumentar la frecuencia, disminuye el radio de la elipse de fresnel, mejorando las condiciones de Línea de vista al aumentar el despeje de obstrucción para este radio.

En el caso de que al realizar el cálculo de un enlace para una frecuencia del rango de las microondas de digamos 2,4 Ghz, observemos que con la altura considerada de antenas logramos un despeje en su elipse de fresnel menor al 60% (lo mínimo recomendado). Por lo expuesto anteriormente tendremos 2 opciones, una será incrementar la altura de las torres y la otra recalculer el enlace teniendo en cuenta que al seleccionar una frecuencia mayor, se reducirá el radio de elipse

de fresnel mejorando el despeje obtenido para la misma. Adicionalmente podemos llegar a la conclusión de que otro beneficio que se obtendrá en la reducción de este valor es que para topografías de llanuras, reduciremos la posibilidad de atenuación por desvanecimiento de multitrayecto.

Como conclusión, desde el punto de vista de la disponibilidad, sea cual sea la frecuencia que se elija, es importante tomar conocimiento de las características o impacto que tendrá la elección de la misma en el comportamiento de las ondas electromagnéticas. Esto nos permitirá hacer uso de estas cualidades para nuestra ventaja de acuerdo al escenario con el que nos encontremos o en el caso de que no las tengamos en cuenta, podrán ser la causa de errores o fallas imprevistas que nos cueste diagnosticar y nos cueste aun más corregir dependiendo del caso y dependiendo de si lo detectamos antes o después de que el sistema fue instalado y puesto en marcha.

4.2.1.2 Necesidades del Canal de Información

Un punto importante a tener en cuenta para el diseño del sistema de comunicación, es que el mismo satisfaga las necesidades que son requeridas y estas pueden variar según el caso, cliente o proyecto. Por lo que es importante tener presentes las mismas ya que no basta solo con establecer un enlace sino que el mismo sea la solución que más se ajuste a lo requerido.

4.2.1.2.1 Cantidad de Información

Es necesario tener conocimiento de la cantidad y tipo de información que se requerirá transmitir. Si debemos transmitir un gran caudal de información, al seleccionar el equipo deberemos observar el ancho de banda que puede alcanzar, pero lo que es aun mas importante, debemos tener conocimiento de que el ancho de banda efectivo no necesariamente será el que el fabricante especifique ya que por lo general los sistemas de radio enlace realizan un modulación adaptativa, que de acuerdo a la tasa de error “BER” corrigen la modulación para evitar los errores excesivos y que el enlace no se interrumpa, esto es llamado comúnmente “Fallback”.

Por ejemplo, para un sistema que trabaje en norma 802.11g (hasta 54mbps), debido a un elevado Noise floor provocado por frecuencias transmitiendo en el mismo espectro de radio frecuencia de nuestro sistema, podemos tener un ancho de banda efectivo o “Throughput” de 11 Mbps. Por lo que si el objetivo del radio enlace era vincular redes LAN de diferentes ubicaciones y las mismas tendrán un tráfico considerable de acuerdo a los servicios comunes que son montados en este tipo de redes, tendremos un sistema de radio enlace que si bien establece una conexión, no cumple con el objetivo y presenta un pésimo desempeño.

4.2.1.2.2 Tipo de Información

Otra cualidad de la información que será transmitida y que deberemos tener en cuenta al momento de elegir la arquitectura o plataforma del radio enlace será el tipo de información que se requiere transmitir.

4.2.1.2.2.1 Nivel de Capa Física

Deberemos tener conocimiento del medio físico en el que transmitirán las interfaces del equipamiento que deberemos conectar con el sistema de radio enlace. Si el presupuesto del que disponemos nos da la posibilidad de implementar un equipamiento de arquitectura modular que soporte múltiples medios físicos, será necesario en el momento de definir el equipamiento tener en cuenta este factor y elegir la opción que más se ajuste a la necesidad de interfaces y medio físicos que necesitemos. De no tener en cuenta esto, en el momento de implementar el sistema deberemos implementar equipamiento intermedio entre el equipo que debemos comunicar y nuestro sistema de radio enlace (convertidores de puertos serie/fibra, Ethernet cobre/fibra, etc..) reduciendo la disponibilidad de nuestro sistema, ya que al introducir elementos en serie, la comunicación no solo dependerá del equipo de radio enlace, sino que de los dispositivos intermedios entre el mismo y el equipamiento que debemos comunicar, por lo que se reducirá el MTBF y hará nuestro sistema más vulnerable a fallas.

4.2.1.2.2.2 Nivel de Capa de Enlace

Si resulta que el tiempo de retardo de la información resulta crítico, como por ejemplo una señal de sincronismo de tiempo que debe ser transmitida a un equipamiento remoto y cuyo retardo por este tipo de señales, no debería ser mayor de 5 mseg. Para este caso, no bastara con establecer un vínculo exitoso de comunicación, ni siquiera bastara con tener un excelente nivel de señal recibida. Sino que se deberá considerar el método de acceso al medio que utiliza la información.

En un sistema Ethernet común, la información utiliza el método de acceso CSMA/CD y conforme el canal se encuentre ocupado, la información será puesta en colas de espera por lo general del tipo “FIFO”, si esta información de sincronismo de tiempo debe “competir” por el acceso al medio con otro tráfico de información, no se podrá garantizar los tiempos de latencia que tenga la red.

Para estos casos por ejemplo, será necesario tener en cuenta un equipo que realice una multiplicación de tiempo en la información, como lo son por ejemplo los sistemas de radio enlace PDH o SDH, los cuales al tener un contenedor de tamaño fijo y reservando “time slots” para cada porción de información, el acceso al medio para el dispositivo o el paquete de información se encuentra garantizado, por lo que el retardo en milisegundos es óptimo para aplicaciones que requieren de un valor mínimo para esto.

4.2.1.2.2.3 Nivel de Capa de Red y de Transporte

A nivel de Red y de Transporte, es decir que hablamos estrictamente de tráfico Ethernet que contendrá protocolos de capa 3 en adelante y para estos casos también será necesario considerar ciertos aspectos o funcionalidades que según el caso, resultan importantes a la hora de elegir la plataforma que utilizaremos.

Deberemos tener en cuenta, para el caso de que tengamos una red LAN mixta, con aplicaciones que requerirán conectarse hacia fuera de la misma a través del sistema de radio enlace.

El punto que deberemos tener en cuenta es la capacidad en la gestión o configuración de conexiones de capa 3 en adelante que deberá tener el dispositivo.

Por ejemplo, si en nuestra red viajaran información multimedia mixta, como Voz sobre IP y video de una cámara o un sistema de CCTV. Resultara necesario contar un equipo que pueda interpretar la información, clasificándola, para luego priorizar como serán tratados los distintos paquetes de información. Esta función, conocida como QOS, hará que los paquetes de Voz de una red, tengan prioridad de transmisión haciendo que la telefonía IP del lugar, no se escuche entre cortada. Dara algo menos de prioridad a las cámaras del sistema de seguridad, haciendo que puedan verse ciertos cuadros por segundo pero sin hacer dejar de lado que la red deberá transmitir los datos no multimedia que se requieran.

En el caso de no considerar este detalle o no encontrar una solución al momento de seleccionar nuestra plataforma, se podrá hacer uso de un dispositivo externo como un Gateway, Router o Servidor para filtrar o administrar el tráfico de información hacia el equipamiento de radio enlace.

4.2.1.3 Selección de las Antenas

Sin duda lo más importante de una antena o al menos lo principal en cuanto a su selección para un sistema de radio enlace resulta ser su frecuencia de trabajo y su ganancia (Dbi). La frecuencia de trabajo deberá ser del mismo rango que el de transmisión de nuestro equipo y la ganancia de la antena deberá ser igual o mayor a la obtenida del resultado de los cálculos de atenuación de nuestro enlace.

Pero estos 2 factores no son los únicos a considerar, existen otros factores que en ocasiones no son tenidos en cuenta y que pueden influir positiva o negativamente en nuestro radio enlace. A continuación se detallan los más relevantes:

4.2.1.3.1 Return Loss

Siendo el “Return Loss” el grado de adaptación de impedancia entre las cargas (línea de la salida del equipo transmisor y línea de la antena transmisora), tendremos que tener en cuenta los gráficos de curva de estos valores de la antena que seleccionemos, en ellos deberemos observar cuidadosamente los valores de pérdida de adaptación según la frecuencia de trabajo y cotejar esta información con la capacidad de elección del canal de frecuencia de nuestro equipo transmisor. Ya que podría darse el caso que nuestro equipamiento transmisor trabaje en un canal dentro del rango de frecuencias que seleccionamos que para las antenas seleccionadas no resulte adecuado y si no tuvimos en cuenta este factor podríamos encontrarnos con un sistema ya implementado que no responde o no tiene el desempeño estimado en el cálculo de enlace.

Por esta razón es que, desde luego, se recomienda además que para un enlace punto a punto, que las antenas en ambos extremos de la comunicación sean del mismo modelo y fabricante.

4.2.1.3.2 Según la Arquitectura de Red

Según la topología o arquitectura que vaya a tener nuestra red deberemos tener en cuenta los ángulos de apertura de irradiación de las antenas que seleccionemos.

Si la arquitectura de nuestra red será Punto-Multipunto, deberemos considerar seleccionar antenas cuyo ángulo de dispersión de irradiación sea amplio de forma de lograr cubrir efectivamente la mayor área posible, es decir a partir de 60° en adelante, pudiendo algunos modelos alcanzar los 120° grados inclusive. Este tipo de antenas, denominadas antenas panel resulta la mejor opción para estos casos. No así, las antenas omnidireccionales, ya que su radiación no suele ser efectiva en los 360° y por lo general su componente vertical de radiación tiene un ángulo reducido, si nuestra intención es cubrir un rango de 360° horizontales, la mejor solución no es utilizar una antena omnidireccional sino implementar un celda de transmisión compuesta por múltiples antenas sectoriales, cada una cubriendo una arista y configuradas en bandas contiguas pero cuidando de que no exista solapamiento entre las mismas.

Si nuestra red tendrá una topología Punto-a-Punto. La mejor opción será una antena grillada o parabólica, estas antenas irradian en un ángulo más estrecho, concentrando el haz de radiación, de esta forma se aprovecha mejor la energía irradiada en este tipo de topología.

4.2.1.3.3 Según sus Características Constructivas

Con menor importancia, pero no desestimable, se debe tener en cuenta las características constructivas que la antena seleccionada posea.

Por ejemplo, deberemos observar en la ficha de datos técnicos que la antena soporte las características del clima relevadas, como pueden ser fuertes vientos, o temperaturas extremas. En el caso de las bajas temperaturas, algunas antenas suelen tener protectores del tipo Radomo para protegerla del congelamiento, granizo y demás condiciones adversas.

Otro aspecto a tener en cuenta para el momento de instalación de la misma será que el diseño de su anclaje permita una orientación cómoda, de forma de no tener dificultad en este punto durante el montaje.

4.2.1.4 Funcionalidades del Hardware

En cuanto al hardware, desde luego que la plataforma elegida deberá tener la capacidad de transmisión en la frecuencia elegida y que fue tomada en cuenta durante el cálculo del enlace con una respectiva potencia, contar con los puertos físicos de comunicación requeridos, la sensibilidad de recepción necesaria, etc..

Pero además de todas estas características que deberán ser de acuerdo a lo expuesto en esta guía. Existen cualidades más allá de estas, que contribuyen a mejorar la disponibilidad de un sistema de radio enlace, las cuales se mencionan brevemente a continuación:

4.2.1.4.1 Watchdog

Esta funcionalidad la encontraremos disponible tanto en hardware como en software, consiste en la implementación de un sistema de vigilancia constante sobre el estado de funcionamiento del dispositivo, en el caso de una falla, reaccionara reiniciando el sistema para intentar restablecer la condición de funcionamiento correcto.

4.2.1.4.2 Diversidad

Las técnicas de diversidad consisten en enviar o transmitir la información por dos caminos radioeléctricos diferentes, permitiendo mitigar las interferencias o pérdidas en la señal y mejorar la calidad de la señal recibida, aumentando la relación señal/ruido y reduciendo el VER, contrarrestando las perdidas por desvanecimiento plano o selectivo.

4.2.1.4.2.1 Diversidad en Espacio

Consiste en un sistema duplicado de recepción o emisión. La salida de un equipo transmisor en el cual se montan 2 antenas separadas por una distancia de unas decenas de veces la longitud de onda de la frecuencia de trabajo del sistema. El sistema recibe ambas señales, las compara y conversa la optima.

4.2.1.4.2.2 Diversidad en Frecuencia

Consiste en modular dos radio frecuencias en distintas portadoras con la misma información, transmitiéndolas hacia un mismo receptor. En el destino, se desmodulan ambas portadoras y la que produzca la señal de mejor calidad, es la que se selecciona. Ya que el desvanecimiento selectivo se

produce en mayor medida para algunos rangos de frecuencia que otro. El sistema conmuta alternando entre los receptores según lo necesite.

4.2.1.4.2.3 Diversidad Mixta

Es la combinación de diversidad en espacio y en frecuencia, se hace uso de 2 antenas, 2 transmisores y 2 receptores por cada extremo de la comunicación.

4.2.1.4.2.4 Diversidad de Polarización

En la diversidad por polarización, consiste de una sola portadora de radio frecuencia que se propaga con 2 polarizaciones electromagnéticas diferentes, vertical y horizontal. Las ondas electromagnéticas de distintas polarizaciones no necesariamente están sometidas a las mismas degradaciones de transmisión. La diversidad de polarización se usa en general junto con la diversidad espacial, en la que cada antena se polariza de forma de diferente en cada extremo de la comunicación.

4.2.1.4.3 Redundancia a Nivel de Hardware

Dependiendo de la plataforma. Podremos dimensionarla con la capacidad de módulos redundantes a nivel de hardware. Esta redundancia en hardware por lo general la encontraremos disponible para aquellas plataformas de arquitecturas modulares y viene disponible para los módulos de alimentación del equipo, de procesamiento y de entradas o canales de transmisión.

Los esquemas de redundancia por lo general suelen ser de 2 tipos

Hot-standby

En este esquema de redundancia, uno de los componentes se encuentra activo y el redundante se encuentra desactivado hasta el momento de producirse una falla en el activo.

1+1

En este esquema, ambos componentes se encuentran activos y funcionando. Una función de orden superior en el equipamiento conmuta de acuerdo a la fiabilidad del funcionamiento de uno u otro componente

4.2.1.4.4 Registro de Eventos o Log

Si bien es difícil de conocer este aspecto del equipo previamente a la selección del mismo. Cabe señalar la importancia de que el equipo cuente con la capacidad de registrar no solo los eventos transcurridos, sino que lo haga de forma detallada y con la capacidad de no perder el mismo ante una interrupción en la alimentación del equipamiento. Esto será de gran ayuda en el momento de diagnosticar y corregir fallas que pudiesen haber durante el funcionamiento del sistema, por lo que si el sistema solo registra un evento básico como “error de transmisión” y no cuenta tampoco con una memoria no volátil para su registro, no contaremos con una importante herramienta de diagnóstico.

4.2.1.4.5 Personalización

El grado de especificación que podamos alcanzar en los parámetros de configuración con el que cuente una plataforma, sin duda será un punto extra dentro las cualidades que podemos querer en nuestro equipamiento. Un cambio de un parámetro que podrá parecer minúsculo, puede tener un impacto mayor en nuestro sistema e inclusive en muchas ocasiones corregir un error imprevisto durante la implementación del sistema o un error durante la operación habitual del mismo.

Lamentablemente, es difícil tener conocimiento de este aspecto, previo a la adquisición del equipo. Una forma de evaluar este aspecto, es obteniendo un manual del sistema o equipamiento previo a su adquisición.

4.2.1.4.6 Contactos Auxiliares

Algunos equipamientos permiten señalar estados de mal funcionamiento mediante alarmas por contacto seco. Estas alarmas, según el equipo, podrán ser personalizables para una variedad de escenarios, como por ejemplo que sean activadas ante una falla en alguna de las alimentaciones, una falla de comunicación o fallas en alguno de los puertos o canales tributarios de información.

Esto será de utilidad ya que podrá conectarse esta lógica de contacto a sistemas de indicación que van desde sirenas o señales lumínicas, hasta entradas lógicas de un controlador el cual presentara esta información a través de una pantalla HMI o interfaz de SCADA a un operador para notificarle que el equipo se encuentra en situación de falla.

4.2.1.4.7 MTBF

Este valor generalmente esta especificado en la hoja de datos técnicos del fabricante del producto, resulta conveniente observar y comparar este ítem entre los productos considerados para la elección correcta de nuestro sistema de Radio Enlace.

4.2.1.4.8 Esquema de Modulación

Puede suceder, que en el momento de establecer el enlace, los niveles de señal no sean los esperados. Habiendo considerado en el momento de realizar el cálculo, un margen de potencia de señal aceptable, ante la situación de que en la práctica los valores no sean iguales a lo previsto, obtendremos un enlace exitoso, sin embargo, según el caso, esto podría ser suficiente.

Si nuestro radio enlace debía transmitir un caudal de información considerable. Tendremos entonces un problema si al haberse establecido el enlace, en vez de el ancho de banda requerido, tenemos un ancho de banda efectivo de la mitad. Esto podría provocar que luego de un diagnostico,

detectemos esto y nos demos cuenta de que deberemos implementar otro radio enlace para duplicar el ancho de banda, o aun peor, con todos los costos que ello implicaría llegamos a la conclusión de que si se hubiese previsto esto, hubiese sido mejor implementar otra solución completamente diferente desde el inicio. Por lo que resulta importante no pasar por alto el esquema de modulación / intensidad de señal que indica el equipamiento en su hoja de datos técnicos. En él, encontraremos el esquema de modulación activo que obtendremos según las distintas intensidades de señal que se obtengan en el receptor del equipo, por lo que podremos y deberemos estimar para el caso de valores de intensidad menores a lo esperado, como impactara esto en nuestro throughput.

4.2.1.5 Calculo del Enlace

No es el objetivo de esta tesis, repasar los métodos de cálculo de radio enlaces. Pero si sería correcto resaltar los recaudos o recomendaciones a tener en cuenta para el mismo.

4.2.1.5.1 Pérdidas en Cables y Conectores

Un error que se suele cometer es no tomar en consideración las perdidas en los cables y conectores de la instalación del sistema. Cabe recordar que una pérdida de 3db en alguna parte del sistema, equivale a perder el 50% de la intensidad de señal, por lo que en el momento de realizar el cálculo, se deberán considerar estos valores de acuerdo a las especificaciones en los “datasheet” de los materiales y productos elegidos.

4.2.1.5.2 Margen de Intensidad de Señal

Las variables y factores que influyen en el funcionamiento de un sistema de radio enlace, suelen sufrir modificaciones en el tiempo. Estos factores pueden ser de distinta índole, por ejemplo:

- Los cambios climatológicos como las tempestades o temporadas de lluvias, las cuales pueden afectar momentáneamente la intensidad de la señal, en mayor o menor medida dependiendo también de las características del mismo.
- Los cambios estacionales: puede resultar que al pasar de otoño a primavera, las difracciones ocasionadas por el incremento en el follaje de una zona incida sobre la intensidad de las ondas electromagnéticas de nuestro sistema.
- Cambios artificiales: nuevas estructuras edilicias construidas por el hombre, equipamientos o sistemas adyacentes que causen interferencia, etc....
- Desvanecimientos aleatorios ocasionados por reflexiones o refracciones.

Por estos casos y otros que puedan surgir y resulten imprevistos. Es recomendable considerar un margen entre el nivel de señal estipulado y el límite de sensibilidad de recepción para el equipamiento seleccionado de al menos 20 db en adelante.

4.2.1.5.3 Despeje en la Elipse de Fresnel

De acuerdo a los estudios realizados, se expone que para la obtención de un radio enlace en el rango de frecuencia de microondas, que requiere “línea de vista”. A partir de la obtención de un 80% de despeje sin obstrucción en el radio de la elipse de fresnel se obtiene un radio enlace exitoso.

Si bien esta afirmación es correcta, es recomendable desde el punto de vista de maximizar la disponibilidad de un sistema de radio enlace. Minimizar las difracciones y absorciones de las ondas electromagnéticas que puedan ser provocadas por obstrucciones. Por lo que se recomienda para dicho objetivo, considerar en el momento de realizar los cálculos para el radio enlace, las alturas necesarias en ambos extremos de forma de obtener un despeje total de obstrucciones dentro del radio de la elipse de fresnel.

4.3 Etapa de Implementación

Habiendo realizado un relevamiento detallado de acuerdo a lo recomendado y, luego elegir la plataforma o sistema que cumple lo requerido desde el punto de vista de la solución a brindar y en su configuración menos propensa a fallas, llegara la etapa de proceder a la implementación del mismo.

A continuación se brindaran algunas recomendaciones para una exitosa implementación del sistema.

4.3.1 Montaje

Las fallas ocasionadas por un mal montaje de nuestro sistema, son que aquellas que por la general se encuentran entre las más difíciles de identificar en el momento de intentar dar solución a un funcionamiento errático o inesperado en el sistema. Por lo que resulta conveniente, tomar todos los recaudos posibles, de forma de minimizar estas perturbaciones.

4.3.1.1 Elección del Cableado y su Correcta instalación

4.3.1.1.1 Cableado Coaxil

El cableado seleccionado durante la instalación del equipamiento y su montaje son de gran importancia. Un error que suele cometerse en este punto es utilizar un cableado coaxil (para los sistemas que no utilicen un método de guía de onda para la conexión entre el transmisor y la antena) en el tramo entre el equipo transmisor con la antena que solo cumpla con la impedancia adecuada según lo especificado por el fabricante en función de la frecuencia de trabajo elegida, dejando de lado, el hecho de que la aplicación para la cual ese cable en particular fue fabricado, podría no ser la misma que nosotros le estamos dando.

Actualmente existen cables coaxiales en el mercado que independientemente de su impedancia, vienen optimizados para frecuencias de trabajo muy variadas, según diferentes aplicaciones para las cuales podrían ser destinados como por ejemplo: transmisión de señales de GPS, transmisión de datos a través de una red LAN, entre otros. Por lo que deberemos observar las especificaciones técnicas del mismo, asegurándonos de que los valores de atenuación para el rango de frecuencia de trabajo elegido, sean de acuerdo a lo calculado.

De la misma forma, deberemos seleccionar conectores de la mejor calidad posible, asegurándonos que sean adecuados para el montaje en el cableado seleccionado, ya que existen conectores cuyo encastre o acople, se encuentra optimizado para el grosor y tipo de cable que hayamos seleccionado. Haciendo uso de un conector inadecuado, podremos realizar una conexión entre el cable y los terminales, pero en una instancia posterior podría ocurrir un deslizamiento del conector o un contacto entre el mallado y el núcleo del cable, ocasionando un funcionamiento erróneo en el sistema. Además deberemos considerar en el caso de que realicemos el armado de los cables, la distancia que necesitaremos. Por ello, nuestra ODU (Out-Door-Unit) o transmisor, dependiendo del equipo, deberá ser montado a una distancia en lo posible de no más de 50 cm de la antena, ya que esta distancia deberá ser la menor posible de forma de perder el mínimo de intensidad de señal antes de ser transmitida por la antena.

Finalmente deberemos impermeabilizar los conectores haciendo uso de alguna cinta autosoldante o aislante, ya que de no hacerlo, con el tiempo experimentaremos una pérdida en la intensidad de la señal de debido a la corrosión de estos elementos.

4.3.1.1.2 Cableado Estructurado de Red

En cuanto al cableado UTP, si bien utilizando prácticamente cualquier tipo de cableado estructurado vigente en el mercado lograremos comunicarnos. Cabe señalar que sería un error subestimar este elemento. Un error frecuente que sucede en el momento de la instalación es la mala elección del cableado a utilizar (no solo el cableado coaxil como fue expuesto anteriormente) por desconocimiento de las pequeñas diferencias entre las clases que existen disponibles en el mercado.

Para el cableado utp en una instalación de comunicaciones, ya sea para interior o exteriores, deberemos hacer uso de un cableado UTP cat6, STP o FTP, estos cables contienen una malla conductora alrededor de los pares trenzados en su interior, lo que aumenta la inmunidad a la interferencia o inducción de cargas parasitas en el cableado, minimizando las perturbaciones al sistema. Además tienen la cualidad de contar con protección contra los rayos UV, lo cual suele ser una falla común ya que al instalar este cableado en la intemperie, dependiendo de la exposición que el mismo tenga, de no ser apto para este medio, su vaina protectora se reseca y destruirá dejando expuestos los pares trenzados los cuales posteriormente cederán también causando una falla en la comunicación.

En cuanto a los conectores del cableado estructurado, deberemos utilizar en lo posible conectores Categoría 6 o blindados, estos conectores deberán ser crimpeados al cable haciendo contacto con el conductor externo de la vaina. Esto permitirá tener una línea de transmisión desbalanceada la cual descargara los excedentes a través del chasis del equipamiento el cual a su vez deberá tener conexión a tierra.

Por último, ya sea que el cableado UTP se use no solo para la transmisión de información sino que para alimentar equipamiento para los equipos que soporten la norma POE (Power Over Ethernet), no se deberá olvidar que las normas de tendido de cableado estructurado, especifican que la distancia entre puntos de una red UTP, no deberá superar los 100 metros de distancia.

4.3.1.2 Instalación Eléctrica

Para la Instalación eléctrica del equipamiento, más allá de que se deberán tomar los recaudos necesarios, es decir una instalación eléctrica correctamente dimensionada, con protecciones eléctricas ante cortocircuitos.

Se deberá contar con alimentación segura, mediante un sistema de respaldo de baterías. Además será fundamental una correcta puesta a tierra según las normas para este tipo de instalaciones y lo recomendado por el fabricante del equipamiento.

Todo el equipamiento deberá estar conectado a tierra según lo especificado en la documentación de los mismos, ya que el equipamiento de telecomunicaciones suele ser extremadamente sensible a perturbaciones de este tipo. Variaciones en la tensión de alimentación pueden provocar pérdidas de enlace momentáneo o errores en la modulación.

4.3.1.3 Alineación de Antenas

En cuanto a la alineación de antenas, veremos que el haber realizado una minuciosa y correcta tarea durante la etapa de relevamiento y el interpretar correctamente la misma para utilizar el criterio correcto durante la etapa de diseño dará sin duda sus frutos.

Para una correcta alineación de antenas, primero deberemos contar con las condiciones adecuadas para realizar dicha tarea, de forma tal que la persona que suba a la torre, pueda trabajar cómoda y correctamente. De no ser así, nunca tendremos la certeza de que la intensidad de señal obtenida fue la óptima de acuerdo a la mejor alineación posible de obtener.

4.3.1.3.1 Condiciones Meteorológicas

En una primera instancia deberemos tener en cuenta las condiciones meteorológicas relevadas previamente y las actuales de forma de planificar los trabajos de acuerdo a ello. Ya que pudiese darse el caso por ejemplo, de que la zona donde estará emplazada la torre sea una zona de grandes vientos aleatorios y que fruto de los relevamientos podríamos saber con un gran porcentaje de certeza que estos suelen incrementarse luego del medio día, por lo que será conveniente una planificación de trabajos de forma de aprovechar al máximo el tiempo disponible para trabajar cómodamente y previendo los tiempos de cada trabajo de forma de no incurrir en demoras o lo que es peor, un trabajo mal realizado.

4.3.1.3.2 Metodología para el Alineamiento

Previo a este paso, será necesario contar con todo el equipamiento debidamente instalado y conexionado, además, deberemos haber realizado la configuración mínima necesaria de forma de poder establecer el enlace (ambos equipos deberán encontrarse en el mismo canal, las direcciones lógicas deberán ser compatibles y la potencia deberá ser configurada en el valor que fue tenido en cuenta en el cálculo de factibilidad realizado), de lo contrario no se detectarían variaciones de intensidad de señal que es lo que necesitaremos para realizar esta tarea.

En primer lugar, es conveniente contar con comunicación constante con el torrista o persona encargada de alinear la torre, por lo que resultara imprescindible contar con algún “Handy” o “Radio” para comunicar el estado de señal y/o dar indicaciones.

Una persona con conocimientos sobre el sistema deberá enlazar su notebook al equipo de radio enlace de forma de chequear los niveles de señal obtenidos en tiempo real.

Si el equipo cuenta con un terminal BNC o Coaxil para medir valores de tensión a través del mismo, será necesario capacitar e instruir a la persona que alineara la antena, siendo mejor aún, si podemos instruirlo con el equipamiento previo a su montaje en la torre. Debido a que el deberá trabajar en altura solo, por lo que será conveniente que sea instruido apropiadamente.

Teniendo en cuenta los puntos o coordenadas relevadas anteriormente mediante el uso de un GPS y si en lo posible contamos con un equipo de GPS capaz de indicar la dirección de un punto mediante una orientación cardinal haciendo uso del “Azimut” interno.

De contar además con equipos de visibilidad lejana como Binoculares, será un beneficio extra. El torrista, una vez a la altura en donde se encuentra la antena, podrá observar y tener una noción visual del punto hacia donde se deberá apuntar. (si recordamos, al trabajar con radio enlaces del rango de frecuencia de microondas, deberemos contar con “línea de vista” para un vínculo exitoso, por lo que debería poderse visualizar el nodo distante)

Un buen equipamiento de arnés, el torrista deberá contar con un equipo de seguridad adecuado para la aplicación que se requerirá, el mismo, deberá encontrarse en buenas condiciones y no haber alcanzado su fecha de caducidad.

La mejor forma es hacer el proceso en 3 partes. Primero, el torrista subirá la torre y haciendo uso del GPS y/o Binoculares, deberá proceder a orientar la antena en la dirección adecuada.

Una persona en tierra, estará enlazada al software del equipamiento mediante una notebook, el torrista comenzara a orientar lateralmente la antena, observando los valores obtenidos en el voltímetro o en los indicadores de LED, si el equipo tuviese. Primero se deberá hacer una orientación rápida rotando horizontalmente la antena hacia un lado hasta casi perder todo valor de señal y luego hacia el otro, esto servirá para de determinar el punto medio o centro en el que se detecte el pico de intensidad de señal.

El operador en tierra, deberá tener presente el valor pico de intensidad de señal alcanzado que fue observado en el software, ya que el estará en una posición más cómoda que el torrista y al tener acceso al sistema deberá contar con información más precisa que este. Contando con dicho valor, el operador deberá dar instrucciones por radio al torrista, el cual ahora deberá rotar lenta y precisamente la antena de forma horizontal. Este proceso se deberá realizar hasta encontrar el valor máximo alcanzado.

Para la segunda etapa de la alineación, se concurrirá al nodo ubicado en el otro extremo del enlace. Repitiendo el proceso anterior, primero se alineara horizontalmente de forma rápida con el objetivo de encontrar en forma breve el punto máximo aparente de intensidad de señal logrado, luego se realizara un alineamiento fino coordinado siempre por radio. Una vez obtenido el mejor valor posible, ahora se podrá intentar ajustar el ángulo de inclinación de la antena, este ángulo solo se deberá ajustar en casos en que haya una diferencia de altura de más de 10 grados entre ambos puntos y deberá hacerse con la mayor lentitud y precisión posible, ya que una mínima variación tendrá un gran impacto en los niveles de intensidad de señal obtenidos.

Finalmente, se deberá realizar un tercer y último alineamiento en el nodo inicial, repitiendo el proceso descrito anteriormente con la finalidad de asegurar el perfecto alineamiento posible.

Si al concluir este proceso no obtenemos los valores de intensidad de señal deseados y habiendo realizado un correcto trabajo, es decir, un correcto relevamiento, posteriormente un diseño basado en la información obtenida de los relevamientos y las necesidades requeridas por parte del sistema, realizando un trabajo metódico, planificado y con las herramientas adecuadas. Entonces muy probablemente la diferencia se deba a algún parámetro de configuración del equipamiento que sea necesario alterar, por lo que no resultara efectivo continuar con la alineación de antenas, se deberá dejar las mismas en el mayor valor de intensidad de señal obtenido y se deberá proceder a ver el software del equipamiento.

4.3.2 Configuración

Una vez concluida la alineación de las antenas y habiendo establecido un enlace exitoso entre los equipos que componen el sistema de radio enlace, deberemos realizar una configuración o puesta a punto del sistema de forma más detallada. A continuación se describirán aquellos parámetros y/o procedimientos que resultan comunes o generales en la configuración de sistemas de este tipo y que son relevantes para lograr maximizar la confiabilidad de nuestro sistema.

4.3.2.1 ACK

Este valor, suele encontrarse en sistemas que utilizan tráfico ip principalmente, corresponde al tiempo de espera que el receptor mantiene hasta solicitar nuevamente el reenvío de un paquete de información. Este indicador varía en ms (milisegundos) de acuerdo a la distancia de nuestro enlace, dado por el retardo o tiempo que demora una onda electromagnética atravesar el espacio. Este indicador, si estuviese la posibilidad de configurarlo, deberá estar en modo “automático” o en su defecto, en el caso de que nos lo permita, ajustarlo en función de la demora conocida producto de la distancia entre los puntos del enlace.

Si este parámetro se encuentra erróneamente configurado, tendremos pérdidas aleatorias en los paquetes de información y un aumento en la latencia de la red producido por el incremento en peticiones de reenvío de paquetes.

4.3.2.2 Fallback Automático

Es un mecanismo de cambio de dinámico del esquema de modulación que utilice el sistema. En el caso de estar configurado en forma automática, el sistema erigirá en función del BER (bit error rate o tasa de bits erróneos) el esquema de modulación más alto posible que resulte con una tasa de bits erróneos aceptable, esta selección será variable en el tiempo conforme existan variables que afecten positiva o negativamente la calidad de nuestro enlace. Obteniendo de esta forma la mayor velocidad de transmisión de datos posible en nuestro sistema de radio enlace.

En el caso de no estar activado este sistema o de no contar con esta funcionalidad en nuestro equipamiento, deberemos realizar pruebas de transmisión de forma de poder determinar la tasa de bits erróneos de acuerdo al esquema de modulación o velocidad que haya sido configurada manualmente. Por lo que haciendo uso del comando ping, de algún software de análisis de red o de algún hardware generador de tráfico, deberemos medir este índice de bits erróneos e ir observando cómo varía de acuerdo como se fije la velocidad de nuestro sistema.

Un error común que suele suceder durante la configuración de un sistema de radio enlace, es configurar de forma fija un ancho de banda en particular, desconociendo los parámetros de calidad del enlace establecido. Una velocidad más alta de la que es posible alcanzar, hará que la transmisión tenga un alto porcentaje de bits erróneos lo que ocasionara que el sistema tenga interrupciones y/o pérdidas en el enlace de forma aleatoria ya que de acuerdo a los valores de intensidad de señal con el que se haya establecido el enlace, será el esquema de modulación adecuado para el mismo en esa situación en particular.

Una buena práctica en los casos en los que se cuente con un holgado ancho de banda para la aplicación que nuestro sistema requiere. Es ajustar de forma manual un esquema de modulación que

se encuentre por debajo del seleccionado de forma automática por el sistema, ya que, por lo general los sistemas intentan buscar el más alto esquema de modulación, sacrificando la mayor cantidad posible de bits acertados. Por lo que seleccionando esquemas de modulación inferiores, aumentaremos la confiabilidad de nuestra transmisión.

4.3.2.3 Ancho del Espectro del Canal

Algunas plataformas, permiten seleccionar el ancho de banda del en los que se divide el espectro. La reducción del ancho del espectro, hará al sistema más inmune a los solapamientos de frecuencia y más apto para largas distancias. Pero tendrá la desventaja de impactar negativamente en la velocidad de transmisión por lo que se deberá observar si la aplicación para la cual está siendo usado, puede o no permitirse una reducción en el ancho de banda del mismo.

4.3.2.4 Barrido de Espectro y Selección del Canal

En la mayoría de los sistemas encontraremos una función en el software que permitirá hacer un scan en el espectro de frecuencia de trabajo del mismo. Esto será útil para observar y detectar el uso del espacio de radio frecuencia actual. De esta forma será conveniente ajustar el canal de transmisión al que menor ruido u ocupación presente, esto aumentara la calidad del enlace reduciendo el valor del Noise Floor del mismo.

4.3.2.5 Polaridad de Antena

Algunos sistemas de radio enlace tienen la posibilidad de seleccionar la polaridad de la transmisión por software. Ya sea que seleccionemos una polarización vertical u horizontal, no es posible decir que una sea mejor que la otra para todos los casos, ya que dependerá de múltiples factores como la topología del terreno, vegetación, ondas electromagnéticas dentro del mismo espacio de radio frecuencia, entre otros. Por lo que la forma de elegir la mejor opción será seleccionando cada una y observando cómo varían los indicadores que demuestran la calidad de

nuestro enlace para luego poder seleccionar aquella polarización que demuestre una mejora en los mismos.

4.3.2.6 Watchdog

De contar con esta opción, será muy importante asegurarnos de que la misma se encuentre activa. Algunos sistemas permitirán configurar en detalle el funcionamiento de esta característica, mas allá de lo que podremos especificar en su funcionamiento, bastara con que pueda reiniciar el sistema al haber transcurrido un tiempo prudencial desde que se haya perdido el enlace con el otro terminal.

4.3.2.7 Registro de Eventos

Los Log's o registro de eventos, son de gran utilidad en el momento de diagnosticar una falla ocurrida en nuestro sistema. De permitirlo el software, se deberá configurar el mismo para que se guarden los registros con la mayor cantidad de detalle posible.

4.3.2.8 Backup de Configuración

Resulta imprescindible que al terminar los cambios en la configuración del software del equipamiento, hagamos un backup de ello. Esto nos permitirá recuperar más rápido el funcionamiento normal de nuestro sistema ante fallas.

4.4 Etapa de Mantenimiento

Si bien, durante este documento se han brindado consejos y/o señalado los factores importantes a tener en cuenta en cada etapa mencionada hasta ahora, Relevamientos, Diseño y Montaje. Con la finalidad de obtener un radio enlace confiable y con un alto grado de disponibilidad, resulta prudente decir que no existe un sistema 100% infalible o a prueba de fallas. En algún momento de la vida útil de nuestro sistema, se nos presentara una situación de falla.

Siguiendo los lineamientos de esta guía, a continuación se describen recomendaciones para identificar y solucionar de ser posible, dichas fallas en el menor tiempo posible.

Además de haber realizado un correcto trabajo en cada una de las etapas mencionadas, es necesario destacar que los sistemas deben encontrarse dentro de una condición “segura” o “estable”, por decirlo de cierta manera, para poder proceder a diagnosticar e identificar la causa de falla. Para que un sistema en falla, sea diagnosticable, debe cumplir con 2 condiciones:

- Contar con alimentación segura: como fue mencionado en otros puntos de este documento, el hardware de los equipamientos de telecomunicaciones es extremadamente sensible a fluctuaciones en la tensión de alimentación. Una fluctuación, ya sea por, un corte, una suba o una baja en la tensión de alimentación puede impactar en nuestro sistema, provocando un comportamiento errático e inclusive producir un daño irreversible en el mismo. Por lo que de no contar con una instalación eléctrica adecuada, no resultara prudente ni será efectivo realizar un diagnostico de dicho sistema.
- Contar con la última versión de firmware instalada: es importante, antes de emplear recursos en el diagnostico de una falla, tener conocimiento de que el equipamiento que presenta una falla cuenta con la última versión de firmware provista por el fabricante. Ya que si el equipo presentaba un error en su funcionamiento producido por un factor propio del mismo, posiblemente fue advertido por otros usuarios y seguramente la fabrica habrá corregido este error, por lo que podríamos estar desperdiciando recursos en algo que podría ya estar solucionado.

4.4.1 Análisis y Reparación

Contando con las condiciones mínimas expuestas anteriormente, podremos proceder con la reparación de la falla que presente el equipamiento, pero cabe destacar que existen 2 aspectos que de contar con ellos, harán más eficiente la capacidad de realizar mantenimiento de un equipamiento.

4.4.1.1 Lote de Repuestos

Una buena recomendación con el fin de minimizar el tiempo que el equipamiento se encuentre en estado de falla, es contar con un lote de repuestos in situ, esto ahorrara las demoras que podrían surgir si como resultado del análisis realizado para encontrar la falla, se llega a la conclusión de que la solución es el reemplazo de uno o varios componentes del sistema.

Este lote deberá estar compuesto por al menos una unidad de cada equipamiento que compone nuestro sistema. En el caso de que el equipo de Radio Enlace sea modular, deberemos contar con un repuesto de sus tarjetas principales (fuentes de alimentación, placa procesadora y placa transmisora).

4.4.1.2 Asistencia In Situ

Sin lugar a dudas, una vez ocurrida una falla en nuestro sistema, la prioridad será no solo identificarla y repararla, sino hacerlo en el menor tiempo posible. Por ello, una buena práctica será considerar, en el caso de que el sistema de radio enlace no pueda ser accedido por otro subsistema de forma remota, la contratación de un servicio de soporte cercano al sitio en donde el sistema se encuentra.

Esto permitirá reducir significativamente los tiempos de respuesta ante fallas e inclusive permitirá ahorros de presupuesto en logística debido al traslado de personal idóneo hacia el sitio en cuestión, con la demora que esto conlleva.

Desde luego, que para que la asistencia contratada sea efectiva, se deberá contar con repuestos y herramientas in situ, además de una guía o procedimiento sobre acciones a tomar según la falla que se presente.

4.4.1.3 Procedimiento para el Análisis, Identificación y Solución de Fallas

El primer paso, sin duda será identificar el factor que ocasiona que el sistema no funcione de acuerdo a lo esperado. Para realizar esto, deberemos aplicar el criterio de división de acuerdo a las capas del modelo OSI. Usando este modelo de guía, podremos cuantificar la causa o el origen del desperfecto, descartando las hipótesis poco probables y centrándonos en corroborar las posibles.

A continuación se demuestra el procedimiento o pasos a seguir mediante el uso de un árbol de decisiones:

5 Conclusiones

En función de lo expuesto como objetivo durante este proyecto, se llega a la conclusión de que para las etapas mencionadas y analizadas en este documento, los puntos más importantes a tener en cuenta en cada una de ellas son:

Etapa de Relevamiento:

- Características del Ambiente o Terreno: Por lo general, se tiende a tomar en cuenta solo las alturas topográficas obtenidas a través de diferentes programas de cálculo de enlace o mapas, por lo que este aspecto, suele ser el más subestimado en el momento de realizar los relevamientos y resulta el más importante desde el punto de vista del impacto que pueda tener en nuestro sistema mediante alguna obstrucción producida por un obstáculo en la elipse de fresnel de nuestro enlace.

Etapa de Diseño:

- Margen de Intensidad de Señal: Un error común, es al realizar el cálculo del enlace, no considerar un margen generoso entre la señal que esperamos obtener y la intensidad mínima que debe tener de acuerdo a las características del equipo para poder establecer un enlace exitoso. De esta forma, al encontrarse la incidencia de un factor aleatorio o de difícil previsión que impacte negativamente nuestro enlace, nos encontraremos con la situación de tener un radio enlace al borde del margen de desvanecimiento. Lo que provocara cortes aleatorios y eso habrá que sumarle la consecuencia que tendrá sobre el ancho de banda real como se verá a continuación, por lo que este factor resulta ser crítico en la etapa de Diseño

Etapa de Instalación:

- Instalación Eléctrica: de todos los aspectos que involucran la etapa de instalación, este es el punto más importante a tener en cuenta, si bien en términos de dinero o dificultad, no sea el mayor, sin duda se le debe dar la máxima importancia durante esta etapa. Una instalación eléctrica incorrecta, podrá provocar fallas aleatorias y cuya causa resultara muy difícil de identificar, por lo que podrá provocar el gasto de muchos recursos para su solución.

Etapa de Mantenimiento:

- No contar con personal calificado o con instrucciones adecuadas cercano al sitio: Sin importar que bien se hayan realizado los trabajos en las etapas anteriores, seguirá existiendo la posibilidad de falla de nuestro sistema y si en el momento que eso suceda, no se cuenta con lo expuesto en dicho punto, no podremos darle una solución al problema en el momento requerido. Esto podría dilapidar todas las estadísticas y previsiones de buen funcionamiento para el sistema ocasionando, según el caso, una pérdida considerable de dinero.

A su vez, en base a la experiencia en la utilización de este tipo de tecnologías, en donde se ha puesto en práctica estas recomendaciones, se puede decir que se han observado mejoras en los niveles de confiabilidad. Obteniendo incrementos, según el caso, entre un 45 y un 70 % en la estabilidad del mismo, mejorando los niveles de intensidad de señal y la tasa de paquetes recibidos sin errores.

Por lo que se puede afirmar que el empleo de una metodología como la aquí expuesta, tendrá un impacto positivo en los niveles de confiabilidad de un sistema de radio enlace, maximizando su disponibilidad y permitiendo un ahorro en los recursos que suelen ser destinados para la reparación de fallas en los mismos

6 Anexo

6.1 Frecuencia

La frecuencia de una onda senoidal, es la cantidad de oscilaciones por segundo de una onda electromagnética es su frecuencia, f , y se mide en Hz (en honor a Heinrich Hertz). La distancia entre dos puntos máximos (o mínimos) consecutivos se llama longitud de onda y se designa de forma universal con la letra griega λ (lambda). De acuerdo a estas propiedades podemos dividir las ondas electromagnéticas en los siguientes rangos:

Abreviatura	Clasificación	Rango de Frecuencias
VLF (Very Low Frequency)	Frecuencias muy bajas	3 a 30 KHz
LF (Low Frequency)	Frecuencias bajas	30 a 300 KHz
MF (Medium Frequency)	Frecuencias medias	300 a 3000KHz
HF (High Frequency)	Frecuencias altas	3 a 30 MHz
VHF (Very High Frequency)	Frecuencias muy altas	30 a 300 MHz
UHF (Ultra High Frequency)	Frecuencias ultra altas	300 a 3000 MHz
SHF (Super High Frequency)	Frecuencias super altas	3 a 30 GHz
EHF (Extra High Frequency)	Frecuencias extremadamente altas	30 a 300 GHz

Tabla 2: Rangos de frecuencia y su clasificación¹⁸

El tipo de propagación que se usa en la radio-transmisión depende de la frecuencia de la señal. Cada frecuencia es adecuada para una capa específica de la atmosfera y es más eficiente si se transmite y se envía con tecnologías adaptadas a la capa.

VLF:

Las ondas de frecuencia muy baja, se propagan como ondas de superficie, habitualmente a través del aire, pero algunas veces a través del agua del mar. Las ondas VLF no sufren mucha atenuación debido a la transmisión, pero son sensibles a los altos niveles de ruido atmosférico (calor

¹⁸ Sistemas de Comunicaciones Electronicas. Wayne Tomasi. Prentice Hall. Capitulo 1 pag 6

y electricidad) activo en bajas altitudes. Estas ondas se usan principalmente para radio-navegación de largo alcance y para comunicación submarina.

LF:

De forma similar al VLF, las ondas de baja frecuencia se propagan también como ondas de superficie. Las ondas LF se usan para radio-navegación de largo alcance y para las radio balizas o localizadores de navegación. La atenuación es mayor durante el día, cuando se incrementa la absorción de las ondas por los obstáculos naturales.

MF:

Las señales de frecuencia media MF, se propagan en la troposfera. Estas frecuencias son absorbidas por la ionosfera. Por Tanto, la distancia que pueden cubrir está limitada por el ángulo necesario para reflejar la señal en la troposfera sin entrar en la ionosfera. La absorción se incrementa durante el día, pero la mayoría de las transmisiones MF se efectúan con antenas visión directa para incrementar el control y evitar también los problemas de absorción. Los usos de las transmisiones MF incluyen radio AM, radio marítima, buscadores audio direccionales RDF y frecuencias de emergencia.

HF:

Las señales de frecuencia alta (HF, High Frequency) usan propagación ionosférica. Estas señales se desplazan dentro de la ionosfera, donde la diferencia de densidad las refleja de nuevo hacia la tierra. Los usos de señales HF incluyen los radioaficionados, la radio de bandas ciudadana, las emisiones internacionales, comunicaciones militares, comunicación de larga distancia para aviones, barcos, teléfonos y faxes.

VHF:

La mayoría de las ondas de frecuencia muy alta usan propagación de visión directa. Los usos de VHF incluyen televisión, la radio FM, AM y la ayuda de navegación de los aviones.

UHF:

Las ondas de frecuencia ultra alta siempre se usan en propagación de visión directa. Los usos para el UHF incluyen la televisión UHF, los teléfonos móviles, la radio celular y los enlaces de microondas. Estas comunicaciones de microondas comienzan en la frecuencia de 1 GHz de la Banda UHF y continúan hasta las bandas SHF Y EHF.

SHF:

Las ondas de frecuencia superalta se transmiten usando principalmente propagación por visión directa y algo de propagación espacial. Los usos del SHF incluyen las microondas terrestres y satélites.

EHF:

Las ondas de frecuencia extremadamente alta usan la propagación espacial. Los usos para el EHF son predominantemente científicos e incluyen radar, satélite y comunicaciones experimentales.

En condiciones especiales y con una atmosfera uniforme, las ondas de radio tienden a desplazarse en línea recta, esto quiere decir que siempre que haya una línea de vista entre el emisor y el receptor, este tipo de comunicación será bastante eficiente, pero si se requiere de una comunicación de un punto a otro, el cual se encuentra mas allá del horizonte, tendremos que tomar en cuenta las distintas condiciones de propagación y las adecuadas frecuencias para su correcta comunicación. Para realizar comunicaciones seguras entre dos puntos lejanos y sin salir de la atmosfera, se utilizan frecuencias denominadas altas frecuencias (High Frequency) o HF que van de 3 Mhz a los 30 Mhz, ya que estas frecuencias son reflejadas en la atmosfera y regresan a la tierra a grandes distancias. Las frecuencias en orden de VHF,UHF Y SHF no se reflejan en la atmosfera salvo en ciertas circunstancias, es por esto que solo son útiles en comunicaciones de punto a punto y satelitales.

6.1.1 Codificación y Modulación

6.1.1.1 Introducción

Antes de transmitir una señal de información a través de un canal de comunicación, la misma debe ser adaptada al medio y formato usado por el hardware de comunicaciones que establecerá dicha comunicación.

Una señal, debe ser manipulada introduciéndole cambios identificables que puedan ser reconocidos en el emisor y el receptor como representativos de la información transmitida. En ocasiones es necesario convertir una señal analógica (como la voz de una conversación) en una señal digital por distintas razones, como reducir el efecto de ruido en la misma, este proceso se llama conversión analógica a digital, digitalización de una señal analógica o codificación.

En otras ocasiones es necesario convertir una señal digital en una analógica para aprovechar las propiedades de medios analógicos ya sea por atenuación o costos entre otras. A este proceso se lo denomina conversión digital a analógica o modulación de una señal digital.

6.1.1.2 Conversión de Analógico a Digital

Para llevar a cabo una conversión de este tipo, es necesario efectuar una reducción del número de valores, potencialmente infinitos de una señal analógica, de forma que puedan ser representados como un flujo digital (unos o ceros) con una pérdida mínima de información. Existen varios métodos para efectuar la conversión de analógico a digital.

6.1.1.2.1 Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM)

El primer paso en una conversión de analógico a digital se denomina Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM). Esta técnica toma una señal analógica, la muestrea y genera una serie de pulsos basados en los resultados del muestreo. El termino muestreo significa medir la amplitud de la señal en intervalos iguales.

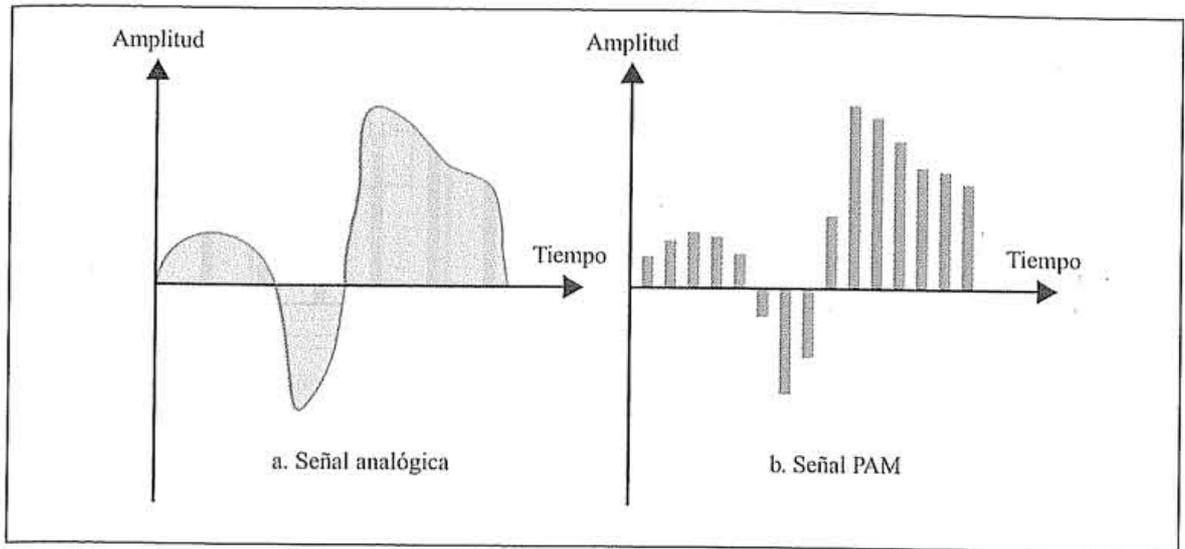


Figura 18: Onda Senoidal Cuantificada.¹⁹

En PAM, la señal original se muestra en intervalos iguales de tiempo, como se muestra en la figura, usando una técnica denominada muestrear y retener. En un determinado momento, se lee el nivel de la señal y se mantiene brevemente. El valor muestreado ocurre únicamente de forma instantánea en la onda continua, pero se generaliza en el resultado PAM en un corto, pero que se puede medir, periodo de tiempo.

Esta onda para resultar útil en una comunicación de datos es necesario codificarla usando el método PCM.

6.1.1.2.2 Modulación por Codificación en Pulsos (PCM)

PCM consiste en cuantificar los pulsos muestreados. La cuantificación es el método para asignar valores integrales dentro de un rango específico de instancias muestreadas. El resultado de la cuantificación se presenta en la siguiente figura

¹⁹ Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. McGraw-Hill. Capítulo 5 pag 97

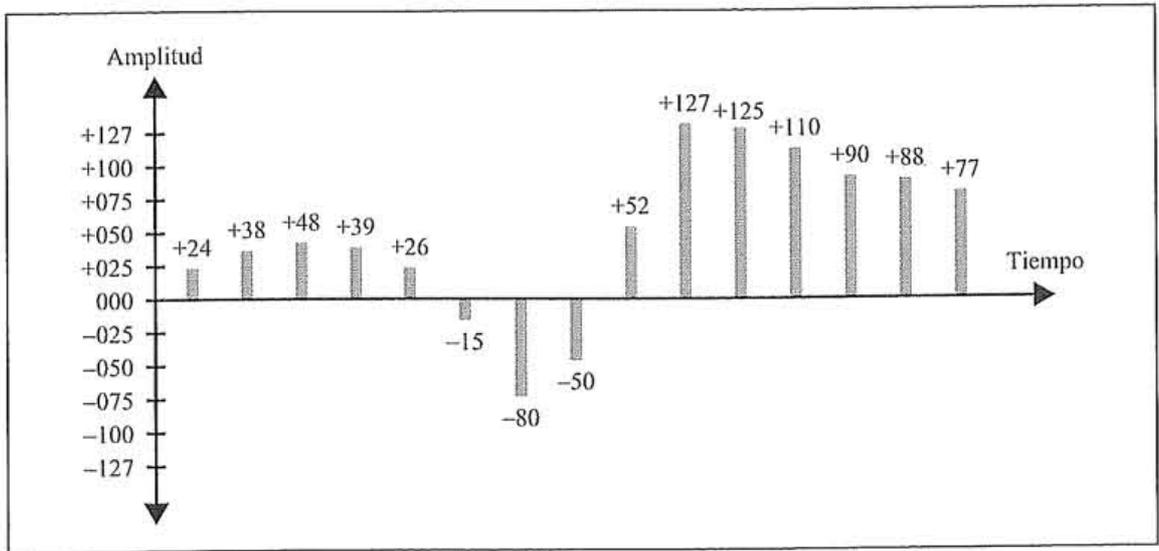


Figura 19: Cuantificación de valores obtenidos.²⁰

Cada valor muestreado se traslada a su equivalente binario de siete bits. El octavo de la serie indica el signo.

+024	00011000	-015	10001111	+125	01111101
+038	00100110	-080	11010000	+110	01101110
+048	00110000	-050	10110010	+090	01011010
+039	00100111	+052	00110110	+088	01011000
+026	00011010	+127	01111111	+077	01001101

Bit de signo
+ es 0 - es 1

Figura 20: Ilustración de notificación y signos de cuantificación.²¹

A continuación se transforman los dígitos binarios en una señal digital usando alguna técnica de codificación digital a digital.

²⁰ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 98

²¹ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 98

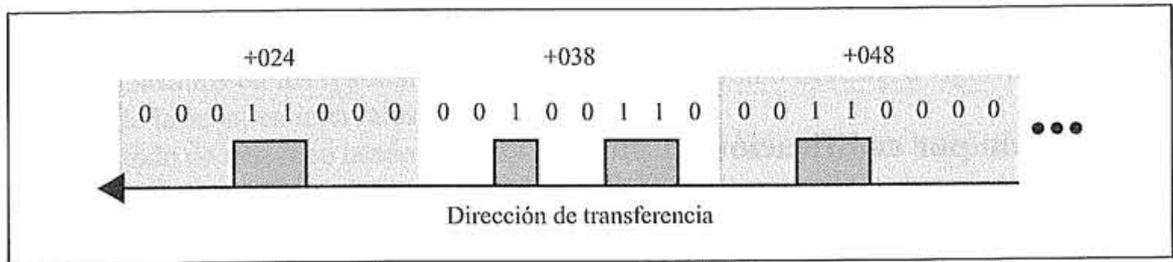


Figura 21: Transformación de dígitos binarios.²²

6.1.1.2.3 Frecuencia de Muestreo

La exactitud de cualquier reproducción digital de una señal analógica depende del número de muestras que se tomen. Usando PAM y PCM, se puede reproducir la forma de onda exactamente tomando un número infinito de muestras o se puede reproducir una generalización aproximada de la dirección de cambio tomando solamente tres muestras. En términos de minimizar el procesamiento e información necesaria al mínimo posible se pretende tomar un cierto número de muestras entre los dos extremos.

El tamaño o cantidad de la muestra a tomar es dictado por el teorema de Nyquist, el mismo expone que para asegurar una reproducción exacta de una señal analógica utilizando PAM, la tasa de muestreo debería ser al menos dos veces mayor que la frecuencia más alta de la señal original. Por lo tanto, si se quiere muestrear voz telefónica con una frecuencia máxima de 4.000 hz, es necesario muestrear a una tasa de muestreo de 8.000 muestras por segundo.

6.1.1.3 Conversión de Digital a Analógico

La conversión de digital a analógico, o modulación de d digital a analógico, es el proceso de cambiar una de las características de una señal de base analógica en información basada en una señal digital.

Los datos digitales deben ser modulados sobre una señal analógica que ha sido manipulada para aparecer como dos valores distintos correspondientes al 0 y al 1 binario. Esto se logra

²² Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capítulo 5 pag 98

cambiando las propiedades físicas de una señal, como por ejemplo la Frecuencia, Fase y Amplitud de señal senoidal.

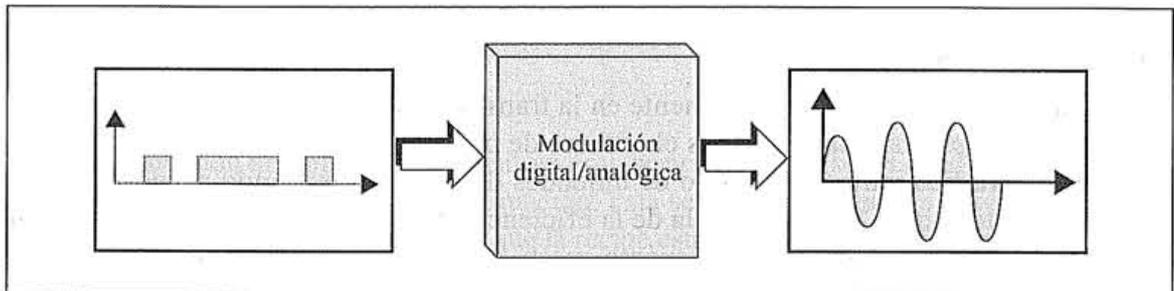


Figura 22: Modulación Analógica/Digital.²³

6.1.1.3.1 Tipos de Modulación

En una transmisión analógica, el dispositivo emisor produce una señal de alta frecuencia que actúa como base para la señal de información. Esta señal base se denomina señal portadora o frecuencia portadora. El dispositivo que la recibe está ajustado para la frecuencia de la señal portadora que espera del emisor. La información digital se modula sobre la señal portadora modificando una o más de sus características. Este tipo de modificación se denomina modulación y la información se denomina señal modulada.

6.1.1.3.1.1 Modulación por Desplazamiento de Amplitud (ASK)

En la modulación por desplazamiento de amplitud, la potencia de la señal portadora se cambia para representar el 1 a 0 binario. Tanto la frecuencia como la fase permanecen constantes mientras que la amplitud cambia. Que voltaje representa el 1 y que voltaje representa el 0 se deja para los diseñadores del sistema. La duración del bit es el periodo de tiempo que define un bit. La

²³ Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capítulo 5 pag 101

amplitud pico de la señal durante cada duración del bit es constante y su valor depende del bit (0 o 1). La velocidad de transmisión usando ASK está limitada por las características físicas del medio de transmisión.

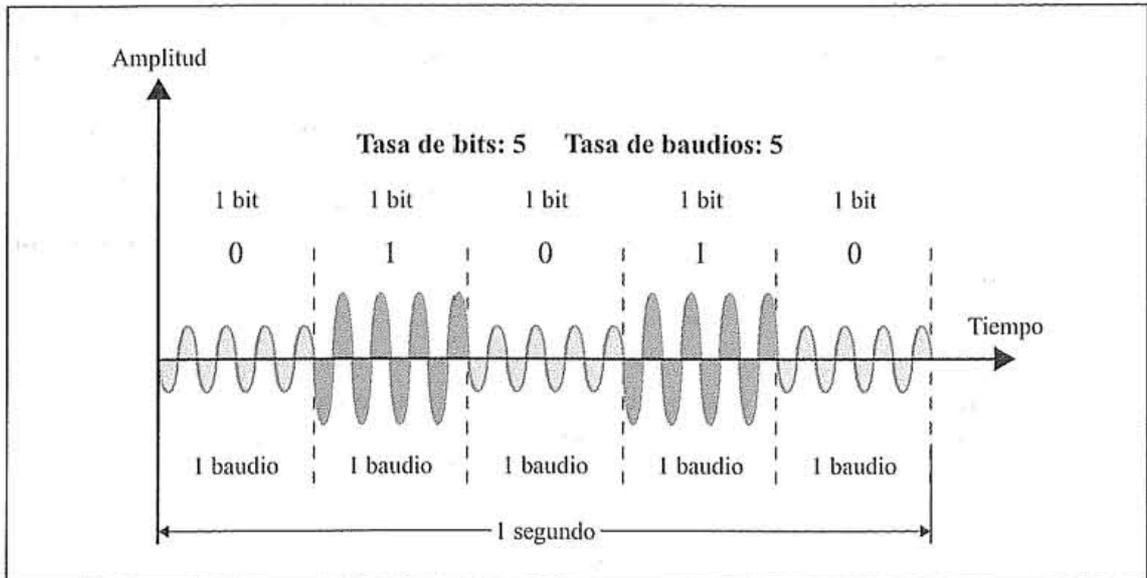


Figura 23: Modulación ASK.²⁴

La desventaja que presente este método de modulación es que altamente susceptible a la interferencia por ruidos. El termino ruido se refiere a los voltajes no intencionales introducidos dentro de una línea por fenómenos variados tales como el calor o la inducción electromagnética creada por otras fuentes. Estos voltajes no intencionales se combinan con la señal y cambian su amplitud. Un 0 se puede cambiar a un 1 y un 1 a un 0. Ya que el ruido o interferencia suele afectar a la amplitud de las ondas senoidales, la modulación ASK es especialmente sensible a este tipo de perturbaciones.

6.1.1.3.1.2 Modulación por Variación de Frecuencia (FSK)

²⁴ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 104

En la modulación por desplazamiento de frecuencia, la frecuencia de la señal portadora cambia para representar el 1 o 0 binario. La frecuencia de la señal durante la duración del bit es constante y su valor depende de un bit (0 o 1), tanto la amplitud pico como la fase se mantienen constantes.

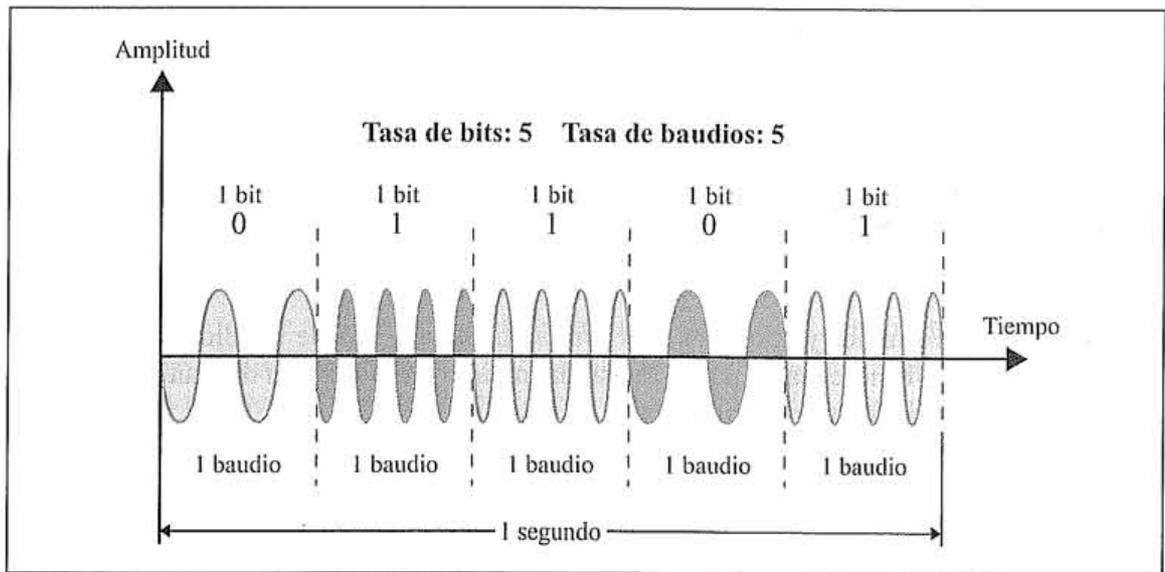


Figura 24: Modulación FSK.²⁵

Este tipo de modulación no es perturbado por la mayoría de los problemas de ruidos. Debido a que el dispositivo receptor está buscando cambios específicos de frecuencia en un cierto número de periodos, puede ignorar los picos de voltaje. Los factores que limitan la FSK son las capacidades físicas de la portadora.

6.1.1.3.1.3 Modulación por Desplazamiento de Fase (PSK)

En la modulación por desplazamiento de fase, la fase de la portadora cambia para representar el 1 o 0 binario. Tanto la amplitud como la frecuencia permanecen constantes mientras

²⁵ Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. McGraw-Hill. Capítulo 5 pag 106

la fase cambia. Por ejemplo si se comienza con una fase de 0 grados para representar un 0 binario, se puede cambiar la fase a 180 grados para enviar un 1 binario. La fase de la señal durante la duración de cada bit es constante y su valor depende del bit (0 o 1).

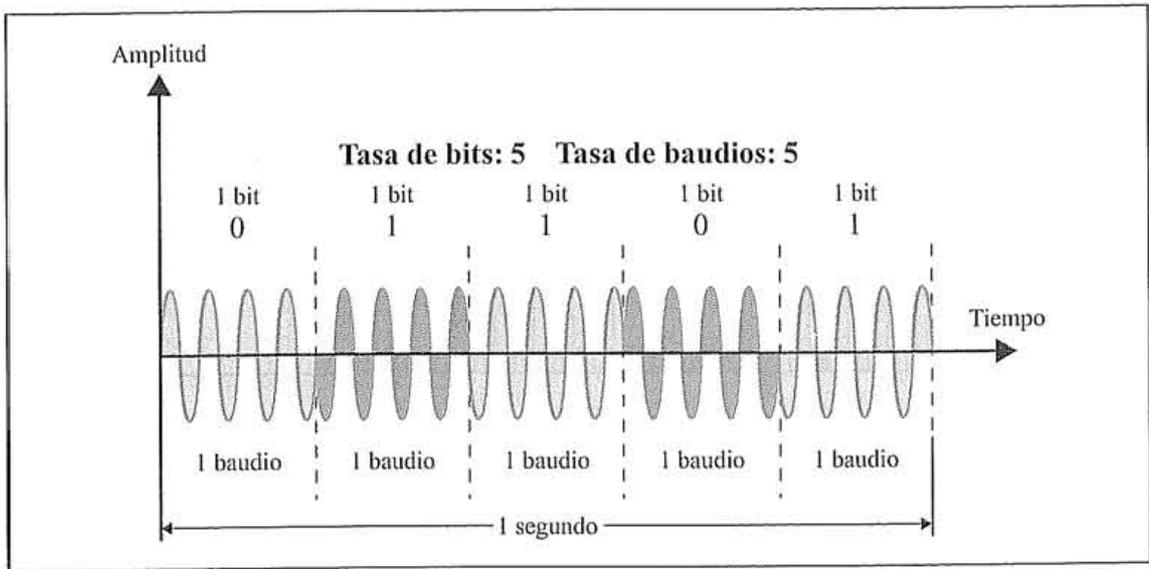


Figura 25: Modulación PSK.²⁶

Según el grado de cambio se puede clasificar PSK de distintos niveles, aquel en el que se usan dos fases distintas (0 y 180 grados) se denomina PSK binario.

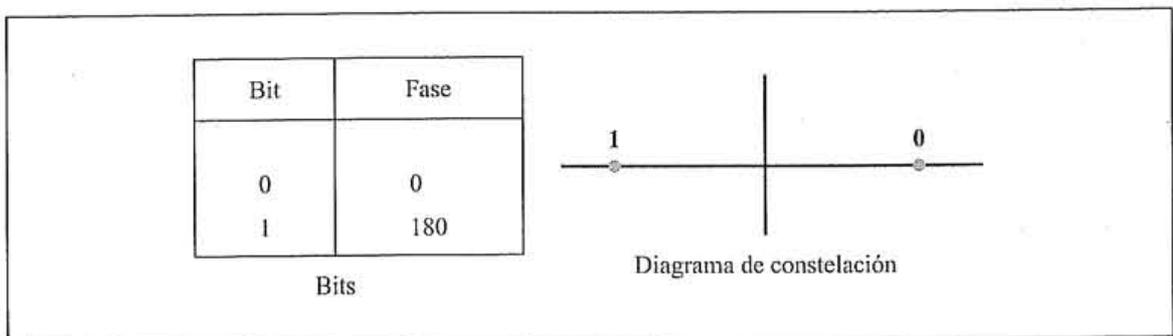


Figura 26: Diagrama de constelación binario.²⁷

²⁶ Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. McGraw-Hill. Capítulo 5 pag 108

PSK no es susceptible al ruido como ASK ni a las limitaciones de banda de FSK. Esto significa que pequeñas variaciones en la señal se pueden detectar fiablemente en el receptor. Además, en lugar de utilizar solamente dos variaciones de una señal, cada una representando un bit, se pueden utilizar cuatro variaciones y dejar que cada desplazamiento de fase represente dos bits o inclusive más.

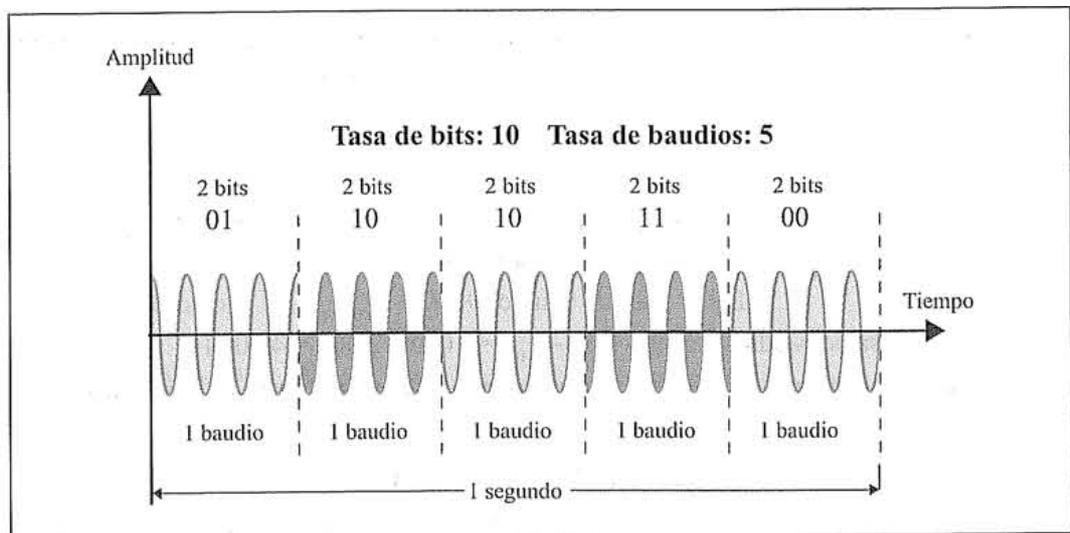


Figura 27: Modulación PSK de 10 bits.²⁸

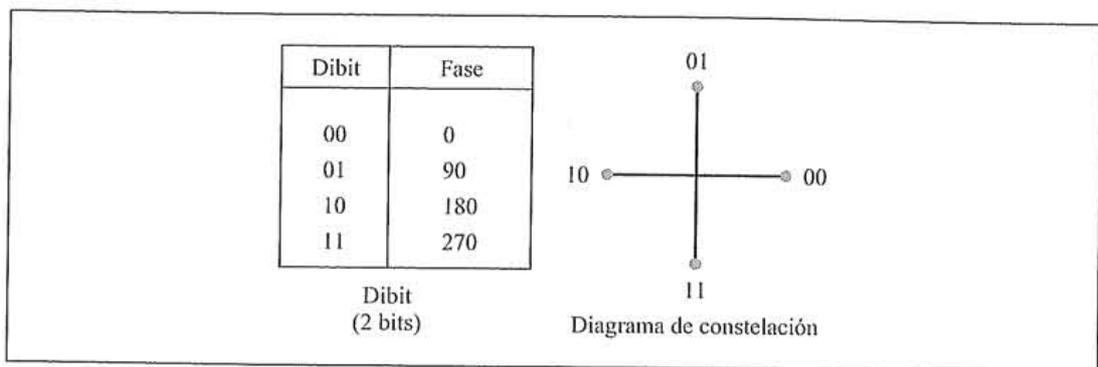


Figura 28: Diagrama de constelación de 2 bits.²⁹

²⁷ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 108

²⁸ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 109

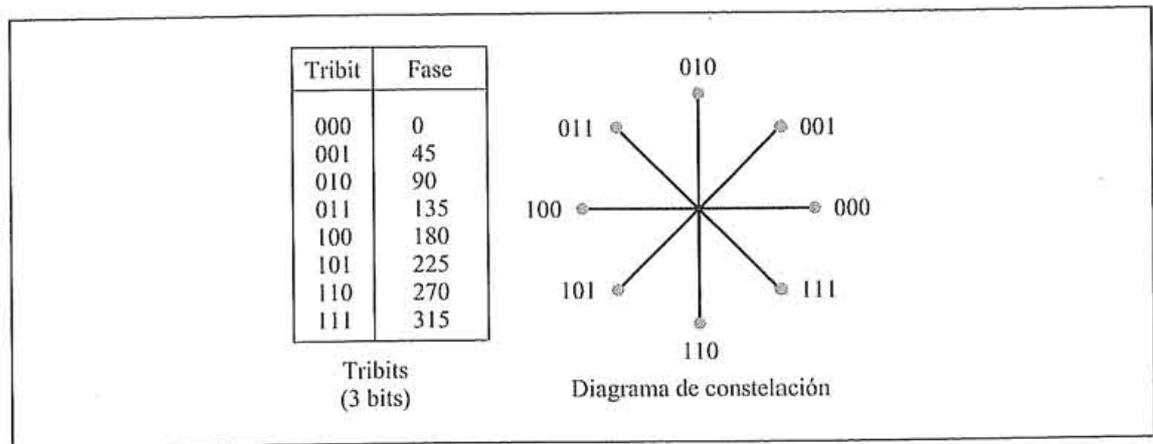


Figura 29: Diagrama de constelación de 3 bits.³⁰

6.1.1.3.1.4 Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM)

PSK está limitado por la habilidad de los equipos de distinguir pequeñas diferencias en fase. Este factor limita su tasa de bits potencial.

Los métodos descritos anteriormente (PSK, ASK, FSK) consisten en la alteración de una de las características de las ondas sinodales. Combinando la funcionalidad de ASK y PSK se pueden obtener x variaciones de fase y e variaciones en amplitud. Esto precisamente es en lo que consiste QAM.

Las variaciones posibles de QAM son numerosas. Teóricamente, cualquier valor medible de cambios en amplitud se puede combinar con cualquier valor de cambios en fase. En la siguiente figura se muestra dos combinaciones posibles, 4-QAM y 8-QAM. En ambos casos, el número de desplazamientos de amplitud son susceptibles al ruido y requieren diferencias en el desplazamiento de lo que necesitan los cambios en fase, el número de desplazamientos en fase usados en un sistema QAM es siempre mayor que el número de desplazamientos en amplitud.

²⁹ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 109

³⁰ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 110

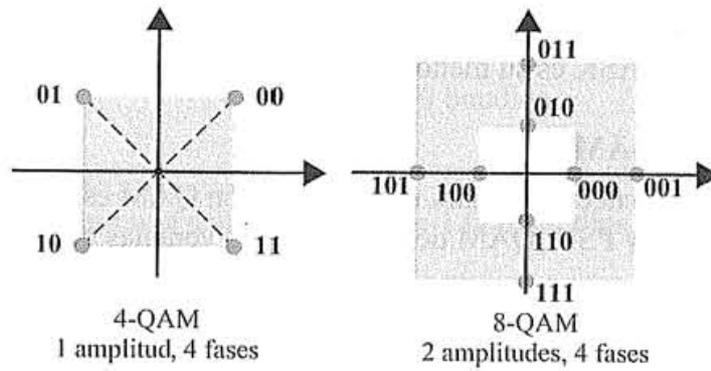


Figura 30: Diagrama de constelación QAM de 4 y 8 fases.³¹

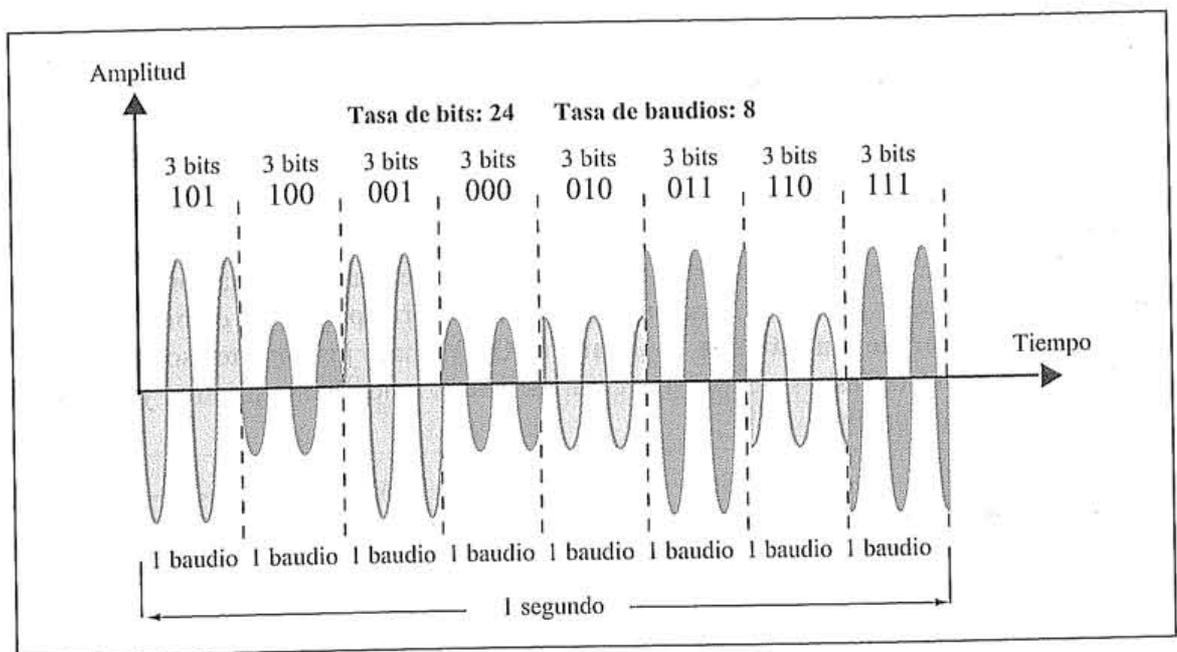


Figura 31: Modulación PSK de 8 fases.³²

³¹ Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 111

³² Transmision de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. Mcgraw-Hill. Capitulo 5 pag 112

<i>Modulación</i>	<i>Unidades</i>	<i>Bits/Baudios</i>	<i>Tasa de Baudios</i>	<i>Tasa de Bits</i>
ASK, FSK, 2-PSK	Bit	1	N	N
4-PSK, 4-QAM	Dibit	2	N	$2N$
8-PSK, 8-QAM	Tribit	3	N	$3N$
16-QAM	Quadbit	4	N	$4N$
32-QAM	Pentabit	5	N	$5N$
64-QAM	Hexabit	6	N	$6N$
128-QAM	Septabit	7	N	$7N$
256-QAM	Octabit	8	N	$8N$

Tabla 3: Esquemas de modulación.³³

6.1.1.3.1.5 Modulación Por Espectro Ensanchado Por Salto de Frecuencia (FHSS)

FHSS consiste en el concepto de transmitir sobre una determinada frecuencia por un tiempo determinado llamado “dwell” time, este tiempo siempre será inferior a 400 ms. Al concluir ese tiempo, emisor y receptor cambian de frecuencia continúan con la transmisión y recepción.

El transmisor envía al receptor señales de sincronización que contienen la secuencia y la duración de los saltos. En el estándar IEEE 802.11 se utiliza la banda de frecuencia (ISM) que va de los 2,400 hasta los 2,4835 GHz, la cual es dividida en 79 canales de 1 MHz y el salto se hace cada 300 a 400 ms. Los saltos se hacen alrededor de una frecuencia central que corresponde a uno de los 14 canales definidos.

El orden en los saltos en frecuencia se determina según una secuencia pseudoaleatoria almacenada en unas tablas, y que tanto el emisor y el receptor deben conocer. Si se mantiene la sincronización en los saltos de frecuencias se consigue que, aunque en el tiempo se cambie de canal físico, a nivel lógico se mantenga un solo canal por el que se realiza la comunicación.

³³ Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones. Forouzan. McGraw-Hill. Capítulo 5 pag 113

6.1.1.3.1.6 Modulación Por Espectro Ensanchado Por Secuencia Directa (DSSS)

La técnica DSSS consiste en generar un patrón de bits redundante para cada uno de los bits que componen la señal. Cuanto mayor sea este patrón de bits, mayor será la resistencia de la señal a las interferencias.

La secuencia de bits utilizada para modular los bits se conoce como secuencia de Barker. Es una secuencia rápida diseñada para que aparezca aproximadamente la misma cantidad de 1 que de 0. Cada bit correspondiente a un 1 es substituido por una secuencia de bits específica y el bit igual a 0 es substituido por su complemento. El estándar de la capa física 802.11 define una secuencia de 11 bits (10110111000) para representar un “1” y su complemento (01001000111) para representar un “0”. Solo los receptores a los que el emisor haya enviado previamente la secuencia podrán recomponer la señal original. Además, al substituir cada bit de datos a transmitir, por una secuencia de 11 bits equivalente, aunque parte de la señal de transmisión se vea afectada por interferencias, el receptor aún puede reconstruir fácilmente la información a partir de la señal recibida.

En DSSS, en lugar de esparcir los datos en diferentes frecuencias, cada bit se codifica en una secuencia de impulsos más cortos, llamados chips, de manera que los 11 chips en que se ha dividido cada bit original ocupan el mismo intervalo de tiempo. Esta técnica de modulación ha sido común desde el año 1999.

6.1.2 Multiplexación

La multiplexación es el conjunto de técnicas que permite la transmisión simultánea de múltiples señales a través de un único enlace de datos.

A medida que se incrementa el uso de los datos y las telecomunicaciones, se incrementa también el tráfico. Se puede hacer frente a este incremento añadiendo líneas individuales cada vez

que se necesita un canal nuevo o se pueden instalar enlaces de más capacidad y usarlos para transportar múltiples señales.

Actualmente la tecnología en comunicaciones puede hacer uso de canales de gran ancho de banda, estos tienen una capacidad que sobrepasa las necesidades medias de las señales a transmitir. Si la capacidad del enlace es mayor que las necesidades de transmisión, la capacidad sobrante se malgasta. Un sistema eficiente maximiza la utilización de todas las facilidades.

6.1.2.1 Multiplexación por División de Frecuencia (FDM)

La multiplexación por división de frecuencia es una técnica analógica que se puede aplicar cuando el ancho de banda de un enlace es mayor que los anchos de banda combinados de las señales a transmitir. En FDM las señales generadas por cada dispositivo emisor se modulan usando distintas frecuencias portadoras, estas señales moduladas se combinan en una única señal compuesta que será transportada por el enlace. Las frecuencias portadoras están separadas por un ancho de banda suficiente como para acomodar la señal modulada. Estos rangos del ancho de banda son los canales a través de los que viajan las distintas señales.

6.1.2.2 Multiplexación por División de Onda (WDM)

La multiplexación por división de onda es conceptualmente la misma que FDM, exceptuando que la multiplexación y la demultiplexación involucran señales luminosas transmitidas a través de canales de fibra óptica. La idea es la misma, se combinan distintas señales sobre frecuencias diferentes. Sin embargo, la diferencia es que las frecuencias son muy altas.

6.1.2.3 Multiplexación por División de Tiempo (TDM)

La multiplexación por división del tiempo (TDM) es un proceso digital que se puede aplicar de 2 formas.

TDM sincrónica

Significa que el multiplexor asigna siempre exactamente la misma ranura de tiempo a cada dispositivo, tanto si el dispositivo tiene algo que transmitir como si no.

Las ranuras de tiempo se agrupan en tramas. Una trama está formada por un ciclo completo de ranuras de tiempo, incluyendo una o más ranuras dedicadas a cada dispositivo emisor. En un sistema con n línea de entrada, cada trama tiene al menos n ranuras, con cada ranura asignada al transporte de datos de una línea de entrada específica. Si todos los dispositivos de entrada que comparten un enlace transmiten datos a la misma velocidad, cada dispositivo tiene una ranura de tiempo por trama. Sin embargo es posible acomodar datos de velocidades distintas.

TDM asincrónica

Debido a que en TDM sincrónica las ranuras de tiempo están preasignadas y son fijas, se usen o no, es poco probable que se haga uso de todas ellas por lo que lo más posible es que no se pueda usar la capacidad completa del enlace.

A diferencia de TDM síncrona, en TDM asincrónica la velocidad total de las canales de entrada puede ser mayor que la capacidad del canal principal

Cada ranura o trama disponible acepta porciones de datos hasta que se encuentra llena y después es enviada a través del enlace. En el caso de no haber datos suficientes para rellenar todas las tramas, la trama se transmite rellena parcialmente. Si bien el canal en ese caso no se estaría aprovechando al 100%, la habilidad de asignar ranuras de tiempo dinámicamente reduce grandemente la probabilidad de desperdicio del canal.

6.1.2.4 Multiplexacion por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM)

En FDM muchos canales se combinan repartiendo rangos de frecuencias espectrales, de manera similar al FDD, teniendo que reservar bandas de guardia para evitar solapamientos. Para conseguir una mayor eficiencia se ha desarrollado el método OFDM.

Es una técnica de multiplexación multiportadora que proviene de la década de 1960, pero que ha resurgido en la actualidad por sus aplicaciones en transmisiones inalámbricas. En cuanto a

sus aplicaciones, además de las relacionadas con el uso militar de sus orígenes, está presente en la ADSL, DAB (radio digital europea), DVB-T (televisión digital terrestre), junto a las utilizadas en comunicaciones inalámbricas Wi-Fi (802.11a) y WiMAX.

La tecnología OFDM fue planteada por los Laboratorios BELL, siendo incorporado en varios equipos de líneas en suscriptor digital (DSL), basado en el proceso matemático de la llamada Transformada Rápida de Fourier (FFT). Permite obtener una alta eficiencia espectral y habilitar los canales para ser procesados en el receptor de forma más eficiente. OFDM es popular en aplicaciones inalámbricas ya que es resistente a las interferencias y degradaciones por efectos de multitrayectoria y retardos. Los recursos, en los sistemas OFDM, en el dominio del tiempo se denominan símbolos OFDM y en el dominio de la frecuencia se denominan subportadoras. En la frecuencia se pueden organizar subcanales, los cuales se pueden asignar a un usuario, de la estructura de subcanales se genera OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) .

OFDM es una técnica de modulación multiportadora, que permite solucionar los problemas debidos a la propagación multicamino, en lugar de transmitir la información en una única portadora, se divide el ancho de banda disponible en un conjunto de portadoras.

La base de OFDM reside en la combinación de múltiples portadoras moduladas solapadas espectralmente, pero manteniendo las señales moduladas ortogonales, de manera que no se producen interferencias entre ellas. Además, es posible utilizar diferentes técnicas de modulación entre portadoras, con lo cual se consigue una funcionalidad extra.

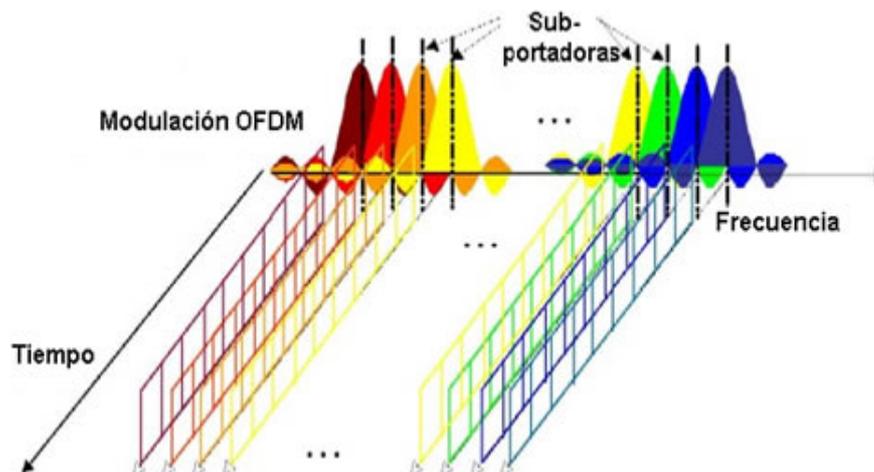


Figura 32: Grafico demostrativo – Modulación OFDM.³⁴

6.1.3 Estándares y Tecnologías

6.1.3.1 Estándares 802.11

La familia de estándares IEEE 802 es mantenida por el comité de estándares LAN/MAN (LMSC) del IEEE que establece un grupo de trabajo individual para cada una de las 22 áreas que incluye.

El estándar 802.11 para redes LAN inalámbricas incluye una serie de enmiendas. Las enmiendas contemplan principalmente las técnicas de modulación, gama de frecuencia y la calidad del servicio

(QoS). Como todos los estándares 802 del IEEE, el IEEE 802.11 cubre las primeras dos capas del modelo de OSI (Open Systems Interconnection), es decir la capa física (L1) y la capa de enlace (L2).

³⁴ Recomendación UIT-PR 618. Pag 12

6.1.3.1.1 802.11a

La revisión 802.11a fue ratificada en 1999. El estándar 802.11a opera en la banda de 5 Ghz y utiliza OFDM compuesto de 52 subportadoras con una velocidad máxima de 54 Mbit/s, lo que lo hace un estándar práctico para redes inalámbricas con velocidades reales de aproximadamente 20 Mbit/s. La velocidad de datos se reduce a 48, 36, 24, 18, 12, 9 o 6 Mbit/s en caso necesario.

La 802.11a tiene 12 canales sin solapa, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto. No puede interoperar con equipos del estándar 802.11b, excepto si se dispone de equipos que implementen ambos estándares.

Dado que la banda de 2,4 Ghz tiene gran uso (pues es la misma banda usada por los teléfonos inalámbricos y los hornos de microondas, entre otros aparatos), el utilizar la banda de 5 GHz representa una ventaja del estándar 802.11a, dado que se presentan menos interferencias. Sin embargo, la utilización de esta banda también tiene sus desventajas, dado que restringe el uso de los equipos 802.11a a únicamente puntos en línea de vista, con lo que se hace necesario la instalación de un mayor número de puntos de acceso; Esto significa también que los equipos que trabajan con este estándar no pueden penetrar tan lejos como los del estándar 802.11b dado que sus ondas son más fácilmente absorbidas.

6.1.3.1.2 802.11b

El estándar 802.11b funciona en la banda de 2,4 GHz e incluye mejoras del estándar original 802.11 para el soporte de tasas de transmisión más elevadas (5,5 y 11 Mbit/s), usando el mismo método de acceso y la misma técnica DSSS definidas en el estándar IEEE 802.11 original.

Un dispositivo basado en IEEE 802.11b puede transmitir hasta 11 Mbit/s, y reducirá automáticamente su tasa de transmisión cuando el receptor empiece a detectar errores, sea debido a la interferencia o a la atenuación del canal, cayendo a 5,5 Mbit/s, después a 2, hasta llegar a 1 Mbit/s, cuando el canal sea muy ruidoso aunque en la práctica, la velocidad máxima de transmisión con este estándar es de aproximadamente 5,9 Mbit/s sobre TCP y 7,1 Mbit/s sobre UDP. Las tasas de transmisiones de datos más bajas son menos sensibles a la interferencia y a la atenuación puesto

que están utilizando un método más redundante para codificar los datos (las exigencias de relación de señal y ruido son menos exigentes a tasas de transferencias de datos más bajas).

6.1.3.1.3 802.11g

Publicada en 2003, 802.11g utiliza la banda de 2.4 Ghz (al igual que el estándar 802.11b) pero opera a una velocidad teórica máxima de 54 Mbit/s, o cerca de 24.7 Mbit/s de velocidad real de transferencia, similar a la del estándar 802.11a. Es compatible con el estándar b y utiliza las mismas frecuencias.

La interoperabilidad 802.11g con 802.11b es una de las razones principales de su masiva aceptación.

Actualmente se venden equipos con esta especificación, con potencias de hasta medio vatio, que permite hacer comunicaciones de hasta 50 km con antenas parabólicas apropiadas.

6.1.3.1.4 802.11n

El estándar 802.11n apunta a alcanzar una tasa teórica de 540 Mbit/s que sería 40 veces más rápida que la de 802.11b y 10 veces más que la de 802.11a o la 802.11g.

La norma 802.11n aprovecha muchas de las enmiendas previas pero la gran diferencia es la introducción del concepto de MIMO (Multiple Input, Multiple Output), múltiples-entradas múltiples-salidas que permite utilizar varios canales a la vez para enviar y recibir datos gracias a la incorporación de varias antenas con sus respectivos emisores y receptores.

6.1.3.2 Sistemas de Radio Enlaces PDH

La Jerarquía Digital Plesiócrona, conocida como PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy), es una tecnología usada en telecomunicaciones tradicionalmente para telefonía. Surgió como una tecnología basada en el transporte de canales digitales sobre un mismo enlace. Los canales a multiplexar denominados módulos de transporte o contenedores virtuales se unen formando tramas o módulos de nivel superior a velocidades estandarizadas 2 Mbps, 8 Mbps, 34 Mbps y 140 Mbps.

Se basa en canales de 64 kbps. En cada nivel de multiplexación se van aumentando el número de canales sobre el medio físico. Es por eso que las tramas de distintos niveles tienen estructuras y duraciones diferentes. Además de los canales de voz en cada trama viaja información de control que se añade en cada nivel de multiplexación, por lo que el número de canales transportados en niveles superiores es múltiplo del transportado en niveles inferiores.

Las redes PDH funcionan en un estado donde las diferentes partes de la red están casi, pero no completamente sincronizadas. La tecnología PDH, por ello, permite la transmisión de flujos de datos que, nominalmente, están funcionando a la misma velocidad (bit rate), pero permitiendo una cierta variación alrededor de la velocidad nominal gracias a la forma en la que se construyen las tramas.

El término plesiócrono se deriva del griego plesio, cercano y chronos, tiempo, y se refiere al hecho de que las redes PDH funcionan en un estado donde las diferentes partes de la red están casi, pero no completamente sincronizadas.

La principal problemática de la jerarquía PDH es la falta de sincronismo entre equipos. Cuando se quiere pasar a un nivel superior jerárquico se combinan señales provenientes de distintos equipos. Cada equipo puede tener alguna pequeña diferencia en la tasa de bit. Es por ello necesario ajustar los canales entrantes a una misma tasa de bit, para lo que se añaden bits de relleno. Sólo cuando las tasas de bit son iguales puede procederse a una multiplexación bit a bit como se define en PDH. El demultiplexor debe posteriormente reconocer los bits de relleno y eliminarlos de la señal.

6.1.3.3 Sistemas de Radio Enlaces SDH

La trama básica de SDH es el STM-1 (Synchronous Transport Module level 1), con una velocidad de 155 Mbps

Cada trama va encapsulada en un tipo especial de estructura denominado contenedor. Una vez encapsulados se añaden cabeceras de control que identifican el contenido de la estructura (el contenedor) y el conjunto, después de un proceso de multiplexación, se integra dentro de la estructura STM-1. Los niveles superiores se forman a partir de multiplexar a nivel de Byte varias estructuras STM-1, dando lugar a los niveles STM-4, STM-16 y STM-64.

La SDH presenta una serie de ventajas respecto a la jerarquía digital plesiocrona (PDH).

Algunas de estas ventajas son:

- El proceso de multiplexación es mucho más directo. La utilización de punteros permite una localización sencilla y rápida de las señales tributarias de la información.
- El procesamiento de la señal se lleva a cabo a nivel de STM-1. Las señales de velocidades superiores son sincronas entre sí y están en fase por ser generadas localmente por cada nodo de la red.
- Las tramas tributarias de las señales de línea pueden ser subdivididas para acomodar cargas plesiócronicas, tráfico ATM o unidades de menor orden. Esto supone mezclar tráfico de distinto tipo dando lugar a redes flexibles.
- Compatibilidad eléctrica y óptica entre los equipos de los distintos proveedores gracias a los estándares internacionales sobre interfaces eléctricos y ópticos.
- Un STM1 tiene la capacidad de agrupar varios E1 y T1 de forma multiplexada, es decir se universaliza las velocidades y ocupando VC correspondientes, la capacidad del STM1 es suficiente

En cuanto a las desventajas tenemos que:

- Algunas redes PDH actuales presentan ya cierta flexibilidad y no son compatibles con SDH.
- Necesidad de sincronismo entre los nodos de la red SDH, se requiere que todos los servicios trabajen bajo una misma referencia de temporización.

- El principio de compatibilidad ha estado por encima de la optimización de ancho de banda. El número de Bytes destinados a la cabecera de sección es demasiado grande, lo que lleva a perder eficiencia.

6.1.3.4 Sistemas de Radio Enlaces Routerboard

Routerboard es el nombre de una gama de productos de la empresa letonia MikroTik. Son placas madre pensadas para construir routers. Suelen tener varios slots de expansión miniPCI para conectar tarjetas inalámbricas, puertos Ethernet y USB. Algunos modelos más avanzados cuentan incluso con slots miniPCI-E para conectar tarjetas 3G. Por defecto, vienen con un sistema operativo propio de la compañía, llamado RouterOS, pero se puede cambiar reprogramando la memoria flash interna a través del puerto serie.

La ventaja principal resulta en el hecho de que son mucho más personalizables que los que se pueden comprar normalmente y se pueden ahorrar gastos en función de las necesidades que se tengan.

Además, suelen tener incorporada la tecnología Power over Ethernet haciendo que sea posible alimentar el futuro router a través de un cable LAN RJ-45 estándar y eliminando así el uso de un alimentador de corriente convencional.

Aparte de la routerboard, para constituir un router se necesitan al menos una tarjeta inalámbrica conectada en uno de los slots, una antena conectada a la tarjeta inalámbrica a través de un pigtail, una fuente de alimentación y una caja que lo proteja.

7 Glosario

LAN: Una red de área local, red local o LAN (del inglés local area network) es la interconexión de una o varias computadoras y periféricos de forma local, hasta unos cientos de metros.

TROUGHPUT: Consiste en el volumen de trabajo o de información que fluye a través de un sistema. Así también se le llama al volumen de información que fluye en las redes de datos y a menudo se utiliza para mencionar la capacidad o velocidad efectiva de un canal de transmisión.

dB: También llamado Decibelio es la unidad relativa empleada en acústica, electricidad, telecomunicaciones y otras especialidades para expresar la relación entre dos magnitudes, la magnitud que se estudia y una magnitud de referencia.

dBm: Es una unidad de medida utilizada, principalmente, en telecomunicación para expresar la potencia absoluta mediante una relación logarítmica.

El dBm se define como el nivel de potencia en decibelios en relación a un nivel de referencia de 1mW.

Al utilizarse un nivel de referencia determinado (1 mW) la medida en dBm constituye una verdadera medición de la potencia y no una simple relación de potencias como en el caso de la medida en decibelios. Así, una lectura de 20 dBm significa que la potencia medida es 100 veces mayor que 1mW y por tanto igual a 100 mW.

La ventaja de todas estas unidades logarítmicas es que reducen a simples sumas y restas los cálculos de potencias cuando hay ganancias o atenuaciones. Por ejemplo, si aplicamos una señal de 15 dBm a un amplificador con una ganancia de 10 dB, a la salida tendremos una señal de 25 dBm. Si en lugar de un amplificador, la señal de 15 dBm la aplicamos a un atenuador con una pérdida 25 dB, la señal a la salida será de -10 dBm.

BER: representa a el número de bits o bloques incorrectamente recibidos, con respecto al total de bits o bloques enviados durante un intervalo especificado de tiempo

CCTV: Circuito cerrado de televisión o CCTV (siglas en inglés de closed circuit television) es una tecnología de videovigilancia visual diseñada para supervisar una diversidad de ambientes y actividades.

Se le denomina circuito cerrado ya que, al contrario de lo que pasa con la difusión, todos sus componentes están enlazados. Además, a diferencia de la televisión convencional, este es un sistema pensado para un número limitado de espectadores.

IP: Una dirección IP es una etiqueta numérica que identifica, de manera lógica y jerárquica, a un interfaz (elemento de comunicación/conexión) de un dispositivo (habitualmente una computadora) dentro de una red que utilice el protocolo IP (Internet Protocol), que corresponde al nivel de red del protocolo TCP/IP. Dicho número no se ha de confundir con la dirección MAC que es un identificador de 48bits para identificar de forma única a la tarjeta de red y no depende del protocolo de conexión utilizado ni de la red. La dirección IP puede cambiar muy a menudo por cambios en la red o porque el dispositivo encargado dentro de la red de asignar las direcciones IP, decida asignar otra IP (por ejemplo, con el protocolo DHCP), a esta forma de asignación de dirección IP se denomina dirección IP dinámica (normalmente abreviado como IP dinámica).

FIFO: Se utiliza en estructuras de datos para implementar colas. La implementación puede efectuarse mediante el uso de punteros y asignación dinámica de memoria.

Si se implementa mediante vectores el número máximo de elementos que puede almacenar está limitado al que se haya establecido en el código del programa antes de la compilación o durante su ejecución. Sea cual sea la opción elegida, el número de elementos que podrá almacenar la cola quedará determinado durante toda la ejecución del programa. Así, el sistema

debe reservar el tamaño de memoria necesario para acoger todos los datos, sea cual sea el número de elementos usados.

En algunas aplicaciones, esto supone un problema ya que puede desconocerse el número de elementos a contener en la cola. La sencilla solución de reservar más memoria de la que se supone que se necesitará, puede conducir a un despilfarro de la memoria (la cola puede estar llena, aprovechando toda la memoria reservada; o bien, nunca terminar de llenarse, ocupando recursos innecesarios en memoria). Sin embargo, si se usa asignación dinámica de memoria, el número máximo no está declarado en tiempo de compilación sino en tiempo de ejecución, es decir, se reserva memoria a medida que se necesite expandir el tamaño de la cola (adaptándose al tamaño necesario en cada momento en función de los elementos que hay en la cola), haciendo un mejor uso de la memoria disponible.

CSMA/CD: sus siglas corresponden a Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (en español, "Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisiones"), es una técnica usada en redes Ethernet para mejorar sus prestaciones. Anteriormente a esta técnica se usaron las de Aloha puro y Aloha ranurado, pero ambas presentaban muy bajas prestaciones. Por eso apareció en primer lugar la técnica CSMA, que fue posteriormente mejorada con la aparición de CSMA/CD.

En el método de acceso CSMA/CD, los dispositivos de red que tienen datos para transmitir funcionan en el modo "escuchar antes de transmitir". Esto significa que cuando un nodo desea enviar datos, primero debe determinar si los medios de red están ocupados o no.

TIME SLOT: a menudo se refiere a este término cuando se habla de una ranura de tiempo o en el que se transmite o transmitirá información a través de un canal de comunicación.

QOS: Son las tecnologías que garantizan la transmisión de cierta cantidad de información en un tiempo dado. Calidad de servicio es la capacidad de dar un buen servicio. Es especialmente

importante para ciertas aplicaciones tales como la transmisión de vídeo o voz. Consiste en clasificar el tipo de información que conforma el tráfico de un sistema de comunicaciones, con el objetivo de establecer propiedades de acuerdo a las particularidades de cada uno de estos tipos de información.

dBi: El dBi, o decibelio isótropo, es una unidad para medir la ganancia de una antena en referencia a una antena isótropa teórica. El valor de dBi corresponde a la ganancia de una antena ideal (teórica) que irradia la potencia recibida de un dispositivo al que está conectado, y al cual también transmite las señales recibidas desde el espacio, sin considerar ni pérdidas ni ganancias externas o adicionales de potencias.

UTP: Unshielded Twisted Pair o UTP (en español "par trenzado no blindado") es un tipo de cable de par trenzado que no se encuentra blindado y que se utiliza principalmente para comunicaciones. Se encuentra normalizado de acuerdo a la norma estadounidense TIA/EIA-568-B.

Cada par de cables es un conjunto de dos conductores aislados con un recubrimiento plástico. Este par se retuerce para que la señales transportadas por ambos conductores (de la misma magnitud y sentido contrario) no generen interferencias ni resulten sensibles a emisiones.

La "U" de UTP indica que este cable es sin blindaje o no blindado. Esto quiere decir que este cable no incorpora ninguna malla metálica que rodee ninguno de sus elementos (pares) ni el cable mismo.

Los cables de par retorcido por lo general tienen estrictos requisitos para obtener su máxima tensión, así como tener un radio de curvatura mínimo. Esta relativa fragilidad de los cables de par retorcido hace que su instalación sea tan importante para asegurar el correcto funcionamiento del cable.

POE: a alimentación a través de Ethernet (Power over Ethernet, PoE) es una tecnología que incorpora alimentación eléctrica a una infraestructura LAN estándar. Permite que la

alimentación eléctrica se suministre al dispositivo de red como, por ejemplo, un teléfono IP o una cámara de red, usando el mismo cable que se utiliza para una conexión de red. Elimina la necesidad de utilizar tomas de corriente en las ubicaciones de la cámara y permite una aplicación más sencilla de los sistemas de alimentación ininterrumpida (SAI) para garantizar un funcionamiento las 24 horas del día, 7 días a la semana.

LED: Un led¹ (de la sigla inglesa LED: Light-Emitting Diode: "diodo emisor de luz", también "diodo luminoso") es un diodo semiconductor que emite luz.

Cuando un led se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de fotones. Este efecto es llamado electroluminiscencia y el color de la luz (correspondiente a la energía del fotón) se determina a partir de la banda de energía del semiconductor.

OSI: El modelo de interconexión de sistemas abiertos, también llamado OSI (en inglés open system interconnection) es el modelo de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización en el año 1984. Es decir, es un marco de referencia para la definición de arquitecturas de interconexión de sistemas de comunicaciones.

Siguiendo el esquema de este modelo se crearon numerosos protocolos. El advenimiento de protocolos más flexibles donde las capas no están tan demarcadas y la correspondencia con los niveles no era tan clara puso a este esquema en un segundo plano. Sin embargo es muy usado en la enseñanza como una manera de mostrar cómo puede estructurarse una "pila" de protocolos de comunicaciones.

El modelo especifica el protocolo que debe ser usado en cada capa, y suele hablarse de modelo de referencia ya que es usado como una gran herramienta para la enseñanza de comunicación de redes.

8 Bibliografía

8.1 Libros

Behrouz, Forouzan. Transmisión de Datos y Redes de Comunicaciones 2da Edición. España. Mcgraw Hill. 2001.

Lechtaler, Antonio Ricardo Castro. Teleinformática para Ingenieros en Sistemas de Información 2da Edición Volumen 1 y 2. Barcelona, España. Reverté S.A. 2001.

Tanenbaum, Andrew S. Redes de Computadoras 4ta Edición. Mexico. Pearson. 2003

Tomasi, Wayne. Sistemas de Comunicaciones Electrónicas 4ta Edición. Mexico. Prentice Hall. 2001.

8.2 Publicaciones

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.526-11 - Propagación por difracción. Ginebra. Publicación electrónica. 2011.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.676-8 - Atenuación debida a los gases atmosféricos. Ginebra. Publicación electrónica. 2009.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.833-6 - Atenuación debida a la vegetación. Ginebra. Publicación electrónica. 2007.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.834-6 - Efectos de refracción sobre la propagación de las ondas radioeléctricas. Ginebra. Publicación electrónica. 2009.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.840-4 - Atenuación debida a las nubes y a la niebla. Ginebra. Publicación electrónica. 2010.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R F.1101- Características de los sistemas inalámbricos fijos digitales por debajo de 17 GHz aproximadamente. Ginebra. Publicación electrónica. 1994.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.1410-4 - Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales de acceso radioeléctrico de banda ancha que funcionan en una gama de frecuencias de 3 a 60 GHz aproximadamente. Ginebra. Publicación electrónica. 2010.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R P.1411-5 - Datos de propagación y métodos de predicción para la planificación de los sistemas de radiocomunicaciones de exteriores de corto alcance y redes de radiocomunicaciones de área local en la gama de frecuencias de 300 MHz a 100 GHz. Ginebra. Publicación electrónica. 2010.

Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sector de Radiocomunicaciones. Recomendación UIT-R F.1705 - Análisis y optimización de las características de error de los sistemas inalámbricos fijos digitales a los fines de la puesta en servicio y mantenimiento. Ginebra. Publicación electrónica. 2005.

8.3 Sitios Web

CANOPY - [<http://motorola.canopywireless.com>]

MIKROTIK - [<http://www.mikrotik.com>]

TRICALCAR - [<http://www.wilac.net/tricalcar>]

UBIQUITI - [<http://ubnt.com/>]