

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ENLACES INALÁMBRICOS PARA WI-FI

**JOSÉ ALBERTO ALARCÓN AHUMADA
BETTY GINA BAUTISTA RUIZ**

**DIRECTOR
DAVID SENIOR ELLES**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

2008

METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ENLACES INALÁMBRICOS PARA WI-FI

**JOSÉ ALBERTO ALARCÓN AHUMADA
BETTY GINA BAUTISTA RUIZ**

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electrónico**

**DIRECTOR
DAVID SENIOR ELLES
INGENIERO ELECTRONICO
MAGISTER EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
Y DE COMPUTADORES**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

2008

Artículo 107

La Universidad Tecnológica de Bolívar se reserva el derecho de propiedad de los trabajos de grado aprobados y no pueden ser explotados comercialmente sin autorización.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena, Marzo 2008

Cartagena D. T. Y C., Marzo de 2008

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Respetados señores:

Con toda atención nos dirigimos a ustedes con el fin de presentarles a su consideración, estudio y aprobación la monografía titulada METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ENLACES INALÁMBRICOS PARA WI-FI como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Atentamente

José Alberto Alarcón Ahumada

Betty Gina Bautista Ruiz

Cartagena D. T. Y C., Marzo de 2008

Señores

COMITÉ DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

La ciudad

Cordial saludo:

A través de la presente me permito entregar la monografía titulada METODOLOGÍA DE DISEÑO DE ENLACES INALÁMBRICOS PARA WI-FI para su estudio y evaluación que fue realizada por los estudiantes JOSÉ ALBERTO ALARCÓN AHUMADA y BETTY GINA BAUTISTA RUIZ, de la cual acepto ser su director.

Atentamente,

DAVID SENIOR ELLES

ING. Electricista, Magíster en Ingeniería Electrónica y de Computadores

AUTORIZACIÓN

Yo JOSÉ ALBERTO ALARCÓN AHUMADA, identificado con Cédula de Ciudadanía número 73.202.549 de Cartagena, autorizo a la **Universidad Tecnológica de Bolívar** para hacer uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catálogo on-line de la biblioteca.

José Alberto Alarcón Ahumada

AUTORIZACIÓN

Yo BETTY GINA BAUTISTA RUIZ, identificada con Cédula de Ciudadanía número 32.938.823 de Cartagena, autorizo a la **Universidad Tecnológica de Bolívar** para hacer uso de nuestro trabajo de grado y publicarlo en el catálogo on-line de la biblioteca.

Betty Gina Bautista Ruiz

Agradecimientos

*Agradezco infinitamente a Dios por las bendiciones y oportunidades que me ha dado,
A mis padres Martha Cecilia y José Joaquín por el amor, la confianza y el apoyo
brindado en cada momento de mi vida, y por los sacrificios que han tenido que pasar
en pro de mi bienestar y el de la familia.*

A mis hermanos Nayib y Jaifa por su apoyo y comprensión.

*A mi novia Betty Gina con la cual he compartido gran parte de mi formación académica y personal
y quien con su amor, ternura y tenacidad ha marcado mi vida de manera muy especial.*

*A todas las demás personas que de una u otra manera han contribuido
en mi formación profesional y personal.*

José Alberto Alarcón Ahumada

Agradecimientos

*Doy gracias a Dios por todo lo que me ha dado,
A mis Padres por su apoyo incondicional
que me brindan las 24 horas del día,
A mi novio, José Alberto que me acompañó
En la realización de este trabajo y fue un soporte
durante gran parte de mi carrera profesional.
A todos mis profesores,*

Betty Gina Bautista Ruiz

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN..... | 25 |
| 1. GENERALIDADES DE WI-FI..... | 31 |
| 1.1. Redes inalámbricas 802.11 - Wi Fi..... | 31 |
| 1.1.1. Estándar IEEE 802.11b..... | 31 |
| 1.1.2. Estándar IEEE 802.11g..... | 32 |
| 1.1.3. Estándar IEEE 802.11a..... | 33 |
| 1.1.4. Estándar IEEE 802.11n..... | 33 |
| 1.2. Funcionamiento de Wi-Fi..... | 34 |
| 1.2.1. Capa Física..... | 35 |
| 1.2.2. Espectro Expandido..... | 36 |
| 1.2.2.1 FHSS..... | 36 |
| 1.2.2.2 DSSS..... | 37 |
| 1.2.2.3 OFDM..... | 39 |
| 1.2.3. La capa MAC (Control de acceso al medio)..... | 40 |
| 1.2.3.1 Servicios de Estaciones de la Capa MAC..... | 41 |
| 1.2.3.2 Servicios de Distribución de la Capa MAC..... | 42 |
| 2. ELEMENTOS DE UN ENLACE..... | 43 |
| 2.1. Antenas..... | 43 |
| 2.1.1. Definición..... | 43 |
| 2.1.2. Características de las antenas..... | 44 |
| 2.1.2.1. Ganancia..... | 44 |
| 2.1.2.2. Relación señal al ruido (S/N)..... | 45 |
| 2.1.2.3. Diagrama de radiación..... | 46 |
| 2.1.2.4. Polarización..... | 50 |
| 2.1.2.5. Tipos de antenas..... | 52 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.2. | Cables | 59 |
| 2.3. | Pigtail | 62 |
| 2.4. | Conectores | 63 |
| 2.4.1. | Conector tipo N..... | 64 |
| 2.4.2. | Conector tipo BNC..... | 65 |
| 2.4.3. | Conector tipo TNC..... | 66 |
| 2.4.4. | Conector tipo SMA | 66 |
| 2.4.5. | Conector tipo SMC | 68 |
| 2.4.6. | Conector tipo APC-7..... | 68 |
| 2.4.7. | Conector tipo SMB | 68 |
| 2.4.8. | Conector tipo RP-TNC..... | 69 |
| 2.4.9. | Conector tipo MCX | 69 |
| 2.4.10. | Conector tipo MMCX | 69 |
| 2.5. | Lighting Arrestor | 71 |
| 2.6. | Access Point..... | 72 |
| 2.7. | Adaptadores de redes inalámbricas | 73 |
| 2.7.1. | Tarjeta PCMCIA | 73 |
| 3. | PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTRÓMAGNETICAS..... | 75 |
| 3.1. | Frente de Ondas..... | 75 |
| 3.1.1. | Frente de Onda plano..... | 76 |
| 3.1.2. | Frente de Onda de una Fuente Puntual | 77 |
| 3.1.3. | Frente de Onda Esférica | 78 |
| 3.2. | Pérdidas de la señal en el espacio libre | 79 |
| 3.2.1. | Atenuación. | 80 |
| 3.2.1.1. | Modelo de propagación en el espacio libre. | 80 |
| 3.2.2. | Absorción. | 81 |
| 3.3. | Propagación de Ondas Electromagnéticas en el Entorno Terrestre..... | 83 |
| 3.3.1. | Refracción | 83 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.3.2. | Reflexión | 85 |
| 3.3.3. | Difracción | 85 |
| 3.3.4. | Interferencia | 86 |
| 4. | PRESUPUESTO DE ENLACE | 88 |
| 4.1. | Elementos de un Presupuesto de Enlace | 88 |
| 4.1.1. | Lado de Transmisión | 90 |
| 4.1.1.1. | Potencia de Transmisión | 90 |
| 4.1.1.2. | Pérdidas en el Cable | 90 |
| 4.1.1.3. | Pérdidas en los Conectores | 92 |
| 4.1.1.4. | Pérdidas en el Lightning Protector | 92 |
| 4.1.1.5. | Amplificadores desde el Transmisor | 92 |
| 4.1.1.6. | Ganancia de Antena desde el Transmisor | 93 |
| 4.1.2. | Perdidas de Propagación | 94 |
| 4.1.2.1. | Pérdidas en el Espacio libre | 94 |
| 4.1.2.2. | Zonas de Fresnel | 95 |
| 4.1.3. | Lado del Receptor | 96 |
| 4.1.3.1. | Amplificadores desde el Receptor | 96 |
| 4.1.3.2. | Ganancia de Antena desde el Receptor | 97 |
| 4.1.3.3. | Sensibilidad del Receptor | 97 |
| 4.1.3.4. | Margen de Enlace | 98 |
| 4.1.3.5. | Relación Señal a Ruido (S/N) | 98 |
| 5. | DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE WIFI | 99 |
| 5.1. | Aspectos Generales | 99 |
| 5.1.1. | Radios | 99 |
| 5.1.2. | Antenas | 100 |
| 5.1.2.1. | Construcción de las Antenas Direccionales | 100 |
| 5.1.2.2. | Medición de la Ganancia de las Antenas Direccionales | 102 |

| | | |
|---------------------------|--|------------|
| 5.1.3. | Cables y Conectores | 104 |
| 5.2. | Lado Transmisor..... | 104 |
| 5.2.1. | Configuración del Radio | 104 |
| 5.3. | Pérdidas por Propagación | 105 |
| 5.4. | Lado Receptor | 106 |
| 5.4.1. | Configuración del Radio | 106 |
| 5.4.2. | Sensibilidad del receptor | 106 |
| 5.4.3. | Potencia Recibida en la antena receptora..... | 107 |
| 5.4.4. | Relación Señal a Ruido (S/N) y Margen de Enlace..... | 107 |
| CONCLUSIONES | | 109 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | | 111 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Espectro Electromagnético..... | 30 |
| Figura 2. Sistema FHSS..... | 37 |
| Figura 3. Sistema DSSS..... | 36 |
| Figura 4. Espectro y Ortogonalidad de OFDM..... | 39 |
| Figura 5. Diagrama tridimensional de una antena tipo Bocina y los planos principales E y H..... | 47 |
| Figura 6. Diagrama de radiación en coordenadas polares y en Coordenadas Cartesianas..... | 49 |
| Figura 7. Parámetros del diagrama de radiación..... | 49 |
| Figura 8. Patrón de Radiación de las Antenas Direccionales..... | 53 |
| Figura 9. Antena Direccional Tipo Parche..... | 54 |
| Figura10. Patrón de Radiación de la antena D-Link ANT24-1400 (14 dBi High Gain Directional Panel Antenna)..... | 54 |
| Figura 11. Patrón de Radiación de la antena ANT 24PGA24 de 24dBi..... | 55 |
| Figura 12. Patrón de Radiación de una Antenas Omnidireccional..... | 56 |
| Figura 13. Cobertura de una antena omnidireccional..... | 57 |
| Figura 14. Patrón de Radiación de la antena sectorial ANT 24PSA13 de 12.5 dBi..... | 58 |
| Figura 15. Arreglo de 360° de antenas sectoriales..... | 59 |
| Figura 16. Cable Par trenzado Cable Coaxial..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 17. Pigtail RSMA hembra a N macho | 62 |
| Figura 18a. Conector N Macho tipo recto | 64 |
| Figura 18b. Conector N Hembra tipo recto | 64 |
| Figura 19a. Conector BNC Macho tipo recto | 65 |
| Figura 19b. Conector BNC Hembra tipo recto | 65 |
| Figura 20a. Conector TNC Macho tipo recto | 66 |
| Figura 20b. Conector TNC Hembra tipo recto | 66 |
| Figura 21a. Conector N Macho tipo recto | 67 |
| Figura 21b. Conector SMA Hembra tipo recto | 67 |
| Figura 22. Conector SMC Macho | 68 |
| Figura 23a. Conector MCX Macho tipo Codo..... | 69 |
| Figura 23b. Conector MCX Hembra tipo recto | 69 |
| Figura 24a. Conector MMCX Hembra en tarjeta PCMCIA Zcom XI-325HP+ 300W..... | 70 |
| Figura 24b. Conector MNCX Macho (Plug)..... | 70 |
| Figura 25a. Lightning Arrestor para cable UTP | 71 |
| Figura 25b. Lightning Arrestor para cable coaxial | 71 |
| Figura 26. Principio de funcionamiento del Lighting Protector..... | 72 |
| Figura 27. Tarjeta PCMCIA..... | 74 |
| Figura 28. Frente de Onda plano..... | 76 |
| Figura 29. Frente de onda producido por una fuente puntual..... | 77 |
| Figura 30. Frente de Onda producido Esférico | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31. Atenuación de la onda Electromagnética por A: lluvia, B: niebla y C: componentes gaseosos..... | 82 |
| Figura 32. Refracción de Ondas..... | 84 |
| Figura 33. Reflexión de Ondas..... | 85 |
| Figura 34. Difracción de Ondas..... | 86 |
| Figura 35a. Máxima Amplificación..... | 87 |
| Figura 35b. Anulación Completa | 87 |
| Figura 36. Trayectoria completa de transmisión entre el transmisor y el receptor. | 89 |
| Figura 37. Potencia en dBm en función de las distancia para un radioenlace.... | 89 |
| Figura 38. Zona de Fresnel..... | 95 |
| Figura 39. Montaje antena guía de onda | 101 |
| Figura 40. Esquema del enlace empleado para la medición de la Ganancia de la antena direccional..... | 103 |
| Figura 41. Configuración del radio DWL-2100AP lado transmisor como Access Point..... | 105 |
| Figura 42. Configuración LAN del radio DWL-2100AP lado transmisor..... | 105 |
| Figura 43. Configuración del radio DWL-2100AP lado receptor como Repetidor | 106 |
| Figura 44. Configuración LAN del radio DWL-2100AP lado receptor..... | 106 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1. Estándares del IEEE 802.11..... | 34 |
| Tabla 2. Técnicas de Modulación utilizadas por OFDM..... | 40 |
| Tabla 3. Impedancia y pérdidas por unidad de longitud para diferentes cables..... | 61 |
| Tabla 4. Valores típicos de pérdida en los cables para 2,4GHz..... | 91 |
| Tabla 5. Valores típicos de la sensibilidad del receptor de las tarjetas de red inalámbrica..... | 97 |
| Tabla 6. Resumen de datos obtenidos en la medición de las Potencias Radiadas de ambas antenas y cálculo de la ganancia de la antena direccional | 103 |
| Tabla 7. Resumen de datos de las Potencias Radiadas (medidas y teóricas) de ambas antenas y cálculo del porcentaje de error..... | 103 |
| Tabla 8. Cálculo de Perdidas debido a cada Pigtail (cableado y conectores).... | 104 |
| Tabla 9. Niveles de sensibilidad del Access Point DWL D-Link 2100AP..... | 107 |
| Tabla 10. Comparación de la Potencia Recibida en la Antena Receptora medida y teórica..... | 107 |
| Tabla 11. Cálculo del margen de enlace para cada una de los niveles de la potencia de transmisión y los niveles máximos y mínimos de sensibilidad del receptor..... | 108 |

LISTA DE ANEXOS

- Anexo A.** Data Sheet de Antenas.
- Anexo B.** Data Sheet de Cables.
- Anexo C.** Data Sheet de Conectores.
- Anexo D.** Data Sheet de Lighting Arrestors.
- Anexo E.** Data Sheet de Access Points.
- Anexo F.** Cálculos del Enlace.
- Anexo G.** Grafica de las Mediciones realizadas

GLOSARIO

ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA: es un tipo de atenuación en la potencia de los enlaces inalámbricos causada por el oxígeno y vapor de agua de la atmósfera. La atenuación en el rango de frecuencias 2 a 14 GHz es de aproximadamente 0.01dB/milla lo cual no es muy significativo.

ACCESS POINT O PUNTO DE ACCESO: es el centro de las comunicaciones de la mayoría de las redes inalámbricas. El AP no solo es el medio de intercomunicación de todos los terminales inalámbricos, sino que también es el puente de interconexión con la red fija e internet.

AMPLIFICADOR: es un dispositivo eléctrico que incrementa la potencia o ganancia de una señal inalámbrica con el fin de enviarla a distancias más largas. Desgraciadamente, los amplificadores también incrementan el ruido y otras señales no deseadas al amplificar la señal original.

ANCHO DE BANDA: es la cantidad de datos reales (carga útil) que se pueden transmitir por un canal en una unidad de tiempo. Generalmente se mide en bits por segundo. Generalmente siempre es menor a la tasa de transferencia máxima permitida por el sistema.

ANTENA: Una antena es un dispositivo que permite la emisión y recepción de ondas electromagnéticas (ondas de radio). Esto quiere decir que las antenas convierten las señales eléctricas en ondas electromagnéticas, y viceversa.

ATENUACIÓN: es la disminución en la fuerza de la señal que ocurre cuando una señal inalámbrica viaja a través de una línea de transmisión, a través del aire o debido a obstáculos en su trayectoria.

BANDA DE FRECUENCIAS: es un rango de frecuencias del espectro radioeléctrico. El espectro radioeléctrico está dividido en bandas de frecuencias que regulatoriamente son utilizadas para distintas finalidades.

CABLE COAXIAL: es un tipo de línea de transmisión diseñada para transportar señales de microondas con una atenuación mínima. Consiste en un conductor central rodeado por una espuma líquida o por aire y uno o dos apantallamientos metálicos.

CANAL: la banda de frecuencias en la que trabaja una red inalámbrica se divide en canales. Por cada canal se puede establecer una comunicación.

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance): Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Evitación de Colisión. Es el sistema que emplea Wi-Fi para negociar las comunicaciones entre los distintos dispositivos. Este sistema evita que dos dispositivos puedan intentar hacer uso del medio simultáneamente (Evita la Colisión)

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection): Acceso Múltiple por Detección de Portadora con Detección de Colisión. Es el sistema que emplean las redes Ethernet para negociar las comunicaciones entre los distintos dispositivos. Este sistema detecta que dos dispositivos han intentado hacer uso del medio simultáneamente (detecta la Colisión) y hace que cada uno lo intente de nuevo en tiempos distintos.

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): Espectro Expandido por Secuencia Directa. Es la técnica de modulación utilizada por los sistemas IEEE 802.11b para transmitir datos a alta velocidad (11Mbps).

ESPECTRO EXPANDIDO: es un sistema de difusión de las señales radioeléctricas. Este sistema utiliza un ancho de banda mayor al estrictamente

necesario a cambio de conseguir reducir la vulnerabilidad a las interferencias y garantizar la coexistencia con otras transmisiones.

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum): Espectro Expandido por Salto de Frecuencia. Es una técnica de modulación utilizada tanto por los sistemas IEEE 802.11 como Bluetooth. Transmite datos de baja velocidad (1Mbps) por lo que en la versión 802.11b se sustituyó por el sistema DSSS para poder transmitir datos de alta velocidad (11Mbps)

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers): Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Es una asociación mundial de ingenieros de este sector. El IEEE forma también el comité de normalización que recomienda al ANSI (Organo estadounidense de normalización) sobre los estandares de tecnología de redes de área local.

MAC (Medium Access Control): Control de Acceso al Medio. Es un conjunto de protocolos de las redes inalámbricas que controla cómo los distintos dispositivos se comparten el uso del espectro radioeléctrico.

MODELO OSI: El modelo OSI (Open Systems Interconnection) de ISO fue una propuesta para la estandarización de las redes de ordenadores que permite interconectar sistemas abiertos y ofrece al usuario la posibilidad de garantizar la interoperatividad de los productos entre si. Este modelo tiene siete capas las cuales son, de inferior a superior, física, enlace, red, transporte, sesión, presentación y aplicación. El modelo OSI por sí mismo no es una arquitectura de red puesto que no especifica el protocolo que debe emplearse en cada capa.

MODULACIÓN: se llama modulación al hecho de distorsionar una señal eléctrica o radioeléctrica para que contenga la información a transmitir. Al proceso

contrario, extraer la información de una señal modulada, se le llama demodulación.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): Multiplexado Ortogonal por División de Frecuencia. Es una técnica de modulación utilizada por las redes de área local inalámbricas de alta velocidad (IEEE 802.11a e HiperLAN2). Permite transmitir datos de hasta 54Mbps.

PERDIDA EN EL CABLEADO: se refiere a la atenuación de la señal debida a los cables y conectores de una línea de transmisión. Esta pérdida es directamente proporcional a la longitud del cable y generalmente inversamente proporcional al diámetro del mismo. La pérdida adicional ocurre para cada conector usado y debe ser considerada al momento de calcular el presupuesto de enlace.

PERDIDAS EN EL ESPACIO LIBRE: una señal decrece al moverse a través del espacio. Entre más grande el camino mayor pérdida experimentará la señal.

PIGTAIL: es un pequeño cable, que sirve de adaptación entre la tarjeta WI-FI (o el AP) y la antena o el cable que vaya hacia la antena. Este cablel tiene 2 conectores: el propietario de cada tarjeta en un extremo, y por el otro un conector N estándar en la mayoría de los casos.

PRESUPUESTO DE ENLACE: es un cálculo de todos los elementos conocidos del enlace para determinar si la señal tendrá la fuerza apropiada cuando alcance el otro extremo del enlace.

PROTOCOLO: Procedimiento de arbitraje o de reglas que tiene como fin determinar cuál de los terminales está autorizado para transmitir por un medio y quien debe recibir el mensaje en determinado momento.

TARJETA DE RED INALAMBRICA: Tarjeta típica de red (con conectividad para LAN) pero diseñada y optimizada para entornos inalámbricos. Dependiendo de a quien vaya destinada existen diversos modelos: CompactFlash, PCI, PCMCIA, USB.

WECA (Wireless Ethernet Compability Alliance): Alianza de Compatibilidad Ethernet Inalámbrica. Es una asociación de fabricantes de equipos de red creada en 1999 con el objetivo de fomentar la tecnología inalámbrica y asegurarse la compatibilidad de equipos. WECA es la creadora de la marca Wi-Fi y es quien certifica los equipos con esta marca.

WEP (Wired Equivalency Protocol): Protocolo de Equivalencia con Red Cableada. Es el sistema de cifrado de datos que incorporan las redes Wi-Fi, el sistema WEP surgió con la idea de ofrecerle a las redes inalámbricas un estado de seguridad similar al que tienen las redes cableadas.

WI-FI (Wireless Fidelity): Fidelidad Inalambrica. Es una marca creadad por la asociación WECA con el objetivo de fomentar la tecnología inalámbrica y asegurarse la compatibilidad de equipos. Todos los equipos con la marca Wi-Fi son compatibles entre sí y utilizan la tecnología inalámbrica definida por el IEEE en su estándar 802.11b.

ZONA DE FRESNEL: Se llama zona de Fresnel al volumen de espacio entre el emisor de una onda electromagnética, acústica, etc, y un receptor, de modo que el desfase de las ondas en dicho volumen no supere los 180° . La zona de Fresnel es una zona de despeje adicional que hay que tener en consideración además de haber una visibilidad directa entre las dos antenas. Esto es debido a que toda la primera zona contribuye a la propagación de la onda. Por el contrario, la segunda zona tiene la fase invertida, de modo que su contribución es substractiva. En general, las zonas impares son positivas, mientras que las pares son negativas.

INTRODUCCIÓN

Se le llama comunicación inalámbrica a aquella que se realiza sin el uso de cables de conexiones entre los participantes, como ejemplos se pueden nombrar la comunicación a través de un teléfono celular, dispositivos Bluetooth o infrarrojo y por supuesto la comunicación en redes de tecnología Wi-fi.

Sin lugar a duda la tecnología inalámbrica está ocupando rápidamente un gran puesto en el mercado debido a que ha logrado capturar las preferencias de un alto número de usuarios. La telefonía móvil esta cada vez más cerca de convertirse en un sistema de comunicación personal universal en el mundo occidental, los teléfonos inalámbricos son empleados con mayor frecuencia tomando el lugar que han tenido los incómodos teléfonos con cables enrollados, y desde hace algún tiempo los computadores también se han estado liberando de sus ataduras. Cada vez son más los hogares, los cafés internet, pequeñas y grandes empresas que migran hacia redes inalámbricas de computadoras.

Aunque las tecnologías que hacen posible la comunicación inalámbrica (láser, infrarrojo, y radio, principalmente) existen desde hace muchos años, su implementación comercial no ha sido posible hasta fechas recientes.

El primer servicio que se liberó del cable fue la telefonía (transmisión de voz). La telefonía móvil apareció en los años setenta y poco a poco se ha ido desarrollando hasta superar a la tecnología fija¹.

¹ Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

La evolución de los computadores personales y el espectacular desarrollo de Internet están haciendo que la informática sea tan común en la vida diaria como lo es el teléfono. Existen computadores de escritorio, portátiles o PDA. Mientras que también se encuentra la informática en todo tipo de dispositivos de uso diario: desde autos o sistemas de calefacción caseros hasta los juguetes de los niños.

Todos estos dispositivos son susceptibles de comunicarse entre sí y, aunque pueden hacerlo por los sistemas de cables tradicionales, su mayor potencial se alcanza a través de las comunicaciones inalámbricas.

Encaminándonos hacia el tema que nos atañe, Wi-Fi, nos centramos ahora en las redes inalámbricas de datos, entendiendo éstas como un conjunto de computadores u otros dispositivos informáticos, comunicados entre sí mediante soluciones que no requieran el uso de cables de interconexión².

Las redes inalámbricas pueden ser clasificadas de distintas formas dependiendo del criterio que se tome, para este caso se hará según el alcance de las mismas de la siguiente manera:

Redes Inalámbricas de área Personal o WPAN son aquellas que cubren distancias menores a 10 metros. Dichas soluciones están pensadas para interconectar los distintos dispositivos de un usuario. Dentro de estas soluciones encontramos las tecnologías Bluetooth e Infrarrojo.

Redes Inalámbricas de área Local o WLAN son aquellas que cubren distancias de cientos de metros. Estas redes están pensadas para brindar conectividad a PC o terminales que se encuentran en el mismo edificio o grupo de edificios. Este es el caso de Wi-Fi o Home RF.

² Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

Redes Inalámbricas de área Metropolitana o WMAN pueden cubrir el área de una ciudad o entorno metropolitano. Los protocolos LMDS, o WiMAX ofrecen soluciones de este tipo.

Redes Globales pueden cubrir toda una región, país o grupo de países. Estas redes se basan en la tecnología celular y han aparecido como evolución de las redes de comunicación de voz. Este es el caso de las redes de telefonía móviles conocidas como 2.5G o 3G.

De acuerdo con la clasificación anterior las redes Wi-Fi hacen parte de las soluciones LAN, y de hecho la utilización de una red inalámbrica Wi-Fi es prácticamente idéntica a la de una red LAN cableada. Los computadores conectados a dicha red pueden comunicarse entre sí, compartir recursos y tener acceso a otras redes y a Internet. Para un usuario, de manera general, no existe diferencia entre estar conectado a una red cableada o a una red inalámbrica.

Adicionalmente las redes inalámbricas presentan algunas ventajas sobre las redes cableadas como lo son³:

Rapidez de implantación: Por lo general lo que consume mayor tiempo en la instalación de una red inalámbrica es paradójicamente la parte cableada que se emplea para enlazar los puntos de acceso con la red local del lugar donde se quiere implementar o la conexión con la red eléctrica de la misma y aunque por lo general la duración de los proyectos inalámbricos se miden en días, en el caso de redes fijas o cableadas no son días sino habitualmente semanas.

³ Arrazola, Guillermo y Badillo, Jacir. Monografía Análisis y Diseño de la Solución de Conectividad Wireless para la Universidad Tecnológica de Bolívar Campus de Ternera, Utilizando Tecnologías Wi-Fi.

Movilidad: como es evidente este es el punto más fuerte de las WLANs, lo cual es inalcanzable para las redes cableadas. Esta característica es más notable e interesante cuando se trata de cubrir salas de reunión, laboratorios, auditorios, es decir cualquier sitio donde haya equipos portátiles y en general donde se pueda facilitar reuniones de trabajo. La movilidad es un gran valor agregado comparada con las LANs cableadas ya que estas solo merman el trabajo a realizar, porque siempre que se quiere realizar una exposición, una ponencia o cualquier trabajo en que intervenga la conexión a la red hay que partir del hecho de donde se encuentra el punto de red, para después si poder planificar la posición en que se va a colocar el equipo siendo esta en algunos casos no la más apropiada.

Estética: Las instalaciones de redes locales se caracterizan por la existencia de infinidad de cajas de conexiones próximas a cada puesto de trabajo, canalizaciones generalmente visibles y cables desde los PCs hasta el punto de conexión más próximo. Todo ello y debido a la cada vez mayor densidad de equipos, impacta de forma muy negativa en la estética del entorno de trabajo.

Como contrapartida, en una instalación inalámbrica desaparecen los cables de los PCs y las rosetas, al igual que se reducen al mínimo las canalizaciones visibles. Este factor, siempre bien valorado, en ocasiones se convierte en fundamental, decidiendo la tecnología de la red a implantar.

Provisionalidad: Las WLANs tienen una gran utilidad en instalaciones que tienen carácter provisional, como despliegues cortos o limitados en el tiempo, para absorber fuertes picos de utilización ocasional, ya que las WLAN pueden soportar un número elevado de usuarios transitorios, mientras que las fijas están limitadas a las conexiones ya cableadas exclusivamente, y para permitir crecimientos urgentes en una red ya establecida hasta adoptar otras alternativas.

Robustez: Las redes basadas en cableado estructurado son por lo general más robustas frente a interferencias y condiciones adversas que las inalámbricas. Sin embargo en ciertos entornos en fábricas con elevada humedad, agentes químicos agresivos, calor, o en caso de excesiva corrosión, como en nuestra ciudad por ser costera, las instalaciones cableadas pueden sufrir una rápida degradación o ser inviables. Una instalación inalámbrica adecuadamente ubicada sería la solución idónea para resguardarse de dichas inclemencias.

No obstante hoy en día las soluciones inalámbricas tienen algunos inconvenientes: tienen un **Menor Ancho de Banda** (velocidad de transmisión) y en general son **más costosas** que las soluciones con cable.

El ancho de banda de las soluciones inalámbricas actuales se encuentra entre los 11 y 54 Mbps (aunque ya existen soluciones de tipo propietario que trabajan a 100Mbps), mientras que las redes cableadas alcanzan los 100Mbps. En lo referente al precio, aunque, en general, son más caras, en muchas ocasiones resultan no solo más baratas que su alternativa cableada, sino que muestran como la solución más conveniente.

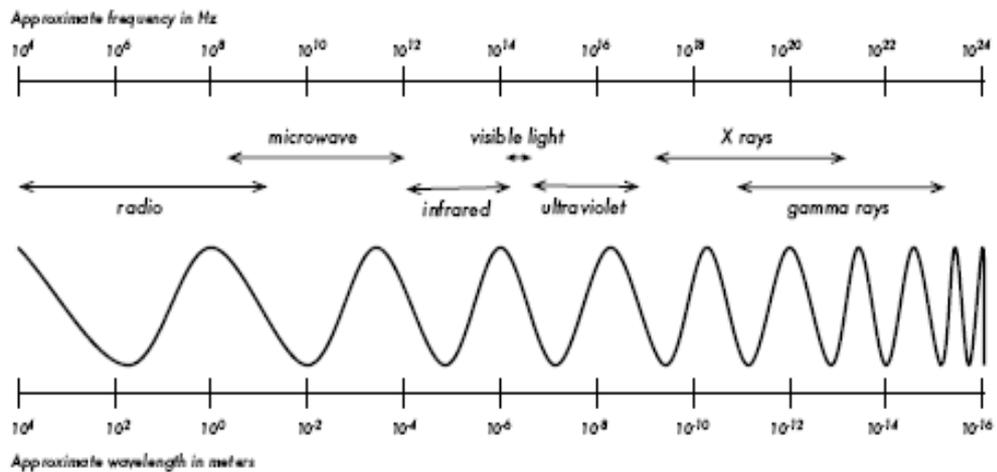
Las comunicaciones inalámbricas hacen uso de ondas electromagnéticas para enviar señales a través de largas distancias. En el desarrollo de este trabajo se indicaran y explicarán los conceptos y propiedades básicas para el entendimiento de las ondas y su comportamiento.

Las ondas electromagnéticas se extienden sobre un amplio rango de frecuencias. Este rango de frecuencias y longitudes de onda es llamado **espectro electromagnético**⁴. Ver figura 1.

⁴ Tomado de Wireless Networking in the Developing World. 1ª Edición. 2006

Este concepto es muy importante ya que todos los equipos que funcionan con tecnología inalámbrica usan bandas de operación de dicho espectro, y estas bandas dependiendo de la frecuencia son de uso libre o privado.

Figura 1. Espectro electromagnético



Tomado de **Wireless Networking in the Developing World. 1a Edición. 2006**

En nuestro caso es de importancia la región de **Radio frecuencias** la cual corresponde a las ondas que pueden ser generadas aplicando corriente alterna a una antena. El rango real de esta región es de 3Hz hasta los 300GHz, sin embargo suele limitarse a 1GHz y a la zona de 1GHz a 300GHz se le llama **microondas**.

Es justamente en la zona de microondas donde se producen las transmisiones de las redes Wi-Fi. 2.412GHz a 2.484GHz (correspondiente a una longitud de onda de 12.5cm aproximadamente) usado por los estándares 802.11b y 802.11g, y el rango de 5.170GHz a 5.805GHz (longitud de onda de 5 o 6 cm) usado por el estándar 802.11a.

1. GENERALIDADES DE WI-FI

Ciertamente, se puede construir una red Wi-Fi sin saber cómo funciona; no obstante, si se comprende su funcionamiento, se estará en una mejor disposición para entender qué está pasando cuando algo no va como se espera. Por otro lado, también ayuda a entender mejor las características de los distintos equipos Wi-Fi y cuáles son las posibilidades reales⁵.

En este orden de ideas se procede describir los miembros de la familia de estándares agrupados bajo la IEEE 802.11 y posteriormente nos enfocaremos en los principios generales en los que está basado el funcionamiento de dicha familia.

1.1. Redes inalámbricas 802.11 - Wi Fi

Cuando hacemos referencia a Wi-Fi nos referimos al conjunto de estándares IEEE 802.11, los cuales se amplían a continuación.

1.1.1. Estándar IEEE 802.11b

Es la primera extensión del 802.11 para WLAN, fue ratificada por la IEEE el 16 de Septiembre de 1999. Este estándar es probablemente el más popular de la familia.

Utiliza una modulación llamada Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) en una porción del espectro electromagnético comprendido entre la banda de 2,412GHz y la banda de 2,484GHz.

⁵ Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

La IEEE estandarizó la velocidad de transmisión en 11Mbps, sin embargo se alcanzan velocidades de 22Mbps por el desdoblamiento de la velocidad que ofrecen algunos fabricantes pero sin la estandarización del IEEE.

Padece de varios de los inconvenientes como son la falta de QoS, la masificación de la frecuencia en la que transmite y recibe, ya que en los 2.4Ghz funcionan teléfonos inalámbricos, teclados, ratones y otros dispositivos inalámbricos, lo cual puede provocar interferencias.

Sin embargo por otro lado tuvo una rápida adopción por parte de una gran comunidad de usuarios debido principalmente al bajo costo de sus dispositivos, la gratuidad de la banda que usa y su disponibilidad gratuita alrededor de todo el mundo.

1.1.2. Estándar IEEE 802.11g

Es la tercera aproximación a las redes inalámbricas, fue finalizada en Junio de 2003 y a pesar de ser la tecnología más reciente en el mercado se posicionando en un lugar privilegiado.

El 802.11g utiliza el mismo rango del espectro electromagnético que el IEEE 802.11b (de 2.412GHz a 2,484GHz), sin embargo emplea modulación llamada Ortogonal Frecuency Division Multiplexing (OFDM), con la cual se alcanzan velocidades de hasta 54Mbps, pero puede reducirla a 11Mbps o menos para lograr la compatibilidad con equipos basados en el 802.11. Por supuesto que al igual que en los casos anteriores existen versiones propietarias de esta tecnología que ofrecen velocidades de hasta 108Mbps, pero no estandarizadas por la IEEE.

Dispone de las mismas ventajas e inconvenientes que el 802.11b

1.1.3. Estándar IEEE 802.11a

Fue la segunda aproximación a las redes inalámbricas, también fue ratificada por la IEEE el 16 de Septiembre de 1999.

Este estándar también utiliza modulación OFDM y posee una velocidad de transmisión de hasta 54Mbps según el estándar de la IEEE y hasta 72 y 108Mbps con tecnologías de desdoblamiento de velocidad de carácter propietario ofrecidas por diferentes fabricantes, pero que no están estandarizadas por el IEEE.

Esta variante opera dentro del rango de 5.170Ghz a 5.320GHz y de 5,745 a 5.805GHz.

Sus principales ventajas son su velocidad, la base instalada de dispositivos de este tipo, la gratuidad de la frecuencia que usa y la ausencia de interferencias en la misma.

Sus principales desventajas son su incompatibilidad con los estándares 802.11b y 802.11g, el hecho de que a mayor frecuencia menor rango de alcance para una potencia determinada y el rango de frecuencia en el cual trabaja no es de uso libre en todo el mundo.

1.1.4. Estándar IEEE 802.11n

Esta enmienda del 802.11 se encuentra en etapa de desarrollo. La IEEE 802.11n⁶ 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

⁶ Tomado de <http://www.oreilly.com/catalog/802dot112/chapter/ch15.pdf>

introducción del concepto de MIMO (Multiple Input, Multiple Output), múltiples-entradas múltiples-salidas. MIMO implica utilizar varios transmisores y múltiples receptores para aumentar la tasa de transferencia y el alcance. Muchos expertos afirman que MIMO es el futuro de las redes inalámbricas⁷.

La tabla 1 muestra un resumen y una breve comparación de los estándares del IEEE 802.11 respecto de tasa de transmisión

Tabla 1. Estándares del IEEE 802.11

| ESTÁNDAR | FRECUENCIA | TÉCNICA DE MODULACIÓN | TASA NOMINAL DE TRANSMISIÓN | DESCRIPCIÓN |
|--------------|------------|-----------------------|-----------------------------|--|
| IEEE 802.11a | 5 GHz | OFDM | 54 Mbps | 8 Canales no solapados. No ofrece QoS |
| IEEE 802.11b | 2.4 GHz | DSSS, CCK | 11 Mbps | 14 canales solapados. |
| IEEE 802.11g | 2.4 GHz | OFDM, DSSS, CCK | 54 Mbps | 14 canales solapados. Compatibilidad con IEEE 802.11b |
| IEEE 802.11n | 2.4 GHz/? | OFDM | 360/540 Mbps | Mejora los estándares anteriores agregando MIMO que aprovecha transmisores múltiples para aumentar el rendimiento mediante multiplexación espacial |

Tomado de <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

1.2. Funcionamiento de Wi-Fi

Una red Wi-Fi al igual que una red cableada puede estar formada por un par de computadores o por miles de ellos, sin embargo para que un PC pueda acceder a

⁷ Tomado de <http://www.zdnetindia.com/insight/communication/stories/129508.html>

una red inalámbrica debe contar con un **Adaptador de red**, el cual es un equipo de radio que le permite el acceso a la red inalámbrica de PC o cualquier otro equipo que se desee conectar a la red. De manera general, los equipos que hace parte de la red se les denominan **Terminales**.

Adicional a los adaptadores de red, una red Wi-Fi debe disponer de estaciones base para gestión de las comunicaciones (**AP o Access Points**), estos AP funcionan de forma independiente por lo que no requieren estar conectados a un computador.

De manera general tanto a las terminales como a los AP se les denomina **Estación**. Dichas estaciones se comunican entre sí debido a que comparten la misma banda de frecuencias y a que internamente tienen instalados el mismo conjunto de protocolos, que si bien están basados en el sistema de siete capas del modelo OSI, la norma IEEE 802 define de manera exclusiva los temas relacionados con las dos primeras capas (Física y Enlace), el resto de capas pertenecen a la suite del protocolo IP.

1.2.1. Capa Física

La capa física es la capa encargada de definir los métodos por los cuales se difunde la señal, con este fin el estándar 802.11 divide esta capa en dos subcapas:

- **PLCP (Procedimiento de Convergencia de la Capa Física):** Se encarga de convertir los datos a un formato compatible con el medio físico.
- **PMD (Dependiente del Medio Físico):** Es la subcapa encargada de la difusión de la señal.

1.2.2. Espectro Expandido

La tecnología en la cual se encuentra basado el funcionamiento de los sistemas inalámbricos es conocida como Spread Spectrum (Espectro expandido) y consiste en una técnica por la cual la una señal de pequeño ancho de banda que va a ser transmitida es extendida a lo largo de una banda de frecuencia más amplia. Este ensanchamiento, implica una mayor resistencia a la interferencia de señales no deseadas⁸.

Existen fundamentalmente tres formas de espectro ensanchado:

- FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum o Espectro expandido por Saltos en Frecuencia)
- DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum o Espectro Expandido por Secuencia Directa)
- OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing o División de Frecuencia ortogonal)

1.2.2.1 FHSS

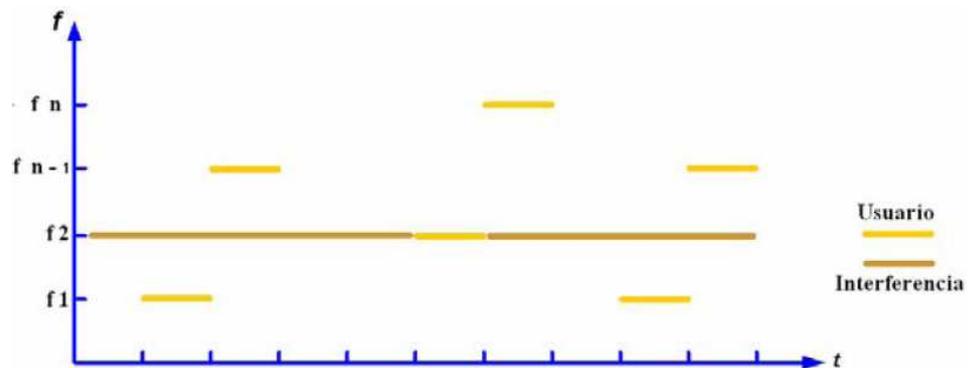
Esta técnica consiste en dividir el espectro disponible en una serie de sub-bandas o canales e ir transmitiendo la información saltando de un canal a otro. Las transmisiones se realizan en diferentes canales en diferentes momentos. La clave está en que la secuencia de saltos de canales es conocida, no solo por el transmisor que la genera, sino también por el receptor, por lo que este puede

⁸ Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

seguir la secuencia y demodular la señal recibida en cada canal. Si un receptor no conoce la secuencia de saltos, no podrá comprender la señal recibida⁹.

La técnica FHSS reduce la interferencia porque en el peor de los casos, la interferencia, aun si es muy elevada la potencia de la señal interferente, afectará solo a unos pocos canales a la vez, por lo que el número de bits erróneos es extremadamente bajo. En la figura 2 se observa un esquema de FHSS,

Figura 2. Sistema FHSS



Tomado de http://www.gta.ufrj.br/grad/01_2/home-rf/fig1.jpg

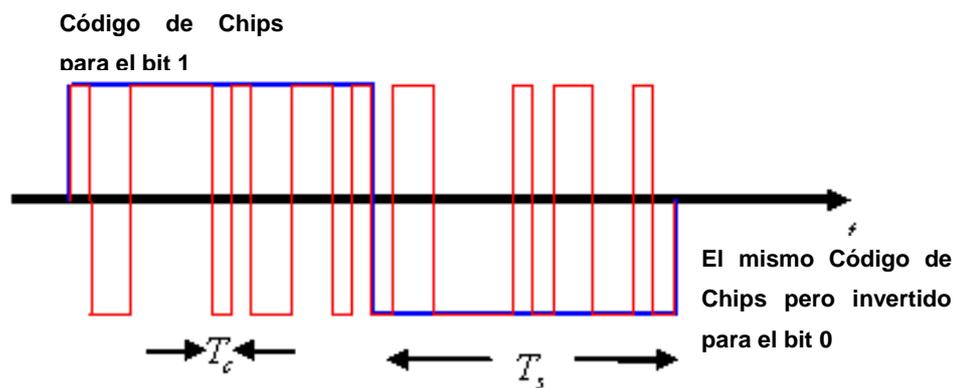
1.2.2.2 DSSS

La técnica de DSSS se basa en la sustitución de cada bit de información por una secuencia de bits conocida como **Chip** o **Código de Chip**. Estos códigos permiten a los receptores eliminar por filtrado las señales que no utilizan la misma

⁹ Tomado de Barrios, Cristian Camilo y Carrascal, Yanira Ulianova. Monografía Estudio de la Tecnología Wi- Fi, para Acceso Inalámbrico a Redes de Comunicaciones Electrónicas de Ámbito Reducido.

secuencia de bits. Entre las señales eliminadas se encuentran el ruido y las interferencias¹⁰. La figura 3 muestra lo mencionado anteriormente.

Figura 3. Sistema DSSS



Tomado de <http://zone.ni.com/cms/images/devzone/tut/a/83d9fd4176.gif>

El empleo de este Código de Chip permite al receptor asociar los datos que recibe a un emisor determinado por lo que en teoría es posible que funcionen de manera simultánea varios sistemas DSSS, ya que cada receptor filtrará exclusivamente los datos que correspondan con su Código de Chip.

En la práctica, la coexistencia de distintos Códigos de Chips no se consigue con el uso de diferentes códigos sino mediante el uso de diferentes bandas de frecuencia. Un sistema DSSS de 11Mbps (802.11b) necesita un ancho de banda de 22MHz, para una distancia mínima entre portadoras de 30MHz.

Como el ancho de banda disponible en la banda de los 2,4GHz es de 83,5MHz, sólo es posible la coexistencia de tres sistemas DSSS en el mismo lugar.

¹⁰ Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

1.2.2.3 OFDM

Esta técnica se caracteriza por separar la información a transmitir en varios subconjuntos de menor tamaño, enviando símbolos simultáneamente en cada canal. De esta manera se consigue: alta eficiencia espectral, resistencia a las interferencias de banda estrecha y se evita la distorsión multitrayecto.

OFDM divide la frecuencia portadora en 52 subportadoras. 48 de ellas se emplean para la transmisión de datos, mientras que las 4 restantes se emplean para poder alinear las frecuencias en el receptor. Para maximizar la eficiencia espectral, las subportadoras se solapan entre si, sin embargo lo hacen de tal manera que a determinadas frecuencias, las contribuciones de cada subportadora sean nulas para las demás. Esto se debe a la ortogonalidad de los canales, la señal de un canal no interfiere con la de los canales adyacentes porque el máximo del espectro de un canal coincide con los ceros en amplitud de los canales linderos. Ver figura 4.

Figura 4. Espectro y ortogonalidad de OFDM.



Tomado de <http://www.wwsinternational.com.au/DataLinc/articles/spsptech2.jpg>

OFDM puede transmitir datos a diferentes velocidades por medio del empleo de distintas técnicas de modulación en cada una de ellas. Ver tabla 2. Las velocidades estandarizadas que admite OFDM son 6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, y 54Mbps.

Tabla 2. Técnicas de Modulación utilizadas por OFDM.

| VELOCIDAD | TÉCNICA DE MODULACIÓN | BITS POR SEÑAL |
|-----------|-----------------------|----------------|
| 6Mbps | BPSK | 1 |
| 9Mbps | BPSK | 1 |
| 12Mbps | QPSK | 2 |
| 18Mbps | QPSK | 2 |
| 24Mbps | QAM -16(BPSK) | 4 |
| 36Mbps | QAM -16(BPSK) | 4 |
| 48Mbps | QAM -64(QPSK) | 6 |
| 54Mbps | QAM -64(QPSK) | 6 |

Tomado de Carballar, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición. 2005

1.2.3. La capa MAC (Control de acceso al medio)

La MAC define los procedimientos que hacen posible que los distintos dispositivos compartan el uso del espectro electromagnético. Mientras que las distintas versiones del estándar 802.11 utilizan distintos sistemas para difundir su señal (su capa física es distinta), la capa MAC es la misma para todas ellas.

Es fundamental considerar que el medio es abierto, en el sentido que pueden coexistir múltiples emisores y receptores en el mismo espacio físico, por lo que es vital el implantar un mecanismo robusto y eficiente de diálogo.

La solución llegó por la modificación del muy conocido protocolo de acceso al medio desarrollado para las redes Ethernet cableadas, el IEEE 802.3 Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD). El nuevo protocolo, CSMA/CA (Collision Avoidance), impone a una estación que desee transmitir que previamente escuche el medio para detectar si otro emisor está realizando esta función. Si es así, esperará un tiempo aleatorio para sondear de nuevo el medio. Cuando detecte que el medio está libre, emitirá una solicitud de ocupación que

será escuchada por el sistema que gestione los permisos (el punto de acceso). Si se le concede el acceso, podrá realizar la emisión. De esta forma también se evita un conocido problema denominado del “nodo oculto”, donde dos nodos dentro de una celda gobernada por un punto de acceso tienen cobertura suficiente para acceder a él, pero están entre sí lo suficientemente alejados para no detectar sus respectivas peticiones (mecanismo RTS/CTS).

Como ya se mencionó anteriormente, las redes inalámbricas IEEE 802.11 están formadas por terminales y puntos de acceso y ambos reciben el nombre de estaciones. La capa MAC define cómo las estaciones acceden al medio mediante **Servicios de Estaciones**. De la misma manera, define como los puntos de acceso gestionan la comunicación mediante **Servicios de distribución**.

1.2.3.1 Servicios de Estaciones de la Capa MAC

Los servicios de estación de la capa MAC son los siguientes:

- **Autenticación:** Comprueba la identidad de una estación y la autoriza para asociarse. En una red cableada lo que identifica a una estación es el hecho de que dicha estación se encuentra físicamente conectada a la red, sin embargo en el caso de Wi-Fi por no haber conexión física se debe comprobar su identidad antes de autorizar la asociación con el resto de la red.
- **Desautenticación:** Cancela una autenticación existente. Este servicio da por concluida la conexión cuando una estación pretende desconectarse de la red.
- **Privacidad:** Evita el acceso no autorizado a los datos gracias al uso del algoritmo **WEP (Wired Equivalency Protocol o Protocolo de**

Equivalencia con Red Cableada). Este algoritmo pretende emular el nivel de seguridad que se tiene en las redes cableadas.

- **Entrega de Datos:** Facilita la transferencia de datos entre estaciones.

1.2.3.2 Servicios de Distribución de la Capa MAC

Los servicios de distribución de la capa MAC son los siguientes:

- **Asociación:** este servicio significa asignación del terminal al Punto de Acceso haciendo que éste último sea el responsable de la distribución de los datos a y desde dicho terminal. En redes que poseen más de un Punto de Acceso, un terminal solo puede estar asociado a un Punto de Acceso a la vez.
- **Desasociación:** Cancela una asociación existente, ya sea porque el terminal sale del área de cobertura o porque el Punto de acceso termina la conexión.
- **Reasociación:** Transfiere una asociación entre dos Puntos de Acceso. Cuando un terminal se mueve de un área de cobertura de un Punto de Acceso a la de otro, su asociación pasa a depender de éste último.
- **Distribución:** Cuando se transfieren datos de un terminal a otro, el servicio de distribución se asegura de que los datos alcanzan su destino.
- **Integración:** Facilita la transferencia de datos entre la red inalámbrica IEEE 802.11 y cualquier otra red (Intranet o Internet).

Los Puntos de Acceso hacen uso tanto de los servicios de estaciones como de los servicios de distribución, mientras que los terminales sólo utilizan los servicios de estaciones.

2. ELEMENTOS DE UN ENLACE

La mayoría de las redes inalámbricas que existen en el mercado (sean Wi-Fi u otro tipo) funcionan de manera similar: tienen unas estaciones base (Access Points) que coordinan las comunicaciones y unas tarjetas de red que se instalan en los computadores y que les permiten formar parte de la red. Adicionalmente existen antenas que permiten extender el alcance de los equipos Wi-Fi.

En este capítulo se describen los elementos necesarios para establecer una red Wi-Fi, así como las características más importantes de dichos elementos.

2.1. Antenas

2.1.1. Definición

Una antena es un dispositivo que permite la emisión y recepción de ondas electromagnéticas (ondas de radio). Esto quiere decir que las antenas convierten las señales eléctricas en ondas electromagnéticas, y viceversa.

Todos los equipos Wi-Fi ya incorporan sus propias antenas. No obstante, cuando se desea disponer de una red de mayor alcance o cobertura, a veces, resulta conveniente sustituir la antena incorporada en el equipo Wi-Fi por otra exterior con mayor ganancia.

La mayoría de las antenas que incorporan los equipos Wi-Fi son antenas internas. Esto quiere decir que son antenas que vienen incluidas dentro de la unidad del punto de acceso o del adaptador de red (tarjeta PCMCIA o dispositivo USB).

Las antenas internas ofrecen la gran ventaja de la comodidad al formar parte del propio dispositivo, pero tienen el inconveniente del alcance.

Si se necesita aumentar el alcance sin instalar nuevos puntos de acceso, la mejor solución es colocar una antena externa. Con una buena antena externa, la señal Wi-Fi de un punto de acceso puede llegar a superar los 15 km de alcance siempre que no haya obstáculos, como edificios o árboles, y que la antena esté bien colocada.

Una antena es un elemento irradiante, emite la señal que le inyecta la etapa final de cualquier aparato de radio. A continuación se explican las clases de antenas que se trabajan en la frecuencia de 2.4Ghz que son las usadas para 802.11b y 802.11g. (Ver anexo A –Data Sheet de Antenas-)

2.1.2. Características de las antenas

2.1.2.1. Ganancia

La ganancia en las antenas representa la relación entre la intensidad de campo que produce dicha antena en un punto determinado y la intensidad de campo que produce una antena isotrópica en el mismo punto y en las mismas condiciones. Una antena es mejor cuanto mayor es su ganancia.

El valor de la ganancia de una antena se mide en decibelios (dB). No obstante, como para calcular la ganancia de una antena se toma como referencia a la antena isotrópica, el valor de la ganancia se representa en dBi (decibelios en relación a la antena isotrópica).

2.1.2.2. Relación señal al ruido (S/N)

En las telecomunicaciones uno de los mayores problemas de los sistemas de radio es la emisión, ya que cuando se emiten datos, no solamente se emiten datos, sino que mezclado con los datos se emiten ruidos. Tal problema también se presenta en la recepción, ya que cuando se reciben datos mezclado con ruidos.

El nivel de señal recibido en el equipo podrá ser calculado y/o medido, manteniéndose relativamente estable en el tiempo, a no ser que existan cambios en el sistema de transmisión y/o cambios en las condiciones de propagación entre los puntos que estamos comunicando. Con el ruido eléctrico no ocurre lo mismo y este será variable e incontrolable por nosotros ya que es generado por muchas fuentes de diversa índole, sobre las cuales no tenemos ningún control, pudiendo cambiar su nivel en forma bastante aleatoria hasta llegar a ser una fuente de serios problemas para nuestro enlace.

Para que un enlace de radio se establezca, la señal recibida deberá ser igual o superior a la sensibilidad del receptor. Esta sensibilidad mínima está dada por el ruido eléctrico generado en forma local por los circuitos electrónicos asociados a lo que regularmente se llama etapa de entrada del receptor y es producido por la agitación térmica de los electrones de sus componentes. Si a ese receptor se conecta una antena externa y además se ubica en altura con el objeto de conseguir más distancia, también se está exponiendo a “capturar” más ruido eléctrico y por lo tanto se logra “desensibilizar” el receptor ya que, normalmente ese ruido, es de mayor nivel que la sensibilidad del receptor.

Una de las posibilidades para establecer el enlace teniendo en cuenta que la sensibilidad del receptor esta variando, es estimar el nivel máximo de ruido que se espera encontrar, basado en la experiencia y utilizar ese valor para calcular el

nivel de señal que se necesita, corriendo el riesgo que la estimación nos lleve a implementar una solución más compleja y costosa que lo necesario. Otra forma de resolver el problema es medir el enlace y el nivel de ruido presente y establecer la relación existente entre ellos, es decir, medir la señal/ruido. Con esto logramos conocer cuanta es la diferencia y si es lo suficientemente amplia como para “absorber” los cambios en el nivel de ruido. Si la diferencia es pequeña, las probabilidades de que el enlace se interrumpa es alto. En caso de lo contrario, el enlace se mantendrá más estable en el tiempo. Cuanto mayor sea esa relación mayor será el margen que se tiene para que el ruido aumente sin que se interrumpa el enlace. Esta es una de las razones por lo cual, un enlace bien diseñado, deberá tener un margen suficiente como para evitar que, por razones externas, se vea interrumpido.

2.1.2.3. Diagrama de radiación

Un diagrama de radiación es una representación grafica de las propiedades de radiación de la antena, en función de las distintas direcciones del espacio, a una distancia fija. Normalmente se empleará un sistema de coordenadas esféricas. Con la antena situada en el origen y manteniendo constante la distancia se expresará el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ, Φ). Como el campo es una magnitud vectorial, habrá que determinar en cada punto de la esfera de radio constante el valor de dos componentes ortogonales.

Como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de cualquiera de las dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

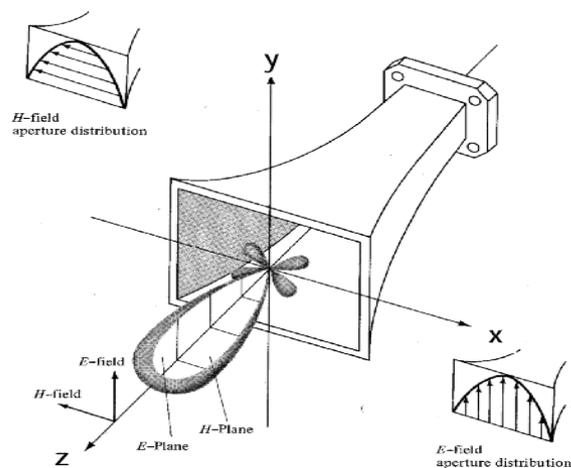
La densidad de potencia es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico, por lo que la representación grafica de un diagrama de potencia contiene la misma información que un diagrama de radiación de campo.

En determinadas circunstancias puede ser necesaria la representación gráfica de la fase $E(\theta, \Phi)$, además de la amplitud de las dos componentes. Dicha representación se denomina el diagrama de fase de la antena.

El diagrama de radiación de se puede representar en forma tridimensional utilizando técnicas graficas diversas, como las curvas de nivel o el dibujo en perspectiva.

Para antenas linealmente polarizadas se define el “plano E” como el que forman la dirección de máxima radiación y el campo eléctrico en dicha dirección. Análogamente, el “plano H” es el formado por la dirección de máxima radiación y el campo magnético en dicha dirección. Ambos planos son perpendiculares y su intersección determina una línea que define la dirección de máxima radiación de la antena. Ver figura 5.

Figura 5. Diagrama tridimensional de una antena tipo bocina y los planos principales E y H.



Tomado de http://www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp_tema2.pdf

Los cortes al diagrama tridimensional se pueden hacer de muchas formas. Los más habituales son los que siguen los meridianos en una hipotética esfera (cortes para Φ constante) o los paralelos (cortes para θ constante). La información de todos los cortes del diagrama es excesiva, por lo que se recurre a representar dicha información solo en los planos principales.

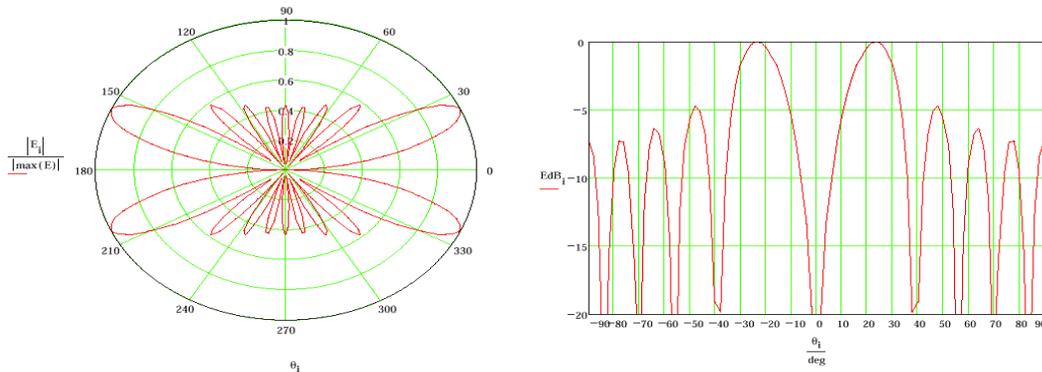
Los cortes bidimensionales del diagrama de radiación se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas. En coordenadas polares, el ángulo representa la dirección del espacio, mientras que el radio representa la intensidad del campo eléctrico o la densidad de potencia radiada. En coordenadas cartesianas se representa el ángulo en abscisas y el campo o la densidad de potencia en ordenadas.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar suministra una información más clara de la distribución de la potencia en las diferentes direcciones del espacio.

El campo se puede representar de forma absoluta o relativa, normalizando el valor máximo a la unidad. También es bastante habitual la representación del diagrama con la escala en decibelios.

El máximo del diagrama de radiación es cero decibelios y en las restantes direcciones del espacio los valores en dB son negativos. Es importante tener en cuenta que los diagramas de campo y de potencia son idénticos cuando la escala está en decibelios. Ver figura 6

Figura 6. Diagrama de radiación en coordenadas polares y en coordenadas cartesianas.

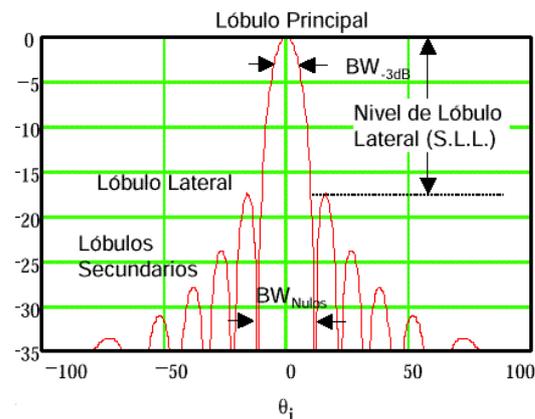


Tomado de http://www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp_tema2.pdf

2.1.2.3.1. Parámetros del diagrama de radiación

En los diagramas de radiación que se muestran en la figura 7, se aprecia una zona en la que la radiación es máxima, a la que se denomina haz principal o lóbulo principal. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se denominan lóbulos laterales y al lóbulo lateral de mayor amplitud se denomina lóbulo secundario

Figura 7. Parámetros del diagrama de radiación



Tomado de http://www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp_tema2.pdf

- **Ancho de haz a -3 dB ($\Delta\theta_{-3dB}$)**

Es la separación angular de las direcciones en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo. En el diagrama de campo es la excursión angular entre las direcciones en las que el valor del campo ha caído a 0,707 el valor del máximo.

- **Ancho de haz entre ceros ($\Delta\theta_c$)**

Es la separación angular de las direcciones del espacio en las que el lóbulo principal toma un valor mínimo.

- **Relación de lóbulo principal a secundario (NLPS)**

Es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo del lóbulo secundario. Normalmente, dicha relación se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud, que suele ser adyacente al lóbulo principal.

- **Relación delante - atrás (D/A)**

Es el cociente, expresado en dB, entre el valor del diagrama en la dirección del máximo y el valor en la dirección diametralmente opuesta.

2.1.2.4. Polarización

La polarización de una antena describe la orientación de los campos electromagnéticos que irradia o recibe la antena. Se puede hablar de las siguientes formas de polarización.

2.1.2.4.1.1. Polarización vertical

Se presenta polarización vertical cuando el campo eléctrico generado por la antena es vertical con respecto al horizonte terrestre (en dirección de arriba - abajo). Es el tipo de antena más comúnmente usada debido a que no son afectadas por la reflexión horizontal (como por ejemplo: agua, tierra, etc).

2.1.2.4.1.2. Polarización horizontal

Se presenta polarización horizontal cuando el campo eléctrico generado por la antena es paralelo al horizonte terrestre. No son afectadas por la reflexión vertical (como por ejemplo: edificios).

2.1.2.4.1.3. Polarización circular

Se presenta polarización circular cuando el campo eléctrico generado por la antena va rotando de vertical a horizontal, y viceversa, creando movimientos circulares en todas direcciones.

- **Polarización circular dextrógira**

Se presenta polarización circular dextrógira cuando la rotación del campo eléctrico es a favor de las manecillas del reloj. Este tipo de polarización también es llamada CCW.

- **Polarización circular levógira**

Se presenta polarización circular levógira cuando la rotación del campo eléctrico es en contra de las manecillas del reloj. Este tipo de polarización también es llamada CW.

2.1.2.4.1.4. Polarización elíptica

Se presenta polarización elíptica cuando el campo eléctrico generado por la antena se mueve como en la polarización circular pero con desigual potencia en las distintas direcciones. Generalmente, este tipo de polarización no suele ser intencionado.

2.1.2.5. Tipos de antenas

Hay tres tipos básicos de antenas, las omnidireccionales, direccionales y sectoriales.

2.1.2.5.1. Antenas direccionales

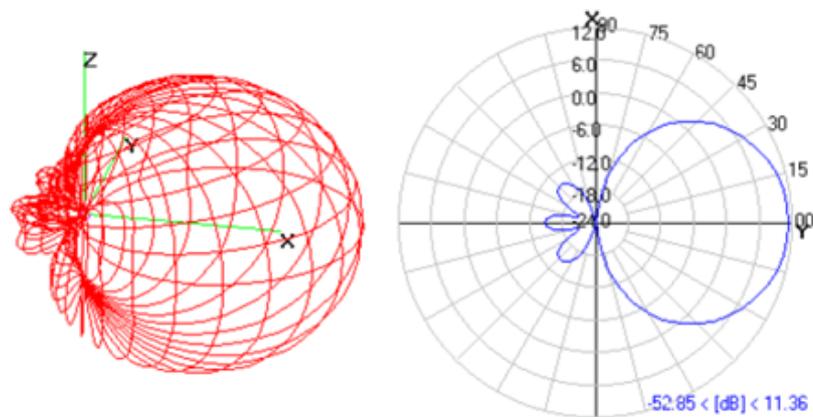
Estas antenas orientan la señal en una dirección muy determinada con un haz estrecho pero de largo alcance. Una antena direccional actúa de forma parecida a un foco que emite un haz de luz concreta y estrecha pero de forma intensa (más alcance).

Las antenas Direccionales enfocan la información a una cierta zona de cobertura, a un ángulo determinado, por lo cual su alcance es mayor, sin embargo fuera de la zona de cobertura no se "escucha" nada, no se puede establecer comunicación entre los interlocutores. Ver figura 8

El alcance de una antena direccional viene determinado por una combinación de los dBi de ganancia de la antena, la potencia de emisión del punto de acceso emisor y la sensibilidad de recepción del punto de acceso receptor.

Estas antenas se usan para establecer enlaces punto a punto (direccional contra direccional) o para enlazar con un nodo que tenga una antena Omnidireccional. Dentro de la gama de antenas direccionales, existen también varios modelos y formas, cada una con un uso concreto.

Figura 8. Patrón de Radiación de las Antenas Direccionales.



Tomado de http://www.unex.es/eweb/rinuex/?Redes_Inal%E1mbricas:Antenas

2.1.2.5.1.1. Antena panel direccional

Este tipo de antena también es llamada “patch panel” y suele utilizarse en estaciones radio base divididas en sectores. Estas antenas, en el cual la base constructiva es un panel metálico con los elementos irradiantes cerrados por una tapa de material de fibra de vidrio o plástico, irradian su energía sólo en ciertos segmentos de espacio llamado de ángulo de abertura horizontal. Ver las figuras 9 y 10.

De acuerdo con el concepto de optimización las más usuales son las de 65° , mas también se usa 90° y, en aplicaciones especiales, 120° ó 33° , estas últimas para cobertura de carreteras. Tienen ganancias de entre 12 y 22 dBi. Su mayor

inconveniente es que, al ser plana, puede sufrir por la fuerza del viento si se sitúan en el exterior.

Figura 9. Antena Direccional Tipo Parche.



Tomado de <http://www.sincables.net/staticpages/index.php/20061030222549626>

Figura 10. Patrón de Radiación de la antena D-Link ANT24-1400 (14 dBi High Gain Directional Panel Antenna)



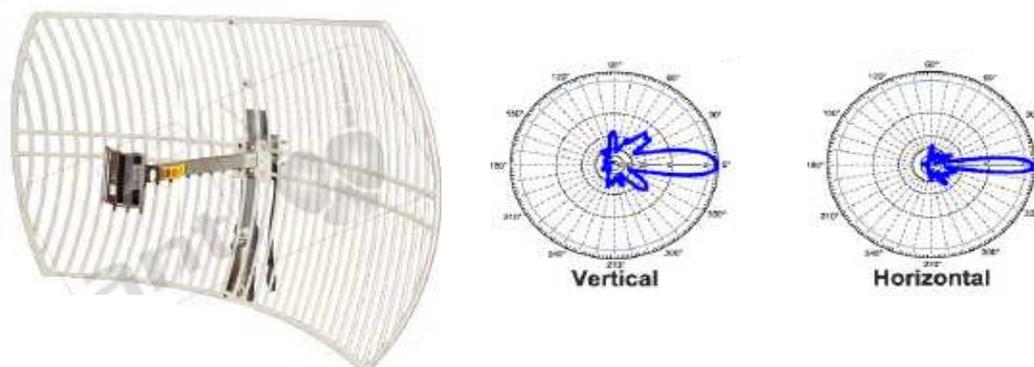
Tomado de <http://www.dlink.com>

Otra utilidad puede darse para sustituir una antena omnidireccional, tras la cual pudiera encontrarse un edificio u otra estructura que impidiera que la señal se propagase, poniendo varias de ellas para cubrir la zona deseada y no desperdiciar señal. A esta unión de antenas se las llama 'Array'.

2.1.2.5.1.2. Antena Direccional de Rejilla

Este tipo de antena también es llamada “parabolic grid” y es la típica antena para establecer enlaces punto a punto o punto multipunto. Se caracterizan por su alta ganancia, que va desde unos discretos 15dBi, llegando en los modelos superiores hasta los 27dBi. Cuanta más alta es la ganancia de este tipo de antenas, más alta es su direccionalidad, ya que se reduce muchísimo el ángulo en el que irradian la señal, llegando a ser tan estrechos como 8° de apertura. Ver figura 11.

Figura 11. Patrón de Radiación de la antena ANT 24PGA24 de 24 dBi



Tomado de <http://www.ant.com.es/index.php?id=7>

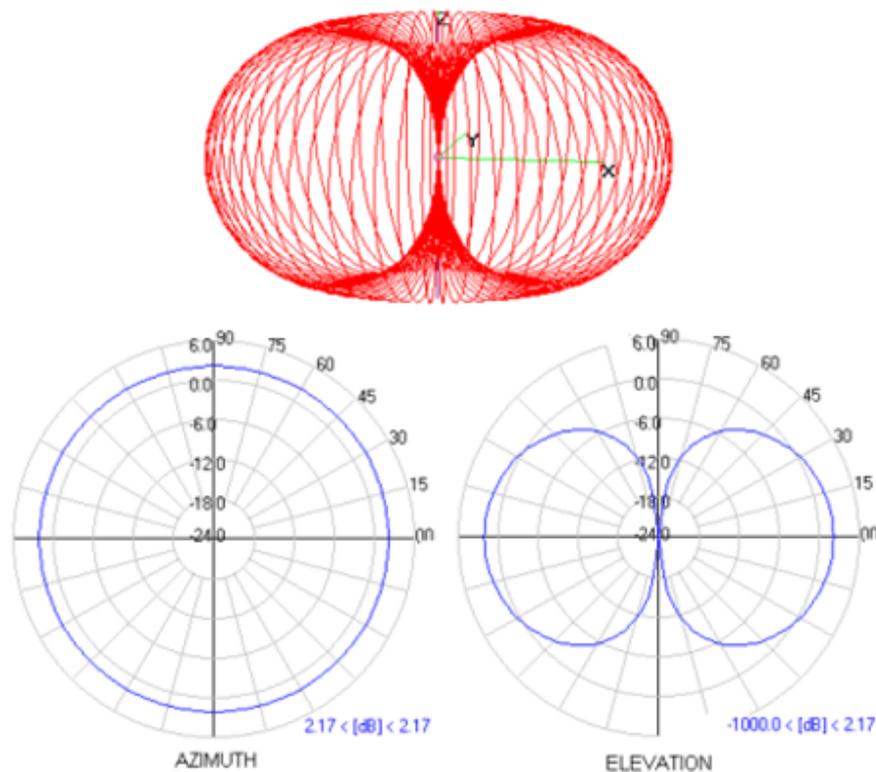
Las rejillas de estas antenas direccionales lo único que hacen es concentrar la señal que llega hasta ella, y enviarla al 'dipolo' que está cubierto por un plástico protector. Existen diferentes configuraciones de antenas parabólicas: redondas, mayadas, cuadradas, etc.

2.1.2.5.2. Antenas omnidireccionales

Orientan la señal en todas direcciones con un haz amplio pero de corto alcance. Si una antena direccional sería como un foco, una antena omnidireccional sería

como una bombilla emitiendo luz en todas direcciones pero con una intensidad menor que la de un foco, es decir, con menor alcance. Ver figura 12.

Figura 12. Patrón de Radiación de una Antena Omnidireccional.



Tomado de http://www.unex.es/eweb/rinuex/?Redes_Inal%E1mbricas:Antenas

Las antenas Omnidireccionales tienen una apertura horizontal en todas direcciones, es decir, su apertura será de 360° por lo que es posible establecer comunicación independientemente del punto en el que se esté. En contrapartida el alcance de estas antenas es menor que el de las antenas direccionales.

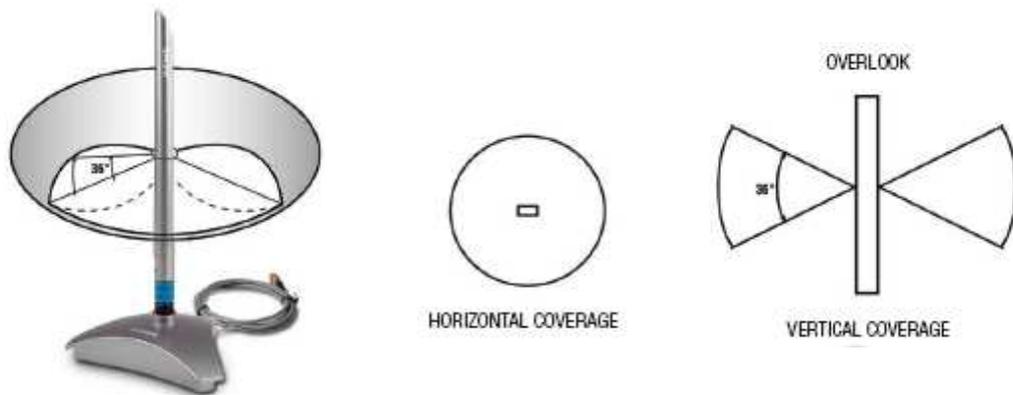
El alcance de una antena omnidireccional viene determinado por una combinación de los dBi de ganancia de la antena, la potencia de emisión del punto de acceso

emisor y la sensibilidad de recepción del punto de acceso receptor. A mismos dBi, una antena sectorial o direccional dará mejor cobertura que una omnidireccional.

Realmente estas antenas omnidireccionales no emiten señal en todas las direcciones, sino más bien sobre su propio plano es donde se conseguirá la máxima potencia.

Una cosa que pasa de forma bastante habitual, es que se pone la antena en un lugar muy alto, y luego a la altura de la calle no llega la señal, la señal no llega porque la antena es omnidireccional sólo sobre su mismo plano. Ver figura 13.

Figura 13. Cobertura de una antena omnidireccional.



Tomado de <http://www.dlink.com>

Con la ganancia de las antenas omnidireccionales pasa algo muy similar a lo que ocurría con las direccionales: cuanto más alta es su ganancia, más estrecha es la radiación horizontal que estas emiten.

2.1.2.5.3. Antenas sectoriales

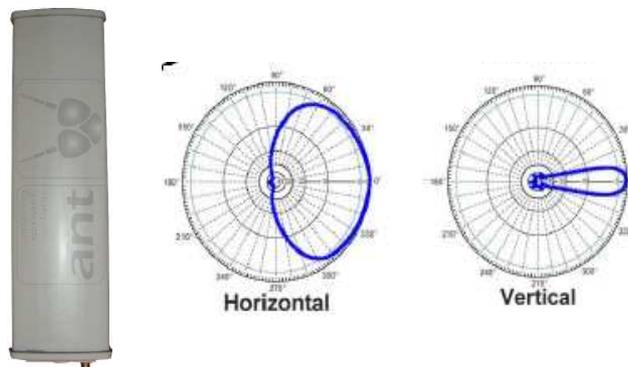
Son la mezcla de las antenas direccionales y las omnidireccionales. Las antenas sectoriales emiten un haz más amplio que una direccional pero no tan amplio como una omnidireccional.

La intensidad (alcance) de la antena sectorial es mayor que la omnidireccional pero algo menor que la direccional. Siguiendo con el ejemplo de la luz, una antena sectorial sería como un foco de gran apertura, es decir, con un haz de luz más ancho de lo normal. Ver figura 14.

Para tener una cobertura de 360° (como una antena omnidireccional) y un largo alcance (como una antena direccional) deberemos instalar o tres antenas sectoriales de 120° ó 4 antenas sectoriales de 80° . En la figura 15 se muestra un arreglo de 360° de 3 antenas sectoriales de 120° y 17 dBi marca QPCOM tipo Hyperlink.

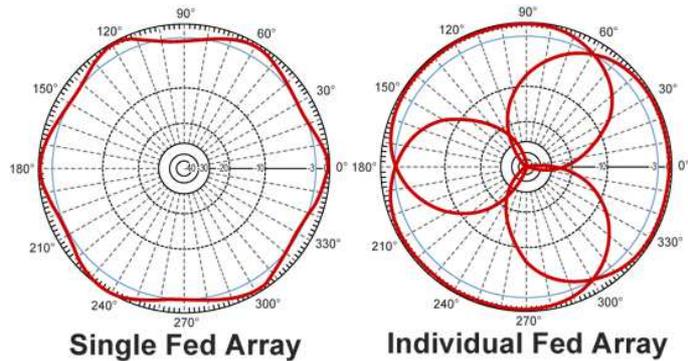
Las antenas sectoriales suelen ser más costosas que las antenas direccionales u omnidireccionales.

Figura 14. Patrón de Radiación de la antena sectorial ANT 24PSA13 de 12.5 dBi



Tomado de <http://www.ant.com.es/index.php?id=7>

Figura 15. Arreglo de 360° de antenas sectoriales.



Tomado de http://www.articulo.mercadolibre.com.co/MCO-4817697-_JM

2.2. Cables

En el caso de frecuencias mayores que HF (alta frecuencia, por su sigla en inglés) los cables utilizados son casi exclusivamente los coaxiales (o para abreviar coax, derivado de las palabras del inglés “of common axis” eje en común).

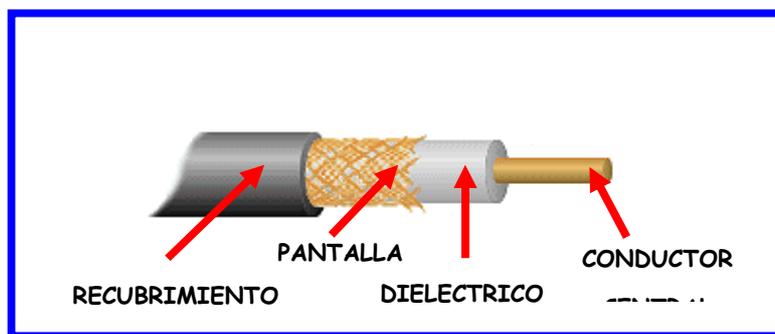
Los cables coaxiales tienen un conductor central recubierto por un material no conductor denominado dieléctrico, o simplemente aislante. El dieléctrico se recubre con una pantalla conductora envolvente a menudo en forma de malla.

El material dieléctrico evita una conexión eléctrica entre el conductor central y la pantalla. Finalmente, el coaxial está protegido por un recubrimiento generalmente de PVC. Ver figura 16.

El conductor interior transporta la señal de RF, y la pantalla evita que la señal de RF sea radiada a la atmósfera, así como impide que posibles señales externas interfieran con la que está siendo transmitida por el cable.

Otro hecho interesante es que las señales eléctricas de alta frecuencia siempre viajan a lo largo de la capa exterior del conductor central: cuanto más grande el conductor central, mejor va a ser el flujo de la señal. Esto se denomina “efecto piel”.

Figura 16. Cable Par trenzado Cable Coaxial



Tomado de <http://www.forocompraventa.com/showthread.php?t=19187>

A pesar de que la construcción del cable coaxial es muy buena para contener la señal en el cable, presenta algo de resistencia al flujo eléctrico: a medida que la señal viaja a través del cable disminuye su intensidad.

Este debilitamiento es conocido como atenuación, y para las líneas de transmisión se mide en decibeles por metro (dB/m). El coeficiente de atenuación es una función de la frecuencia de la señal y la construcción física del cable. Si se incrementa la frecuencia de la señal, también lo hace su atenuación.

La tabla 3 muestra el valor de la impedancia y las pérdidas para los diferentes cables empleados para Wi-Fi. (Ver anexo B –Data Sheet de Cables-)

En los enlaces wireless, siempre se intentará utilizar el cable de mejor calidad, y que por ende, nos proporcione la menor cantidad de pérdida en relación a su la longitud y con impedancia de 50Ω.

Tabla 3. Impedancia y pérdidas por unidad de longitud para diferentes cables.

| Tipo de cable | Impedancia | Perdida 802.11b/g (2.4GHz) |
|---------------|------------|----------------------------|
| LMR-100 | 50Ω | 1.3 dB/m |
| LMR-195 | 50Ω | 0.62 dB/m |
| LMR-200 | 50Ω | 0.542 dB/m |
| LMR-240 | 50Ω | 0.415 dB/m |
| LMR-300 | 50Ω | 0.34 dB/m |
| LMR-400 | 50Ω | 0.217 dB/m |
| LMR-500 | 50Ω | 0.18 dB/m |
| LMR-600 | 50Ω | 0.142 dB/m |
| LMR-900 | 50Ω | 0.096 dB/m |
| LMR-1200 | 50Ω | 0.073 dB/m |
| LMR-1700 | 50Ω | 0.055 dB/m |
| RG-58 | 50Ω | 1.056 dB/m |
| RG-8X | 50Ω | 0.758 dB/m |
| RG-213/214 | 50Ω | 0.499 dB/m |
| 9913 | 50Ω | 0.253 dB/m |
| 3/8" LDF | 50Ω | 0.194 dB/m |
| 1/2" LDF | 50Ω | 0.128 dB/m |
| 7/8" LDF | 50Ω | 0.075 dB/m |
| 1 1/4" LDF | 50Ω | 0.056 dB/m |
| 1 5/8" LDF | 50Ω | 0.046 dB/m |

Tomado de http://www.gr.ssr.upm.es/rdpr/transparencias/transp_tema2.pdf

Los cables RG-58 y RG-8 aunque tienen una impedancia de 50Ω , no se recomiendan por sus altas pérdidas a 2.4GHz.

2.3. Pigtail

En muchos casos, conectar el equipo de radio a un cable Helix o a un LRM400 puede no ser posible. Los cables de largo alcance (más de 10 metros) terminan normalmente en conectores tipo N mientras la mayoría de los radios usan conectores mucho más pequeños del tipo SMA o RPTNC .

Una pigtail es un cable coaxial de pequeña longitud con un conector en cada punta para facilitar la conexión entre radios y antenas o radios y cables de largo alcance.

Figura 17. Pigtail RSMA hembra a N macho



Tomado http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

En la figura 17 se observa una tarjeta D-Link PC con un conector RP-SMA hembra. Para conectar el radio a un conector tipo N macho necesitamos un pigtail o un adaptador de conectores. El pigtail debe ser RPSMA hembra a N macho.

Las pigtailes normalmente usan cable LMR195 o LMR 100 que introducen una pérdida total de 0,2 - 3dB, dependiendo de la longitud. Un buen adaptador de conectores tiene una pérdida de 0,1 decibeles.

2.4. Conectores

La utilización de los conectores parece muy sencilla, pero todo se complica por el hecho de que no existe una regulación que especifique como deben ser los conectores. Esto trae consigo que existan muchos modelos distintos de conectores. Algunos muy extendidos como los RP-SMA y otros específicos de un fabricante, los llamados conectores propietarios. Por ejemplo algunos usan conectores TNC, otros BNC, otros SMA y/o RP-SMA (SMA Reverse) y algunos conectores de diseño propio. El hecho se complica aún más si tenemos en cuenta que el tipo de conector de la antena suele ser distinto del conector de la tarjeta inalámbrica. A partir de cierta potencia suelen ser del tipo N-Hembra. (Ver anexo C –Data Sheet de Conectores-)

La mayoría de los equipos inalámbricos (Adaptadores, Access Point y Routers) disponen de un conector para enchufar una antena externa. Los Access Point mayormente viene ya con su propia antena integrada. Y respecto a las tarjetas; Las más usuales con este tipo de conector son las que se ensamblan en un PC portátil, o sea interfaz PCI. Lo normal sería que todos los equipos se comercializaran con un conector para poder conectarle una antena externa, pero como ya sabéis la mayoría de las tarjetas con interfaz USB y PCMCIA no cumplen con este requisito, y menos las tarjetas Mini-PCI que se incorporan en los portátiles. Y por consecuencia intentamos siempre manipular este tipo de equipos con el riesgo que ello conlleva.

2.4.1. Conector tipo N

Es el conector más habitual en las antenas de 2.4GHz. Es un conector de tipo rosca. Estos conectores tienen un tamaño apreciable y, a veces se confunden con los conectores UHF. Ver figura 18.

La gran diferencia es que los conectores UHF no son validos para frecuencia de 2.4GHz. Es muy raro e inusual encontrarse tarjetas y punto de acceso con este tipo de conectores, al contrario que en las antenas.

Es muy fácil de trabajar con él, y muy útil para el montaje propio de antenas caseras, sobre todo el de tipo chasis para ensamblarlo en el cuerpo de la antena.

Este conector es el más utilizado para realizar conexiones a muchas antenas externas. Se pueden utilizar a más de 18Ghz y se utilizan comúnmente en aplicaciones de microondas. Se fabrican para la mayoría de tipos de cable. Las uniones del cable al conector macho o hembra son impermeables, y proveen un agarre efectivo.

Figura 18a. Conector N Macho tipo recto



Figura 18b. Conector N Hembra tipo recto



Tomados de http://www.e-merchan.com/index.php?cPath=700000000_702000000_70208000

2.4.2. Conector tipo BNC

Los conectores BNC fueron desarrollados a fines de los años 40. La sigla BNC significa Bayonet Neill-Concelman, por los apellidos de quienes los inventaron: Paul Neill y Carl Concelman. El tipo BNC es un conector miniatura de conexión y desconexión rápida.

Tiene dos postes de bayoneta en el conector hembra, y el acoplamiento se logra con sólo un cuarto de vuelta de la tuerca del conector macho. Ver figura 19.

Los conectores BNC son ideales para la terminación de cables coaxiales miniatura o subminiatura (RG-58 a RG-179, RG-316, etc.). Tienen un desempeño aceptable hasta unos pocos cientos de MHz, pero poco apto para trabajar en la frecuencia de 2.4GHz.

Por ser un tipo de conector muy económico son los que se encuentran más comúnmente en los equipamientos de prueba y en los cables coaxiales Ethernet 10base2

Figura 19a. Conector BNC Macho tipo recto



Figura 19b. Conector BNC Hembra tipo recto



Tomados de http://www.e-merchan.com/index.php?cPath=700000000_702000000_70208000

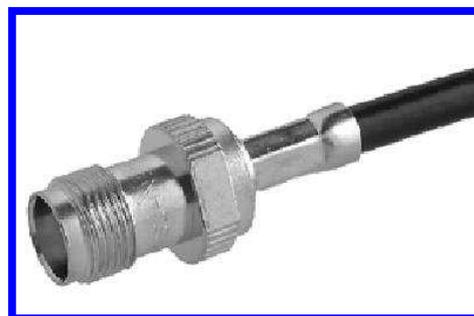
2.4.3. Conector tipo TNC

Conector coaxial similar al conector tipo BNC pero con acoplamiento en tornillo para asegurar la fiabilidad de la conexión y desconexión. Ver figura 20.

Debido este mecanismo son especialmente adecuados para dispositivos móviles con vibraciones severas.

Los conectores TNC también fueron inventados por Neill y Concelman, y son una versión roscada de los BNC. Debido a que proveen una mejor interconexión, funcionan bien hasta unos 12GHz. Su sigla TNC se debe a su sigla en inglés (Neill-Concelman con Rosca, por Threaded Neill-Concelman).

Figura 20a. Conector TNC Macho tipo recto Figura 20b. Conector TNC Hembra tipo recto



Tomados de http://www.e-merchan.com/index.php?cPath=700000000_702000000_70208000

2.4.4. Conector tipo SMA

El conector SMA es un acrónimo de “Sub-Miniature Connect” que fue desarrollado en los años 60. Los conectores SMA son muy pequeños pero a la vez de tamaño compacto y tienen una extraordinaria durabilidad.

El conector coaxial tipo SMA es de precisión para aplicaciones de microondas, compatible mecánicamente con los conectores de precisión de 3.5mm como RPC3.5, APC3.5 y conector K. Ver figura 21.

Los conectores SMA tienen una gran estabilidad mecánica, fiabilidad, larga vida y óptimas propiedades eléctricas, especialmente bajo VSWR. También hay aplicaciones especiales para microondas como microstrip y guías de onda plana.

Se instalan de forma roscada y trabajan adecuadamente con frecuencias de hasta 18GHz, ya que son conectores de precisión que proveen excelentes prestaciones eléctricas y de alto desempeño.

Este conector es el más utilizado para realizar conexiones a muchas tarjetas inalámbricas con interfaz PCI. Es el conector que incorporan la mayoría de antenas pequeñas que vienen de serie con las tarjetas PCI y que se conectan directamente a dichas tarjetas.

Figura 21a. Conector SMA Macho tipo recto Figura 21b. Conector SMA Hembra tipo recto



Tomados de http://www.e-merchan.com/index.php?cPath=700000000_702000000_70208000

2.4.5. Conector tipo SMC

Se trata de una versión todavía más pequeña de los conectores SMA. Son aptos para frecuencias de hasta 10GHz. Su mayor inconveniente es que solo son utilizables con cables muy finos (con alta pérdida). Ver figura 22.

El conector SMB es una versión del SMC con la ventaja que se conecta y desconecta más fácilmente.

Figura 22. Conector SMC Macho



Tomados de <http://www.epirsa.com/contenido/productos/pcoaxiales/coax2.htm#smc>

2.4.6. Conector tipo APC-7

Conector Amphenol de precisión. Se trata de un conector con muy poca pérdida, y muy costoso, fabricado por la empresa que lleva su nombre (Amphenol). Tiene la particularidad de que no tiene sexo.

2.4.7. Conector tipo SMB

Los conectores SMB cuyo nombre se deriva de Sub-Miniatura B, son el segundo diseño subminiatura. Constituyen una versión más pequeña de los SMA con un acoplamiento a presión y funcionan hasta los 4GHz.

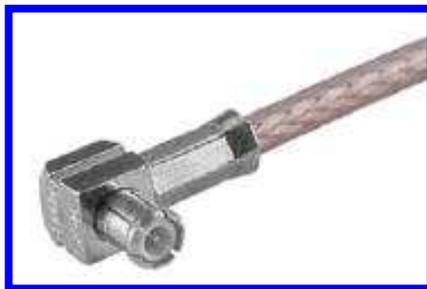
2.4.8. Conector tipo RP-TNC

RP-TNC. Es un conector TNC con el género invertido. Éstos son los que trae el WRT54G de Linksys.

2.4.9. Conector tipo MCX

Los conectores *MCX* se introdujeron en los años 80. Aunque utilizan contactos internos y aislantes idénticos a los *SMB*, el diámetro exterior de la clavija es 30% más pequeño que la del *SMB*. Esta serie provee a los diseñadores de opciones cuando el espacio físico es limitado. *MCX* tiene una capacidad de banda ancha de 6GHz con un diseño de conector a presión. Ver figura 23.

Figura 23a. Conector MCX Macho tipo Codo Figura 23b. Conector MCX Hembra tipo recto



Tomados de http://www.e-merchan.com/index.php?cPath=700000000_702000000_70208000

2.4.10. Conector tipo MMCX

La serie *MMCX*, también denominada *MicroMate*, es una de las líneas de conectores de RF más pequeñas desarrolladas en los años 90. *MMCX* es una serie de conectores micro-miniatura con un mecanismo de bloqueo a presión que permite una rotación de 360 grados otorgándole gran flexibilidad.

Los conectores MMCX se encuentran generalmente en tarjetas de radio PCMCIA, como las fabricadas por Senao y Cisco.

Los conectores MMCX los podemos distinguir entre macho y hembra, si bien en determinadas ocasiones los podremos encontrar como Plug (macho) y Hembra (jack).

Los conectores MMCX al igual que los conectores MC-Card se usan en determinados componentes wireless, como pueden ser en tarjetas PCMCIA Wireless, Antena Omnidireccional de 5dBi, Antena GPS.

En todos estos dispositivos, evidentemente el conector incorporado en ellos es del tipo hembra y será muy difícil encontrarlo suelto. Ver figura 24. Además lo más importante es centrarse en la búsqueda y elección del conector MMCX Macho (plug) puesto que será el que necesitemos para conectar nuestro dispositivo inalámbrico a nuestra antena externa. De hecho casi la totalidad de tiendas wireless solo mencionan MMCX sin especificar si es macho o hembra, ya que se da por entendido que es lo que se necesita.

Figura 24a. Conector MMCX Hembra en tarjeta PCMCIA Zcom XI-325HP+ 300W



Figura 24b. Conector MNCX Macho (Plug)



Tomado de: <http://hwagm.elhacker.net/htm/galeriaconectores.htm>

2.5. Lightning Arrestor

Una instalación situada sobre una azotea o en una torre necesita protección contra rayos. Los rayos son enemigos comunes de las instalaciones inalámbricas, y deberían prevenirse tanto como sea posible, ya sea para prevenir descargas directas sobre la torre o el equipo o descargas indirectas (corrientes de inducción) debidas a la caída cercana de rayos.

El cable de antena puede conducir la descarga de un rayo hacia la instalación interior donde puede causar mucho daño. Por ello es importante proveer una desviación a tierra en caso de descarga en los cables que van desde el exterior al interior.

En la figura 25 se muestra los protectores conocidos en inglés como **Lightning Protector o Lightning Arrestor** para cable coaxial y para cable UTP. En ambos casos el protector debe estar conectado a tierra mediante un conductor de cobre de calibre 10 AWG. (Ver anexo D –Data Sheet de Lightning Arrestors-)

Figura 25a. Lightning Arrestor cable UTP

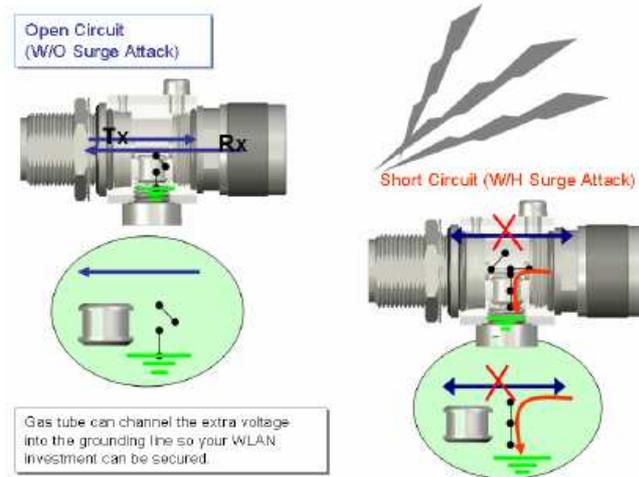


Figura 25b. Lightning Arrestor para cable coaxial



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

Figura 26. Principio de funcionamiento del Lighting Protector



Tomado de White Paper In- and outdoor antennas-funkwerk enterprise communications

2.6. Access Point

Es un dispositivo que interconecta dispositivos de comunicación inalámbrica para formar una red inalámbrica. Los Access Point tienen direcciones IP asignadas, para poder ser configurados. Son los encargados de crear la red, están siempre a la espera de nuevos clientes a los que dar servicios. El Access Point recibe la información, la almacena y la transmite entre la LAN inalámbrica y la LAN cableada.

Un único Access Point puede soportar un pequeño grupo de usuarios y puede funcionar en un rango de al menos treinta metros y hasta varios cientos. Este dispositivo o su antena son normalmente colocados en alto pero podría colocarse en cualquier lugar en que se obtenga la cobertura de radio deseado.

2.7. Adaptadores de redes inalámbricas

Los adaptadores de red son las tarjetas o dispositivos que se conectan a los ordenadores para que puedan funcionar dentro de una red inalámbrica. Estos equipos pueden recibir también el nombre de tarjetas de red o interfaces de red.

Los adaptadores de red se encargan de comunicarse con otros adaptadores o con un punto de acceso para mantener al ordenador al que están conectados dentro de la red inalámbrica a la que se asocie.

Los adaptadores requieren de una antena, esta suele venir integrada dentro del propio adaptador sin que externamente se visualice; sin embargo existen otros adaptadores que permiten identificar claramente su antena. En cualquier caso, la mayoría de los adaptadores incluyen un conector para poder disponer una antena externa, permitiendo que se aumente significativamente el alcance del adaptador.

2.7.1. Tarjeta PCMCIA

Las tarjetas PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association) fueron creadas en 1989 por una asociación de fabricantes de equipos con el propósito inicial de desarrollar una norma hardware y software para tarjetas de memoria intercambiables.

Las tarjetas PCMCIA fueron implementadas en el momento que los portátiles fueron diseñados con los puertos PCMCIA, siendo estos puertos una especie de ranura en la que se puede insertar las tarjetas PCMCIA cuyo tamaño es aproximado a la de una tarjeta de crédito. Ver figura 27.

Todas las tarjetas PCMCIA tienen un ancho de 54 mm, y un largo mínimo de 85.6mm. La razón por la cual el largo de las tarjetas es variable es debido a que algunas tarjetas necesitan sobresalir hacia el exterior para mostrar algún tipo de conector o antena.

Figura 27. Tarjeta PCMCIA



Tomado de <http://www.poderpda.com/content/view/3268/85/>

3. PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTRÓMAGNETICAS

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.

Las ondas de radio son ondas electromagnéticas que poseen una componente eléctrica y una componente magnética y como tales, están expuestas a ciertos fenómenos los cuales son capaces de modificar el patrón de propagación de las ondas. Las ondas electromagnéticas se propagan a través de cualquier material dieléctrico incluyendo el aire pero no se propagan bien a través de conductores con pérdidas como el agua de mar ya que los campos eléctricos hacen que fluyan corrientes en el material disipando con rapidez la energía de las ondas.

Las ondas de radio se propagan por la atmósfera terrestre con energía transmitida por la fuente, posteriormente la energía se recibe del lado de la antena receptora. La radiación y la captura de esta energía son funciones de las antenas y de la distancia entre ellas.

3.1. Frente de Ondas

Las ondas electromagnéticas no son visibles al ojo humano y se debe de analizar con métodos indirectos mediante esquemas. Los conceptos de rayos y frentes de onda son auxiliares para ilustrar los efectos de propagación de las ondas

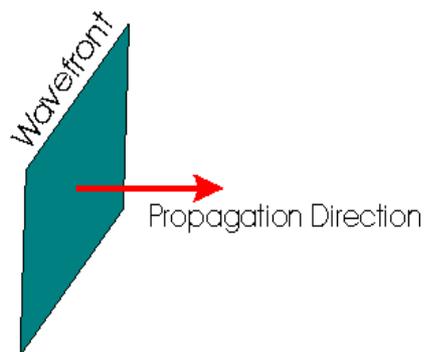
electromagnéticas a través del espacio libre. Un rayo se considera como una línea trazada a lo largo de la dirección de propagación de una onda electromagnética. Estos rayos son utilizados para mostrar la dirección relativa de la propagación de la onda electromagnética pero esto no indica que se refiere a la propagación de una sola onda electromagnética¹¹.

Un frente de onda representa una superficie de ondas electromagnéticas de fase constante. El frente de onda es formado cuando se unen los puntos de igual fase en rayos que se propagan desde la misma fuente.

3.1.1. Frente de Onda plano

Un frente de onda plana representa un frente de onda con una superficie que es perpendicular a la dirección de propagación, cuando una superficie es plana, su frente de onda es perpendicular a la dirección de propagación¹². Ver figura 28.

Figura 28. Frente de Onda plano



Tomado de http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io4/public_html/focalizacion.htm

¹¹ Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

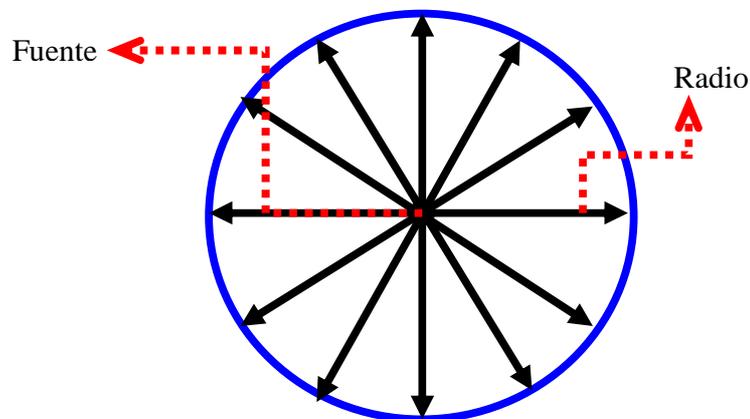
¹² Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

3.1.2. Frente de Onda de una Fuente Puntual

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 ondas¹³.

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. Ver figura 29.

Figura 29. Frente de onda producido por una fuente puntual



Tomado de http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/teoria/A_Franco/ondas/energia/energia.html

¹³ Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

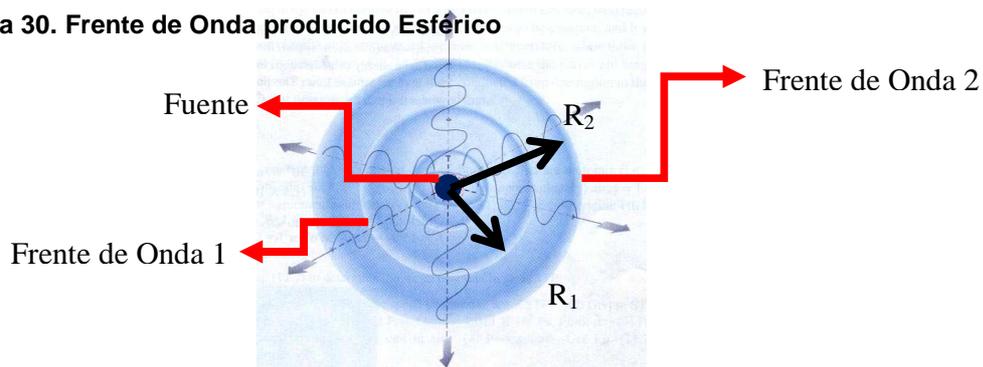
Por lo tanto, a mayor distancia de la fuente la propagación, el frente de onda se parece más a un frente de onda plano por lo que en la mayoría de los casos los frentes de onda esféricos se pueden simplificar como frentes de onda planos.

3.1.3. Frente de Onda Esférica

Para generar un frente de onda esférico, se necesita un radiador isotrópico que irradie en todas direcciones, en la realidad no existen radiadores isotrópicos pero se puede aproximar dicho radiador mediante una antena omnidireccional, la cual es capaz de producir un frente de onda esférico con radio R . Ver figura 30.

Todos los puntos que se encuentran a una distancia R , se encuentran en la superficie de la esfera y cuentan con la misma densidad de potencia. En cualquier otro momento, la potencia irradiada, se encuentra uniformemente distribuida sobre la superficie total de la esfera, donde se considera que el medio de transmisión no tiene pérdidas¹⁴.

Figura 30. Frente de Onda producido Esférico



Tomado de http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_05_06/io4/public_html/focalizacion.htm

¹⁴ Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

La potencia irradiada por la fuente puntual se encuentra distribuida en la superficie total de la esfera donde la potencia total irradiada es.

$$D_p = \frac{P_{rad}}{4\pi R^2} \quad \text{donde:} \quad D_p: \text{ Densidad de potencia}$$
$$P_{rad}: \text{ Potencia Total Radiada}$$

R : Radio de la Esfera (Distancia de cualquier punto de la superficie a la fuente)

Como se observa entre más lejos va el frente de onda de la antena transmisora, la densidad de potencia es más pequeña. En estos casos la potencia total distribuida 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.

3.2. Pérdidas de la señal en el espacio libre

El espacio libre puede ser considerado como vacío y no se consideran pérdidas. Cuando las ondas electromagnéticas se encuentran en el vacío, se llegan a dispersar y se reduce la densidad de potencia a lo que es llamado atenuación. La atenuación se presenta tanto en el espacio libre como en la atmósfera terrestre. La atmósfera terrestre no se le considera vacío debido a que contiene partículas que pueden absorber la energía electromagnética y a este tipo de reducción de potencia se le llama pérdidas por absorción la cual no se presenta cuando las ondas viajan afuera de la atmósfera terrestre.

3.2.1. Atenuación.

La atenuación es descrita matemáticamente por la ley del cuadrado inverso que describe cómo 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.

3.2.1.1. Modelo de propagación en el espacio libre.

El modelo de propagación en el espacio libre es usado para predecir la señal recibida directa cuando el transmisor y el receptor tienen línea de vista entre ellos.

Los sistemas de comunicación vía satélite y los enlaces microondas con línea de vista típicamente son en el espacio libre. El modelo predice que la potencia recibida decrece a medida que la separación entre las antenas receptora y transmisora aumenta. La energía recibida en el espacio libre es función de la distancia y está dada por¹⁵.

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad \text{Donde}$$

¹⁵ Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

P_t es la potencia del transmisor.

$P_r(d)$ es la potencia recibida en el receptor, la cual es función de la distancia entre el transmisor y el receptor.

G_t es la ganancia de la antena transmisora.

G_r es la ganancia de la antena receptora.

d es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor.

L es el factor de pérdida del sistema no relacionado con la propagación ($L \geq 1$).

λ es la longitud de onda.

3.2.2. 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.

Una vez absorbida la energía se genera una atenuación de las intensidades de voltaje y campo magnético al igual que una reducción correspondiente en la densidad de potencia.

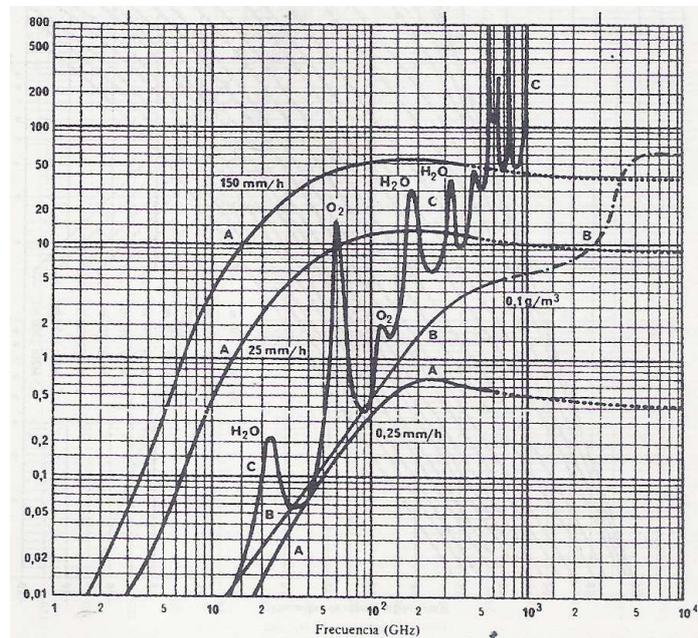
La medida en que una onda es absorbida en la atmósfera por sus distintas partículas depende de su frecuencia, y es relativamente insignificante a menos de unos 10 GHz. Así también la absorción de una onda depende del medio en el que se propague¹⁶.

¹⁶ Tomado de Cardama, Ángel, Antenas. Alfaomega, Edición 2000.

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 kilómetro¹⁷.

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 31 muestra una curva de absorción en decibeles por kilómetro de una onda electromagnética cuando se propaga en lluvia, niebla y componentes gaseosos.

Figura 31. Atenuación de la onda Electromagnética por A: lluvia, B: niebla y C: componentes gaseosos



Tomado de Cardama, Ángel, Antenas. Alfaomega, Edición 2000.

¹⁷ Tomado de Cardama, Ángel, Antenas. Alfaomega, Edición 2000.

3.3. Propagación de Ondas Electromagnéticas en el Entorno Terrestre

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 luminosas¹⁸.

Un principio importante cuando se trata de entender la propagación de ondas electromagnéticas, y por ende de ondas de radio, es el principio de Huygens, el cual en su forma simplificada puede ser formulado como sigue: “En cualquier punto de un frente de onda, se puede considerar que se origina un nuevo frente de onda esférico”¹⁹.

Si sumamos las ondas esféricas de un frente de onda, entendemos por qué un frente de onda no perturbado viaja como una sola pieza. El principio de Huygens también explica por qué la luz, ondas de radio o cualquier onda electromagnética no siempre viajan en línea recta.

3.3.1. Refracción

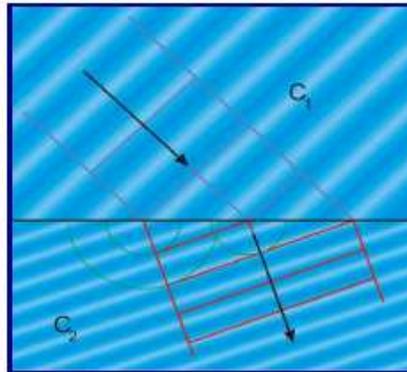
La refracción se refiere al cambio de dirección de un rayo al pasar en dirección oblicua de un medio a otro con distinta velocidad de propagación. La velocidad a la que se propaga una onda electromagnética es inversamente proporcional a la densidad del medio en el que lo hace. Por lo tanto, hay refracción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

¹⁸ Tomado de Tomasi, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

¹⁹ Tomado de [http:// eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf](http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf)

onda de radio pasa de un medio a otro con distinta densidad como se muestra en la figura 32.

Figura 32. Refracción de Ondas



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

En la gráfica las líneas negras representan el frente de onda entrante mientras que las rojas representan el frente de ondas desviadas por la refracción. C_1 es un medio con una velocidad de propagación mayor a C_2 . El ángulo que forman ambos frentes de onda depende de la composición del material del obstáculo (C_2).

Las ondas de radio están expuestas a sufrir una desviación en su trayectoria cuando atraviesan de un medio a otro con densidad distinta, en comunicaciones este efecto sucede cuando las ondas electromagnéticas atraviesan las distintas capas de la atmosfera variando su trayectoria en un cierto ángulo. La desviación de la trayectoria es proporcional al índice de refractividad el cual está dado por:

$$IR = \frac{V_p}{V_m} \quad \text{donde}$$

IR : Índice de Refracción

V_m : Velocidad de propagación en el

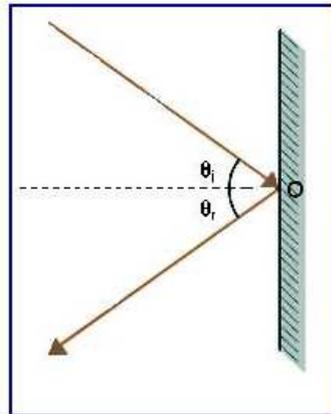
V_p : Velocidad de propagación en el espacio libre

medio

3.3.2. Reflexión

La reflexión se 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 Ver figura 33. Para la radio frecuencia, la reflexión ocurre principalmente en el metal, pero también en superficies de agua y otros materiales con propiedades similares.

Figura 33. Reflexión de Ondas



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

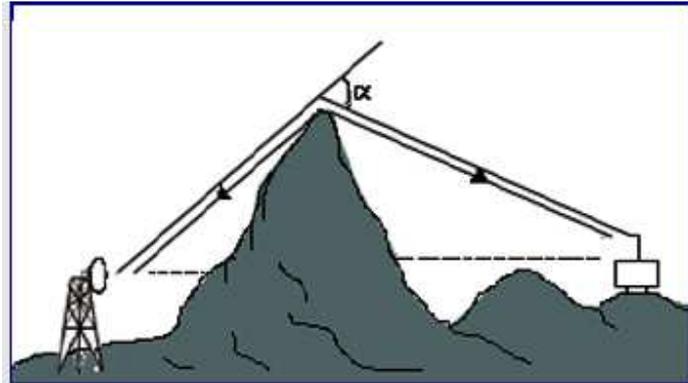
El principio básico de la reflexión es que una onda se refleja con el mismo ángulo con el que impacta una superficie.

3.3.3. Difracción

La difracción es un fenómeno basado en el hecho de que las ondas no se propagan en una sola dirección. Ocurre cuando las ondas encuentran un obstáculo en su trayectoria y divergen en muchos haces.

La difracción implica que las ondas pueden “dar la vuelta” en una esquina, como se ilustra en la figura 34.

Figura 34. Difracción de Ondas



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

La difracción es una consecuencia directa del principio de Huygens, y se incrementa en función de la longitud de onda. Esto significa que puede esperarse que las trayectorias de las ondas se aparten de la rectilínea más fácilmente a medida que se incrementa la longitud de onda.

Esa es la razón por la cual una estación de radio AM que opera a 1000 kHz (con una longitud de onda de 300 m) se oye fácilmente aún cuando haya considerables obstáculos en su trayecto, mientras que con redes inalámbricas (con una longitud de onda de 12 cm) se requiere una línea de vista entre transmisor y receptor.

3.3.4. Interferencia

La interferencia es producida siempre que se combinan dos o más ondas electromagnéticas de tal manera que se degrada el funcionamiento del sistema. La interferencia está sujeta al principio de superposición lineal de las ondas

electromagnéticas, y se presenta siempre que dos o más ondas ocupan el mismo punto del espacio en forma simultánea. El principio de la superposición lineal establece que la intensidad total de voltaje en un punto dado en el espacio es la suma de los vectores de onda individuales.

Las ondas con una misma frecuencia y una relación de fase (posición relativa de las ondas) constante pueden anularse entre sí, de manera de la suma de una onda con otra puede resultar en cero. Ver figura 35.

Figura 35a. Máxima Amplificación

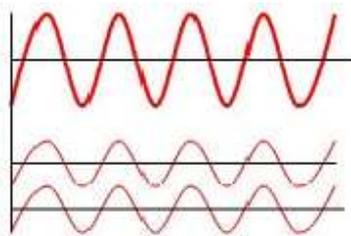
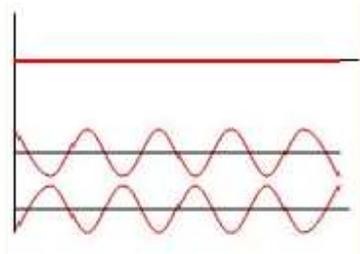


Figura 35b. Anulación Completa



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

Para que esto ocurra en su forma más pura, anulación máxima o amplificación completa, las ondas deben tener exactamente la misma longitud de onda y energía, y una relación de fase específica y constante.

En tecnología inalámbrica, la palabra interferencia se usa típicamente en un sentido más amplio, como perturbación debido a otras emisiones de radio frecuencia.

4. PRESUPUESTO DE ENLACE

Independientemente del buen equipamiento de la red inalámbrica que posea y del despeje de la línea de vista, se requiere calcular el presupuesto de potencia del enlace. El sobrecargar un radio enlace no hará necesariamente, que las cosas mejoren para su implementación y causará problemas a otros usuarios del espectro. Tener un buen presupuesto de potencia es esencial ya que es el requerimiento básico del funcionamiento del mismo.

Un presupuesto de potencia para un enlace punto a punto es el cálculo de ganancias y pérdidas desde el radio transmisor (fuente de la señal de radio), a través de cables, conectores y espacio libre hacia el receptor. La estimación del valor de potencia en diferentes partes del radioenlace es necesaria para hacer el mejor diseño y elegir el equipamiento adecuado.

4.1. Elementos de un Presupuesto de Enlace

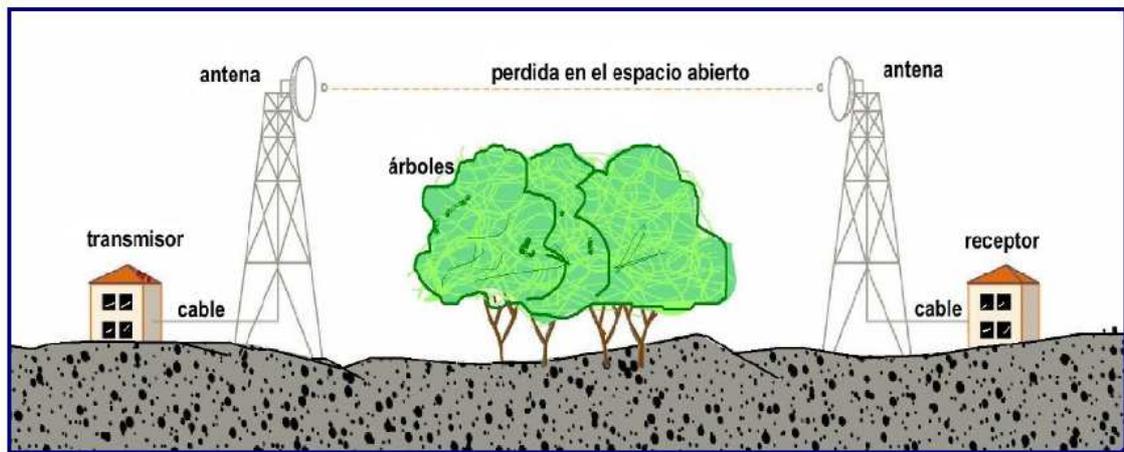
Los elementos pueden ser divididos en 3 partes principales:

1. El lado de Transmisión con potencia efectiva de transmisión.
2. Pérdidas en la propagación.
3. El lado de Recepción con efectiva sensibilidad receptiva (effective receiving sensibility).

Un presupuesto de radio enlace completo es simplemente la suma de todos los aportes (en decibeles) en el camino de las tres partes principales. Ver figuras 36 y 37.

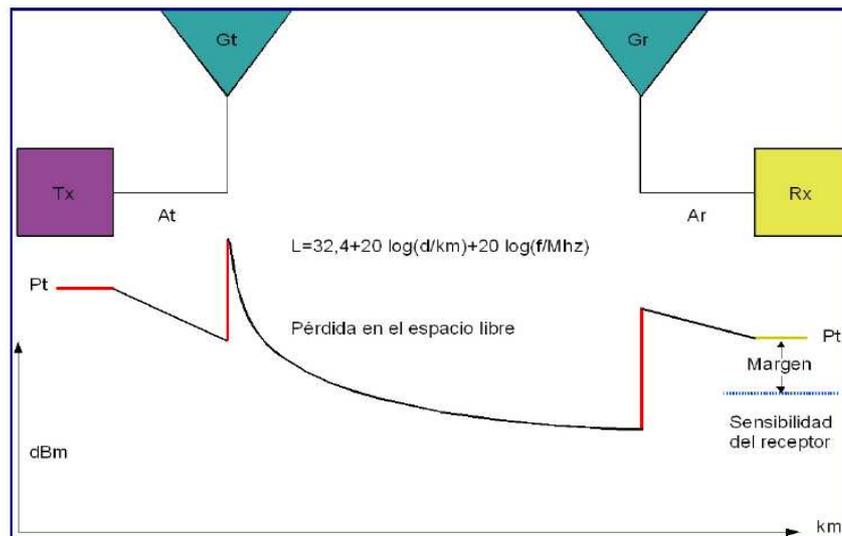
Potencia del transmisor [dBm] – Pérdida en el cable TX [dB] + Ganancia de antena TX [dBi] – Pérdidas en la trayectoria en el espacio abierto [dB] + Ganancia de antena RX [dBi] – Pérdidas en el cable del RX [dB] = Margen – Sensibilidad del receptor [dBm].

Figura 36. Trayectoria completa de transmisión entre el transmisor y el receptor.



Tomado de: <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

Figura 37. Potencia en dBm en función de las distancia para un radioenlace



Tomado de: <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

4.1.1. Lado de Transmisión

4.1.1.1. Potencia de Transmisión

La potencia de transmisión es la potencia de salida del radio. El límite superior depende de las regulaciones vigentes en cada país, dependiendo de la frecuencia de operación y puede cambiar al variar el marco regulatorio.

Usualmente la potencia es expresada en decibeles o miliwatts y siempre representada con un valor positivo en dBm (mayor a 1mW) mientras que la sensibilidad es un valor negativo en dBm (menor a 1 mW). La potencia de transmisión típica en los equipos IEEE 802.11 varía entre +15 dBm (33mW) y +26 dBm (400 mW).

La potencia de transmisión del radio, normalmente se encuentra en las especificaciones técnicas del vendedor. Tenga en cuenta que las especificaciones técnicas le darán valores ideales, los valores reales pueden variar con factores como la temperatura y la tensión de alimentación.

4.1.1.2. Pérdidas en el Cable

Las pérdidas en la señal del radio se pueden producir en los cables que conectan el transmisor y el receptor a las antenas. Las pérdidas dependen del tipo de cable y la frecuencia de operación y normalmente se miden en dB/m o dB/pies.

Independientemente de lo bueno que sea el cable, siempre tendrá pérdidas. Por eso, hay que tener presente que el cable de la antena debe ser lo más corto

posible. La pérdida típica en los cables está entre 0,1 dB/m y 1 dB/m. En general, mientras más grueso y más rígido sea el cable menor atenuación presentará.

Para tener una idea de cuán grande puede ser la pérdida en un cable, se considera que se está usando un cable RG58 que tiene una pérdida de 1 dB/m, para conectar un transmisor con una antena. Usando 3 m de cable RG58 es suficiente para perder el 50% de la potencia (3 dB).

Las pérdidas en los cables dependen mucho de la frecuencia. Por eso al calcular la pérdida en el cable, hay que asegurarse de usar los valores correctos para el rango de frecuencia usada. Es indispensable la hoja de datos del distribuidor y si es posible, verificar las pérdidas tomando sus propias mediciones. Como regla general, puede tener el doble de pérdida en el cable [dB] para 5,4 GHz comparado con 2,4 GHz.

Tabla 4. Valores típicos de pérdida en los cables para 2,4GHz.

| Tipo de Cable | Perdida (dB/100m) |
|----------------------|--------------------------|
| RG 58 | ca 80 - 100 |
| RG 213 | ca 50 |
| LMR-200 | 50 |
| LMR-400 | 22 |
| Aircom Plus | 22 |
| LMR-600 | 14 |
| Flexline de ½ " | 12 |
| Flexline de 7/8" | 6,6 |
| C2FCP | 21 |
| Heliac de ½ " | 12 |
| Heliac de 7/8 " | 7 |

Tomada de: <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

4.1.1.3. Pérdidas en los Conectores

Siempre se considera un promedio de pérdidas de 0,3 a 0,5 dB por conector como regla general. Estos valores son para conectores bien hechos mientras que los conectores soldados rudimentariamente pueden implicar pérdidas mayores. Es indispensable la hoja de datos del distribuidor para tener en cuenta en el rango de frecuencia el tipo de conector a emplear.

4.1.1.4. Pérdidas en el Lightning Protector

Los protectores contra descargas eléctricas que se usan entre las antenas y el radio deben ser presupuestados hasta con 1 dB de pérdida cada uno, dependiendo del tipo. Es indispensable revisar la hoja de datos del distribuidor, ya que un protector de muy buena calidad solo introduce 0,2 dB de pérdida.

4.1.1.5. Amplificadores desde el Transmisor

Opcionalmente, se pueden usar amplificadores para compensar la pérdida en los cables o cuando no haya otra manera de cumplir con el presupuesto de potencia. En general, el uso de amplificadores debe ser la última opción. Una selección inteligente de las antenas y una alta sensibilidad del receptor son mejores que la amplificación.

Los amplificadores de alta calidad son costosos y uno económico empeora el espectro de frecuencia (ensanchamiento), lo que puede afectar los canales adyacentes. Todos los amplificadores añaden ruido extra a la señal, y los niveles de potencia resultantes pueden contravenir las normas legales de la región.

Técnicamente hablando, prácticamente no hay límites en la cantidad de potencia que puede agregar a través de un amplificador, pero hay que tener en cuenta que los amplificadores siempre elevan el ruido.

4.1.1.6. Ganancia de Antena desde el Transmisor

Las antenas inalámbricas no son diseñadas para difundir la energía en todas direcciones en cambio se diseñan para dirigir la señal total de radio en el área a la cual aspiramos a proveer de cobertura.

Entre más grande sea la ganancia de una antena, esta es más directiva y el haz de radio es más angosto.

Las antenas son elementos pasivos que no amplifican la señal de radio y solo concentran la señal en la cierta dirección. Cuando se usa como transmisora la antena es responsable de dirigir la potencia del radiotransmisor en la cierta dirección; cuando actúa como receptora la antena colecta la potencia de radio que le envió el receptor.

Aunque las antenas son elementos pasivos y no proveen ninguna amplificación, desde el punto de vista de los cálculos en el presupuesto del enlace de radio, son consideradas como un "Ganancia" de la señal de radio.

Esto significa que sólo puede esperar una ganancia completa de antena, si está instalada en forma óptima, ya que las pérdidas pueden ocurrir por muchas razones, principalmente relacionadas con una incorrecta instalación (pérdidas en la inclinación, en la polarización, objetos metálicos adyacentes).

4.1.2. Pérdidas de Propagación

Las pérdidas de propagación están relacionadas con la atenuación que ocurre en la señal cuando esta sale de la antena de transmisión hasta que llega a la antena receptora.

4.1.2.1. Pérdidas en el Espacio libre

La mayor parte de la potencia de la señal de radio se perderá en el aire. Aún en el vacío, una onda de radio pierde energía (de acuerdo con los principios de Huygens) que se irradia en direcciones diferentes a la que puede capturar la antena receptora.

La Pérdida en el Espacio libre (FSL), mide la potencia que se pierde en el mismo sin ninguna clase de obstáculo. La señal de radio se debilita en el aire debido a la expansión dentro de una superficie esférica.

Las pérdidas en el espacio libre pueden calcularse como la relación de la Potencia radiada por el emisor entre la Potencia Recibida en la antena del receptor

$\frac{P_{Rad}}{P_{Rec}} = \left(\frac{G_R \cdot G_t}{L} \right) \cdot \left(\frac{P_t}{P_r} \right)$, reemplazando la potencia del transmisor (P_t) y la potencia

recibida en el receptor (P_r) según lo expresado en la sección 3.2.1.1 se obtiene la

siguiente ecuación $FSL = \left(\frac{4\pi \cdot d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi \cdot d \cdot f}{C} \right)^2$, expresándola en decibeles con

unidades de metros y hertz se obtiene:

$$FSL[dB] = 20\text{Log}_{10}(d) + 20\text{Log}_{10}(f) - 147,5$$

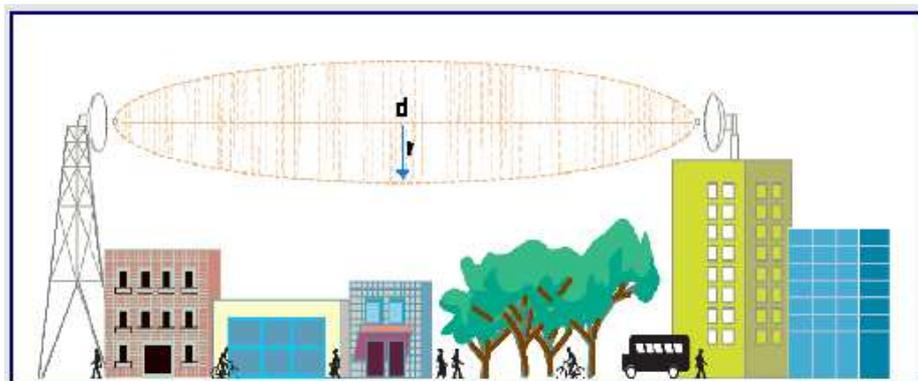
Estos valores son teóricos y pueden muy bien diferir de las mediciones tomadas, El término “espacio libre” no es siempre tan “libre”, y las pérdidas pueden ser muchas veces más grandes debido a las influencias del terreno y las condiciones climáticas. En particular, las reflexiones en cuerpos de agua o en objetos conductores pueden introducir pérdidas significativas.

4.1.2.2. Zonas de Fresnel

Recordando el principio de Huygens, es fácil ver que los puntos que no están en el eje directo entre A y B también radian alguna potencia hacia el punto B, un análisis detallado toma en cuenta la interferencia entre todas las ondas y nos presenta el concepto de la primera zona de Fresnel, el cual es el espacio alrededor de la línea recta que une el transmisor con el receptor y que contribuye a la transferencia de potencia desde la fuente hacia el receptor. Ver figura 38.

Basados en esto, podemos investigar cuál debería ser la máxima penetración de un obstáculo (por ej. un edificio, una colina o la propia curvatura de la tierra) en esta zona para contener las pérdidas.

Figura 38. Zona de Fresnel



Tomado de http://eslared.org.ve/tricalcar/03_es_radio-fisica_guia_v01%5b1%5d.pdf

Lo ideal es que la primera zona de Fresnel no esté obstruida, pero en la práctica es suficiente despejar el 60% del radio de la primera zona de Fresnel para tener un enlace satisfactorio. Para el cálculo de la primera zona de Fresnel se emplea la siguiente ecuación:

$$R_{Fresnel} = 17,32 \cdot \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2}{d \cdot f}}$$

Donde:

$R_{Fresnel}$ es el radio en m

d_1 es la distancia desde el transmisor al obstáculo en Km

d_2 es la distancia desde el receptor al obstáculo en Km

d es la distancia entre transmisor y el receptor en Km

f es la frecuencia en GHz

En aplicaciones críticas se debe hacer el cálculo para condiciones anómalas de propagación, en la cuales las ondas de radio se curvan hacia arriba y por lo tanto se requiere altura adicional en las torres. Para grandes distancias hay que tomar en cuenta la curvatura terrestre que introduce una altura adicional que deberán despejar las antenas.

4.1.3. Lado del Receptor

Los cálculos son casi idénticos que los del lado transmisor.

4.1.3.1. Amplificadores desde el Receptor

Véase "4.1.1.5. Amplificadores desde el Transmisor".

4.1.3.2. Ganancia de Antena desde el Receptor

Véase “4.2.6. Ganancia de Antena desde el Transmisor”.

4.1.3.3. Sensibilidad del Receptor

La sensibilidad de un receptor ó también llamado mínimo RSL (Received Signal Level) es un parámetro que merece especial atención ya que identifica el valor mínimo de potencia que necesita para poder decodificar/extraer “bits lógicos” y alcanzar una cierta tasa de bits.

La sensibilidad del receptor siempre se expresa como un dBm negativo (- dBm). Cuanto más baja sea la sensibilidad, mejor será la recepción del radio, teniendo presente que el RSL mínimo depende de la velocidad, y como una regla general, ante una velocidad más baja se tiene mayor sensibilidad. Un valor típico es -82 dBm en un enlace de 11 Mbps y -94 dBm para uno de 1 Mbps.

Una diferencia de 10dB aquí (que se puede encontrar fácilmente entre diferentes tarjetas) es tan importante como 10 dB de ganancia que pueden ser obtenidos con el uso de amplificadores o antenas más grandes. Hay que destacar que la sensibilidad depende de la tasa de transmisión.

Tabla 5. Valores típicos de la sensibilidad del receptor de las tarjetas de red inalámbrica.

| Tarjeta | 11 Mbps | 5,5 Mbps | 2 Mbps | 1 Mbps |
|----------------------------------|---------|----------|---------|---------|
| Orinoco cards PCMCIA Silver/Gold | -82 dBm | -87 dBm | -91 dBm | -94 dBm |
| Senao 802.11b card | -89 | -91 | -93 | -95 |

Tomado de: <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

4.1.3.4. Margen de Enlace

No es suficiente que la señal que llega al receptor sea mayor que la sensibilidad del mismo, sino que además se requiere que haya cierto margen para garantizar el funcionamiento adecuado.

El cálculo de presupuesto de enlace es para estar seguro de que el margen en el receptor es mayor que un cierto umbral. Además, la PIRE debe estar dentro de las regulaciones. El margen de un presupuesto de enlace puede ser resumido de la siguiente manera:

MARGEN [dBm] = potencia del transmisor [dBm] – pérdida en el cable TX [dB] + ganancia de antena TX [dBi] – pérdidas de propagación [dB] + ganancia de antena RX [dBi] – pérdidas en el cable del RX [dB] – sensibilidad del receptor [dBm].

4.1.3.5. Relación Señal a Ruido (S/N)

La relación entre el ruido y la señal se mide por la tasa de señal a ruido (S/N). Un requerimiento típico de la SNR es 16 dB para una conexión de 11 Mbps y 4 dB para la velocidad más baja de 1 Mbps. En situaciones donde hay muy poco ruido el enlace está limitado primeramente por la sensibilidad del receptor. En áreas urbanas donde hay muchos radioenlaces operando, es común encontrar altos niveles de ruido (tan altos como -92 dBm). En esos escenarios, se requiere un margen mayor:

$$\frac{S}{N} [dB] = 10 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{\text{Potencia de la señal} [W]}{\text{Potencia del Ruido} [W]} \right)$$

En condiciones normales sin ninguna otra fuente en la banda de 2.4 GHz y sin ruido de industrias, el nivel de ruido es alrededor de los -100 dBm.

5. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ENLACE WIFI

A manera de complemento práctico del trabajo investigativo planteado en los capítulos anteriores, se presentará a continuación la realización de un enlace punto a punto empleando el estándar IEEE 802.11.

El enlace consiste en unir dos redes cableadas pertenecientes a edificios contiguos de la Universidad Tecnológica de Bolívar sede de ternera (Auditorio y Maloka), mediante un enlace punto a punto empleando un Access Point en cada extremo. La separación entre cada AP es de **15m**. De igual manera para incrementar la potencia de la señal se reemplazaron las antenas omnidireccionales de los Access Points por antenas directivas.

Para las mediciones de la potencia radiada se emplea un computador portátil que posea conectividad inalámbrica y el programa **Network Tumbler Versión 0.4.0**

5.1. Aspectos Generales

5.1.1. Radios

Tanto en el transmisor como en el receptor se emplean Access Point marca D-Link modelo DWL-2100AP el cual posee una potencia de transmisión máxima de 15dBm y trae consigo una antena omnidireccional de 1dB. (Ver anexo E –Data Sheet de Access Points-).

El AP colocado en el lado transmisor se configuró para trabajar como Access Point, mientras que AP colocado en el lado receptor se configuró como repetidor del anterior, para así establecer una conexión de puente entre los dos.

5.1.2. Antenas

Como se mencionó anteriormente se emplean antenas direccionales construidas por los autores de este documento, con el fin de incrementar la potencia de la señal.

5.1.2.1. Construcción de las Antenas Direccionales

El tipo de antena a construir es prácticamente una guía de onda, cuya configuración es básicamente un cilindro de paredes lisas y cerrado en un extremo. Para la construcción de cada una de estas antenas, se requieren de los siguientes materiales:

- 1 lata de papas pringles
- 1 conector tipo N – hembra
- 1 alambre de cobre de 2mm de diámetro
- soldador y estaño

La casualidad ha hecho que las latas de pringles tengan las medidas apropiadas (aunque no ideales), ya que se trata de una lata de 73mm de diámetro y 230mm de largo.

Para el caso de las guías de ondas circulares, los valores apropiados para el diámetro deben encontrarse entre 0.6 y 0.75 veces la longitud de onda de la señal en el aire, para el caso de 2.462 GHz (canal 11), el rango del diámetro se encuentra entre 73 y 91mm. El largo óptimo de la lata debe ser de $0.75 \lambda_g$; donde λ_g es la longitud de la onda estacionaria que se forma en la guía de onda y se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\lambda_o^2} = \frac{1}{\lambda_c^2} + \frac{1}{\lambda_g^2}$$

Donde:

$\lambda_o = \frac{c}{f}$ es la longitud de onda de la señal en el espacio libre, para el caso de

$f = 2.462GHz$, $\lambda_o = 121,8mm$.

$\lambda_c = 1.706 \cdot D$ es la longitud de onda de la frecuencia más baja, que puede ser transmitida por una guía de onda circular. Para el caso de $D = 73mm$,

$\lambda_c = 124,5mm$.

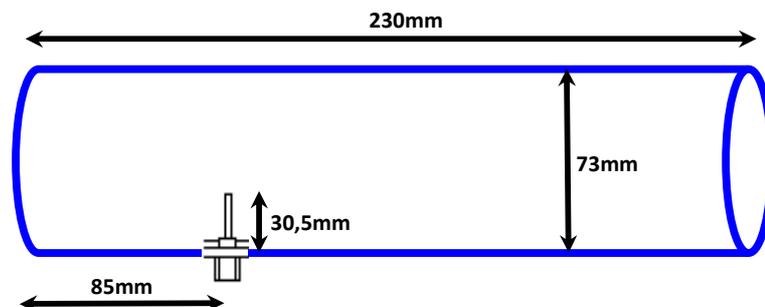
A partir de los datos anteriores se obtiene $\lambda_g = 589,9mm$ y $L = 442,4mm$.

Dando como resulta que se cumpla con el diámetro mínimo mas no con la longitud de la guía de onda. Aun así, es posible obtener una antena con una ganancia de hasta 9dB y un alcance de hasta 400 – 500mts en el rango de velocidades de wifi.

Para el montaje de la antena (ver figura 39); se perfora un agujero a cierta distancia del extremo cerrado en el cual se inserta el conector tipo N –hembra que

lleva soldado un dipolo $\lambda_o/4$. Para el caso de $f = 2.462GHz$, $\frac{\lambda_o}{4} = \frac{c}{4f} = 30,5mm$.

Figura 39. Montaje antena guía de onda



5.1.2.2. Medición de la Ganancia de las Antenas Direccionales

La ganancia se calculó mediante la comparación de la potencia radiada por la antena omnidireccional de 1dB que trae por defecto el Access Point y la potencia radiada por una de las antenas direccionales. La ganancia de la segunda antena direccional se considera idéntica a la primera debido a que el proceso de elaboración de ambas antenas es igual.

Dado que la potencia de transmisión del Access Point es conocida (15dBm) al igual que la ganancia de la antena omnidireccional (1dB) es posible calcular la ganancia de la antena direccional de la siguiente manera:

$$P_{Rad}(ant_Omni)[dBm] = P_T(transmisor)[dBm] - L(pigtail)[dB] + G(ant_Omni)[dB] - LFS[dB]$$

$$P_{Rad}(ant_directiva)[dBm] = P_T(transmisor)[dBm] - L(pigtail)[dB] + G(ant_directiva)[dB] - LFS[dB]$$

$$G(ant_directiva)[dB] = P_{Rad}(ant_directiva)[dBm] - P_{Rad}(ant_Omni)[dBm] + G(ant_Omni)[dB]$$

La práctica se realizó en el campo de softball de la UTB (espacio abierto) con un enlace punto a punto en el cual la distancia entre Access Points fue de 80m. Ver figura 40.

En las tablas 6 y 7 se resumen los datos de potencia radiada medidos en el ensayo, así como la comparación con los valores teóricos y el cálculo de la ganancia. (Ver Anexo F -Cálculo del Enlace-)

Figura 40. Esquema del enlace empleado para la medición de la Ganancia de la antena direccional.

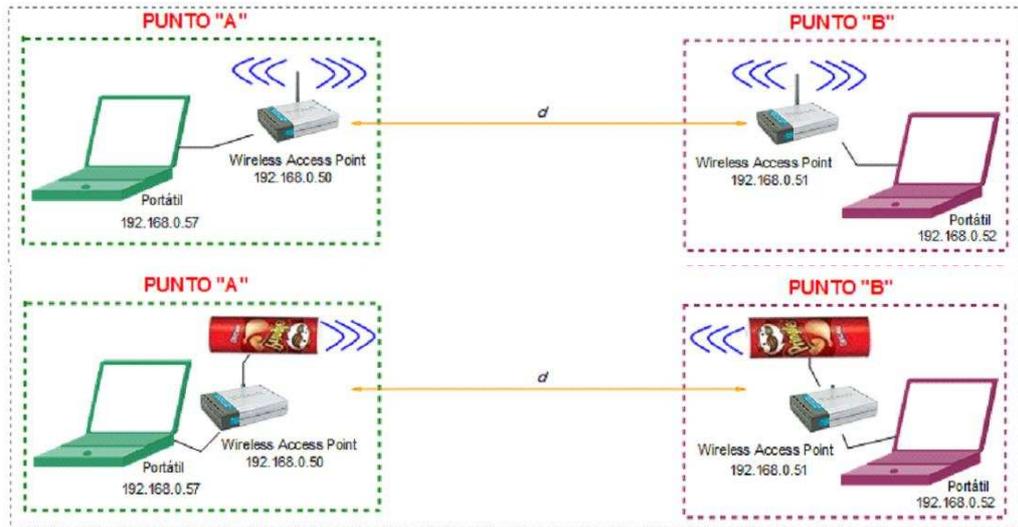


Tabla 6. Resumen de datos obtenidos en la medición de las Potencias Radiadas de ambas antenas y cálculo de la ganancia de la antena direccional.

| | P_Radiada_40m | P_Radiada_80m |
|--------------------|---------------|---------------|
| | Medida | Medida |
| Antena Omnidirecci | -58 dBm | -62 dBm |
| Antena Directiva | -52 dBm | -56 dBm |
| Ganancia | 7 dB | |

Tabla 7. Resumen de datos de las Potencias Radiadas (medidas y teóricas) de ambas antenas y cálculo del porcentaje de error.

| | P_Radiada_40m | | | P_Radiada_80m | | |
|------------------------|---------------|---------|--------|---------------|---------|--------|
| | Medida | Teórica | %Error | Medida | Teórica | %Error |
| Antena Omnidireccional | -58 | -57,16 | 1,47 | -62 | -63,18 | 1,87 |
| Antena Directiva | -52 | -51,16 | 1,64 | -56 | -57,179 | 2,06 |

5.1.3. Cables y Conectores

Para comunicar cada una de las antenas directivas diseñadas a sus respectivos Access Points se emplea un Pigtail conformado por 50cm de cable **LMR-200** (el cual posee una atenuación de **50dB/100m**. Ver Tabla 4), un conector N-Macho (que comunica con la antena) y un conector Reverse SMA (que comunica con el AP). La tabla 8 muestra los cálculos para las pérdidas en este elemento.

Tabla 8. Cálculo de Perdidas debido a cada Pigtail (cableado y conectores)

| Perdidas_pigtail | | 0,85 dB |
|------------------|---------|---------|
| Cable LMR-200 | 0,25 dB | |
| Conector N-Macho | 0,3 dB | |
| Conector R-SMA | 0,3 dB | |

5.2. Lado Transmisor

5.2.1. Configuración del Radio

Como ya se mencionó anteriormente, para poder establecer una conexión en puente entre el AP del lado transmisor y el AP del lado receptor, el AP transmisor se configuró para trabajar como Access Point, mientras que AP colocado en el lado receptor se configuró como repetidor del anterior. Las figura 41 y 42 muestran los parámetros de configuración del AP del lado transmisor.

En la práctica se trabajó con cuatro niveles para la potencia del transmisor, Full potencia (15dBm), potencia disminuida en 3dB (12dBm), potencia disminuida en 6dB (9dBm) y potencia disminuida en 9dB (6dBm), esto con el fin de buscar el mejor punto de operación que permita una buena eficiencia y un mínimo consumo.

Figura 41. Configuración del radio DWL-2100AP lado transmisor como Access Point.



Figura 42. Configuración LAN del radio DWL-2100AP lado transmisor.



5.3. Pérdidas por Propagación

Como ya se mencionó, las pérdidas por propagación son independientes de la potencia en el transmisor o receptor, sino que dependen de la separación entre cada AP (para este caso **15 m**) y la frecuencia de transmisión (**2,462GHz, Canal 11** del protocolo de Wifi), con lo que se obtienen pérdidas por propagación de **63,79dB**. (Ver anexo F).

Adicionalmente debido a la pequeña distancia entre el transmisor y el receptor y se cuenta con una línea de vista libre de obstáculos se decidió no calcular la Zona Fresnel.

5.4. Lado Receptor

5.4.1. Configuración del Radio

El Access Point colocado en el lado receptor se configuró como repetidor del Access Point colocado en el transmisor. Las figuras 43 y 44 muestran los parámetros de configuración del AP del lado receptor.

Figura 43. Configuración del radio DWL-2100AP lado receptor como Repetidor.



Figura 44. Configuración LAN del radio DWL-2100AP lado receptor.



5.4.2. Sensibilidad del receptor

La sensibilidad del Access Point D-Link modelo DWL-2100AP depende de la tasa de transferencia a la cual se realice la conexión, sin embargo se encuentra entre los -66dBm y los -89dBm para una tasa de transferencia de 54Mbps y 2Mbps respectivamente. La tabla 9 muestra los distintos niveles de sensibilidad del AP.

Tabla 9. Niveles de sensibilidad del Access Point DWL D-Link 2100AP.

| SENSIBILIDAD DEL RECEPTOR | | | | | |
|---------------------------|------------|--------------|-----------------------|------------|--------------|
| Tasa de Transferencia | Modulación | Sensibilidad | Tasa de Transferencia | Modulación | Sensibilidad |
| 54 Mbps | OFDM | -66 dBm | 12 Mbps | OFDM | -85 dBm |
| 48 Mbps | OFDM | -71 dBm | 11 Mbps | CCK | -83 dBm |
| 36 Mbps | OFDM | -76 dBm | 9 Mbps | OFDM | -86 dBm |
| 24 Mbps | OFDM | -80 dBm | 6 Mbps | OFDM | -87 dBm |
| 18 Mbps | OFDM | -83 dBm | 2 Mbps | QPSK | -89 dBm |

5.4.3. Potencia Recibida en la antena receptora.

La potencia recibida en la antena del receptor para cada uno de los niveles de la potencia de transmisión es medida y comparada con los valores teóricos calculados. (Ver anexo F). La tabla 10 muestra dichos datos y los porcentajes de error respectivos

Tabla 10. Comparación de la Potencia Recibida en la Antena Receptora medida y teórica.

| G_Directiva | | | |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 7 dB | | | |
| P_transmisión Full | P_transmisión -3dB | P_transmisión -6dB | P_transmisión -9dB |
| 15 dBm | 12 dBm | 9 dBm | 6 dBm |
| Pérdidas en el Espacio Libre | | 63,79 | dB |
| Pérdidas en el Pigtail | | 0,85 | dB |
| Potencia_Teórica Antena_Receptora | | | |
| -42,64 dBm | -45,64 dBm | -48,64 dBm | -51,64 dBm |
| Potencia_Medida Antena_Receptora | | | |
| -43 dBm | -45 dBm | -48 dBm | -52 dBm |
| Porcentaje de error | | | |
| 0,846 | 1,401 | 1,315 | 0,698 |

5.4.4. Relación Señal a Ruido (S/N) y Margen de Enlace

En las mediciones realizadas se encontró que para cada uno de los casos el nivel de ruido fue de **-100dBm** que es en realidad el tope inferior del rango de medición del programa Network Stumbler. Por tal razón se puede concluir que existe muy

poco ruido en el enlace y por ello dicho enlace se encuentra limitado por la sensibilidad del receptor más que por la relación S/N.

El margen de enlace fue calculado a partir de los datos medidos de la potencia recibida en la antena receptora (Ver tabla 11) de la siguiente manera:

$$\text{MARGEN [dBm]} = \text{Potencia en la antena receptora [dBm]} + \text{ganancia de antena RX [dB]} - \text{pérdidas en el cableado y conectores del RX [dB]} - \text{sensibilidad del receptor [dBm]}$$

Tabla 11. Cálculo del margen de enlace para cada una de los niveles de la potencia de transmisión y los niveles máximos y mínimos de sensibilidad del receptor.

| | | | |
|---|------------|------------|------------|
| Potencia_Medida Antena_Receptora | | | |
| -43 dBm | -45 dBm | -48 dBm | -52 dBm |
| Potencia_Calculada Receptor | | | |
| -36,85 dBm | -38,85 dBm | -41,85 dBm | -45,85 dBm |
| Sensibilidad Mínima del Receptor [54 Mbps] | | | |
| -66 dBm | | | |
| Margen de Enlace Mínimo | | | |
| 29,15 dB | 27,15 dB | 24,15 dB | 20,15 dB |
| Sensibilidad Máxima del Receptor [2 Mbps] | | | |
| -89 dBm | | | |
| Margen de Enlace Mínimo | | | |
| 52,15 dB | 50,15 dB | 47,15 dB | 43,15 dB |

El margen de enlace en el caso más crítico (potencia del transmisor reducida en 9dB) es de **20dB** con lo cual se garantiza que incluso con condiciones climáticas adversas es posible mantener el enlace con una tasa de transferencia de **54Mbps**, además para ese mismo nivel de potencia en el transmisor y para una tasa de transferencia de **2Mbps** se tiene un margen de enlace de más de **40dB**.

Por lo cual se recomienda trabajar con una potencia de transmisión de **9dBm**.

CONCLUSIONES

La identificación y comprensión de los aspectos teóricos de los elementos que conforman un enlace inalámbrico, tales como antenas, cables, conectores y protecciones, nos permitió entender cómo trabaja cada uno de los elementos que conforman un enlace WiFi, y además realizar una correcta selección de los mismos basados en parámetros tales como la frecuencia de operación, tipo de montaje y tipo de tecnología, con el fin de obtener un buen desempeño de la red.

El medio de transporte en las redes inalámbricas son ondas electromagnéticas, específicamente en el rango de los 2,4GHz para Wifi. Dichas ondas electromagnéticas son afectadas por los mismos fenómenos físicos que afectan a los fenómenos ondulatorios de otra naturaleza (Luz, sonido, etc.) tales como atenuación, absorción, reflexión, difracción, refracción e interferencia.

Entender los elementos de un enlace y su aporte a todo el presupuesto, en términos de ganancias o pérdidas, es crucial para implementar una red inalámbrica que funcione en forma confiable. Para ello los puntos más importantes que se deben tener en cuenta resumidos como:

- Tener un buen presupuesto de enlace es un requerimiento básico para el buen funcionamiento del mismo.
- Un presupuesto de enlace de una red inalámbrica es la cuenta de todas las ganancias y pérdidas desde el radio transmisor hacia el receptor.
- Las pérdidas más grandes del enlace se producen en la propagación en espacio libre debido a la atenuación geométrica de la señal.
- La sensibilidad del receptor es un parámetro que indica el valor mínimo de potencia que se necesita para alcanzar una cierta tasa de bit.

El presupuesto de un enlace es fundamental para obtener un buen diseño y montaje de una red inalámbrica, por ello se deben tener en cuenta los fenómenos físicos, climatológicos y topográficos que afectan a las ondas electromagnéticas (atenuación, absorción, reflexión, difracción, refracción e interferencia) considerando dentro del cálculo del enlace los factores de Pérdida en espacio libre, Zona de Fresnel, línea de vista y el efecto de trayectoria múltiple. Adicionalmente también se hace necesario considerar el efecto de los elementos activos y pasivos (pérdidas y/o ganancias) que conforman el enlace con el fin de garantizar un desempeño adecuado.

En muchos casos, satisfacer los requisitos de un presupuesto de enlace será suficiente para encontrar una solución óptima para cada situación. Adicionalmente deben considerar otros aspectos como: la carga de viento, las condiciones del clima, la disponibilidad del enlace, etc.

El diseño y la implementación de un enlace punto a punto entre dos edificios de la Universidad Tecnológica de Bolívar empleando tecnología 802.11 (Wifi), se convierte en un complemento práctico en el cual se pone de manifiesto el trabajo investigativo realizado anteriormente.

El resultado del enlace realizado muestra que se puede tomar como punto de operación la potencia de transmisión de 6dBm (9dB debajo de la potencia máxima) con lo cual se reduce el consumo de potencia sin comprometer la integridad del enlace ya que para este nivel de potencia y considerando el caso más crítico (tasa de transferencia de 54Mbps y sensibilidad de receptor de -66dB) se tiene un margen de enlace de **20dB**. Este nivel de Margen garantiza que incluso con condiciones climáticas adversas es posible mantener el enlace a una tasa de transferencia de **54Mbps**, además para ese mismo nivel de potencia en el transmisor y para una tasa de transferencia de **2Mbps** se tiene un margen de enlace de más de **40dB**.

BIBLIOGRAFÍA

ARRAZOLA, Guillermo y BADILLO, Jacir. Análisis y Diseño de la Solución de Conectividad Wireless para la Universidad Tecnológica de Bolívar Campus de Ternera, Utilizando Tecnologías WiFi. Monografía. UTB 2004.

BARRIOS, Cristian C. y CARRASCAL, Yanira U. Estudio de la Tecnología WiFi, para Acceso Inalámbrico a Redes de Comunicaciones Electrónicas de Ámbito Reducido. Monografía. UTB 2005.

CARBALLAR, José. Wi-Fi Cómo construir una red inalámbrica. 2ª Edición, Alfaomega. 2005.

CARDAMA, Ángel. Antenas. Alfaomega. Edición 2000.

ESCUADERO, Alberto P. Editor. Documento preparado para el taller de comunicaciones inalámbricas de Tshwane en Sudáfrica (c) 7th. September 2005, Creative Commons Deed. Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0(c). 21 Abril 2007. Disponible en <http://eslared.org.ve/tricalcar/>

TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4ª Edición, Prentice Hall, 2003.

Wireless Networking in the Developing World, A practical guide to planning and building low-cost telecommunications infrastructure. 1ª Edición. Limehouse Book Sprint Team. 2006.

<http://www.air802.com/es/Lightning-Protector-p-1-c-387.html>

<http://www.ant.com.es/index.php?id=2&pr=35>

<http://www.bbwexchange.com/glossary/>

http://www.comprawifi.com/antenas-cables/protectores/cat_215.html

<http://www.epirsa.com/contenido/productos/coaxiales.htm>

<http://www.eur-am.com/connector.htm>

<http://www.gnswireless.com/rfconnectors.htm>

<http://www.harger.com/products/index.cfm?mcatid=3>

<http://www.le-grossiste-informatique.com/antenne-wifi/antenne-wifi.htm>

<http://www.lincomatic.com/wireless/homebrewant.html>

http://www.netkrom.com/es/prod_accesorios_surge_protectors.html

<http://www.patolopez.cl/conectores.htm>

<http://www.rflinx.com/products/lightning-arrestors/>

<http://www.trendnet.com/sp/products/TEW-ASAK.htm#>

http://www.wimo.de/lightning-protectors_s.html