

# 4

## Antenas y Líneas de Transmisión

El transmisor que genera la energía de RF<sup>1</sup> para entregar a la antena generalmente está ubicado a cierta distancia de la misma. El enlace entre ambos es la **línea de transmisión de RF**. Su propósito es transportar la energía de RF desde un lugar hacia el otro de la forma más eficiente posible. Del lado del receptor, la antena es responsable de captar las señales de radio desde el aire y pasarlas al receptor con la mínima cantidad de distorsión, para que el radio pueda decodificar la señal. Por estas razones el cable de RF tiene un rol muy importante en los sistemas de radio: debe mantener la integridad de las señales en ambas direcciones.

Existen dos categorías principales de líneas de transmisión: los cables y las guías de ondas. Ambos son muy buenos para transportar de forma eficiente la energía de RF a 2,4GHz.

### 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

---

1. Radio Frecuencia. Vea el capítulo dos para una discusión sobre las ondas electromagnéticas.

recubrimiento generalmente de PVC. 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 pelicular”.

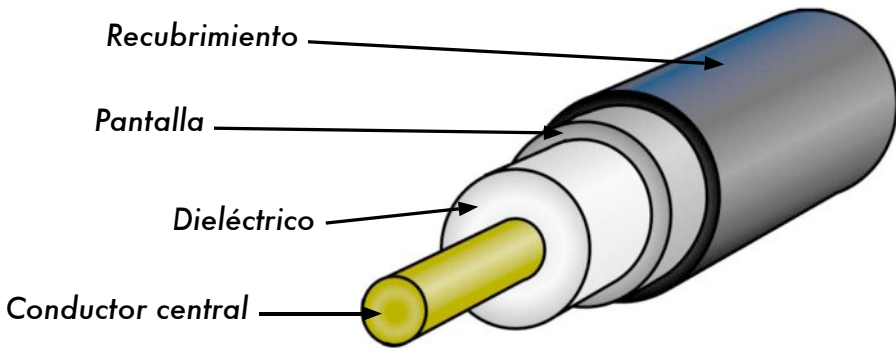


Figura 4.1: Cable coaxial con recubrimiento, pantalla, dieléctrico, y conductor central.

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 decibelios 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. Obviamente se necesita minimizar la atenuación del cable cuanto más nos sea posible, lo que puede hacerse mediante la utilización de cables muy cortos y/o de buena calidad.

Aquí les brindamos algunos puntos a considerar cuando elegimos un cable para utilizarlo con dispositivos de microondas:

1. “¡Cuanto más corto mejor!” La primer regla cuando instalamos un cable es la de hacerlo lo más corto posible. La pérdida de energía no es lineal, por lo tanto duplicar el largo del cable implica perder mucho más que el doble de energía. En el mismo sentido, si reducimos el largo del cable a la mitad vamos a tener mucho más que el doble de potencia en la antena. La mejor solución es poner el transmisor lo más cerca que podamos de la antena, incluso si esto implica colocarlo en una torre.
2. “¡Cuanto más barato peor!” La segunda regla de oro es que todo el dinero que se invierta en comprar un cable de **buena calidad** es un buen

negocio. Los cables baratos están pensados para ser utilizados con bajas frecuencias como VHF. Las microondas requieren de los cables de mejor calidad que haya disponibles. Todas las demás opciones no serán más que cargas fantasma para la radio<sup>2</sup>.

3. Evite usar RG-58: fue pensado para redes Ethernet, CB o radio de VHF, no para microondas.
4. Evite usar RG-213: fue diseñado para CB y radio de HF. En este caso el diámetro del cable no implica alta calidad o baja atenuación.
5. Siempre que sea posible utilice cables **Heliac** (también denominados “Foam” –espuma–) para conectar el transmisor a la antena. Cuando no haya cable Heliac utilice los mejores cables LMR que pueda encontrar. Los cables Heliac tienen un centro conductor sólido o tubular con un conductor externo sólido y corrugado que lo hace flexible. Estos cables pueden construirse de dos formas, utilizando aire o espuma para el dieléctrico. Los cables Heliac con dieléctrico de aire son los más caros y garantizan la menor pérdida, pero son muy difíciles de manipular. Los de espuma tienen una pérdida ligeramente mayor, pero son más económicos y sencillos de instalar. Se requiere un procedimiento especial cuando soldamos conectores para mantener la espuma dieléctrica seca e intacta. La marca de cables coaxiales Times Microwave LMR los produce en varios diámetros, y funcionan bien en frecuencias de microondas. Los cables LMR-400 y LMR-600 se utilizan comúnmente como alternativas al Heliac.
6. Siempre que sea posible utilice cables que ya tengan los conectores, y que hayan sido probados en un laboratorio apropiado. La instalación de los conectores en el cable es una tarea delicada y se hace difícil realizarla adecuadamente aún teniendo las herramientas necesarias. A menos que tenga acceso al equipamiento que pueda verificar un cable hecho por usted mismo (como un analizador de espectro y un generador de señal, o un reflectómetro de dominio temporal), solucionar los problemas de una red que utiliza cables hechos en casa puede ser difícil.
7. No maltrate su línea de transmisión. Nunca camine sobre el cable, no lo doble demasiado, no intente desenchufar un conector halando directamente el cable. Todos esos comportamientos pueden cambiar las características mecánicas del cable y por lo tanto su impedancia, provocar un cortocircuito entre el conductor interno y la pantalla, o incluso romper la línea. Rastrear y reconocer este tipo de problemas no es tarea fácil, y esto puede llevar a un comportamiento impredecible del radioenlace.

---

2. Una carga fantasma disipa energía de RF sin radiarla. Imagínese un sumidero de calor pero a radio frecuencias.

## Guías de Ondas

Por encima de los 2 GHz, la longitud de onda es lo suficientemente corta como para permitir una transferencia de energía práctica y eficiente por diferentes medios. Una guía de onda es un tubo conductor a través del cual se transmite la energía en la forma de ondas electromagnéticas. El tubo actúa como un contenedor que confina las ondas en un espacio cerrado. El efecto de Faraday atrapa cualquier campo electromagnético fuera de la guía. Los campos electromagnéticos son propagados a través de la guía de onda por medio de reflexiones en sus paredes internas, que son consideradas perfectamente conductoras. La intensidad de los campos es máxima en el centro a lo largo de la dimensión X, y debe disminuir a cero al llegar a las paredes, porque la existencia de cualquier campo paralelo a las mismas en su superficie causaría una corriente infinita en un conductor perfecto. Las guías de ondas, por supuesto, no pueden transportar la RF de esta forma.

En la siguiente figura pueden verse las dimensiones X, Y, y Z de una guía de ondas rectangular:

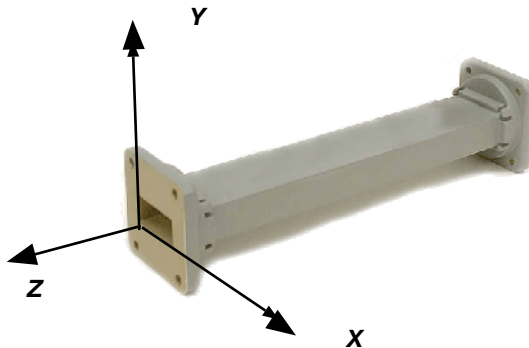


Figura 4.2: Las dimensiones X, Y, y Z de una guía de onda rectangular.

Hay un infinito número de formas en las cuales los campos eléctricos y magnéticos pueden organizarse en una guía de onda a frecuencias por encima de la frecuencia de corte. Cada una de esas configuraciones del campo se denomina **modo**. Los modos pueden separarse en dos grupos generales. Uno de ellos es el Transversal Magnético (**TM** por su sigla en inglés), donde el campo magnético es siempre transversal a la dirección de propagación, pero existe un componente del campo eléctrico en la dirección de propagación. El otro es el Transversal Eléctrico (**TE** por su sigla en inglés), en el que el campo eléctrico es siempre transversal, pero existe un componente del campo magnético en la dirección de propagación.

El modo de propagación se identifica por dos letras seguido por dos subíndices numéricos. Por ejemplo el  $TE_{10}$ ,  $TM_{11}$ , etc. El número de modos posi-

bles se incrementa con la frecuencia para un tamaño dado de guía, y existe un modo, llamado **modo dominante**, que es el único que se puede transmitir a la frecuencia más baja que soporta la guía de onda. En una guía rectangular, la dimensión crítica es la  $X$ . Esta dimensión debe ser mayor que  $0.5 \lambda$  a la frecuencia más baja que va a ser transmitida. En la práctica, generalmente la dimensión  $Y$  es igual a  $0.5 X$  para evitar la posibilidad de que se opere en otro modo que no sea el modo dominante. Se pueden utilizar otras formas además de la rectangular, la más importante es la de tubo circular. Para éste se aplican las mismas consideraciones que para el rectangular. La dimensión de la longitud de onda para las guías rectangulares y circulares se presenta en la siguiente tabla, donde  $X$  es el ancho de la guía rectangular y  $r$  es el radio de la guía circular. Todos los valores se refieren al modo dominante.

Tipo de guía	Rectangular	Circular
Longitud de onda de corte	<b>2X</b>	<b>3,41r</b>
Longitud de onda máxima transmitida con poca atenuación	<b>1,6X</b>	<b>3,2r</b>
Longitud de onda mínima antes de que se transmita el modo siguiente	<b>1,1X</b>	<b>2,8r</b>

La energía puede introducirse o extraerse de una guía de onda por medio de un campo eléctrico o magnético. Generalmente la transferencia de energía se da a través de una línea coaxial. Dos métodos posibles para acoplar una línea coaxial son utilizar el conductor interno de la línea, o a través de una espira. Se puede introducir una sonda, constituida por una pequeña extensión del conductor interno de la línea coaxial, orientada paralelamente a las líneas de campo eléctrico. También se puede colocar un lazo o espira que encierre algunas de las líneas de campo magnético. El punto en el cual obtenemos el acoplamiento máximo depende del modo de propagación en la guía o en la cavidad. El acoplamiento es máximo cuando el dispositivo de acoplamiento está en el campo más intenso.

Si una guía de onda se deja abierta en uno de sus lados, puede radiar energía (es decir, puede ser usada como una antena en lugar de línea de transmisión). Esta radiación puede ser aumentada acampanando la guía de onda para formar una antena de bocina piramidal (*horn*). Más adelante en este capítulo veremos un ejemplo de una antena hecha con una guía de onda para WiFi.

Tipo de Cable	Núcleo	Dieléctrico	Pantalla	Recubrimiento
RG-58	0,9 mm	2,95 mm	3,8 mm	4,95 mm
RG-213	2,26 mm	7,24 mm	8,64 mm	10,29 mm
LMR-400	2,74 mm	7,24 mm	8,13 mm	10,29 mm
3/8" LDF	3,1 mm	8,12 mm	9,7 mm	11 mm

En esta tabla se contrastan los tamaños de varios tipos de líneas de transmisión. Trate de elegir el mejor cable de acuerdo con sus posibilidades, de forma de tener la menor atenuación posible a la frecuencia que vaya a utilizar para su enlace inalámbrico.

## Conectores y adaptadores

Por medio de los conectores el cable puede ser conectado a otro cable o a un componente de la cadena de RF. Hay una gran cantidad de adaptadores y conectores diseñados para concordar con diferentes tamaños y tipos de líneas coaxiales. Describiremos algunos de los más populares.

Los **conectores BNC** fueron desarrollados a fines de los 40. La sigla BNC significa Bayoneta, 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 apareamiento se logra con sólo un cuarto de vuelta de la tuerca de acoplamiento. 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. Son los que se encuentran más comúnmente en los equipamientos de prueba y en los cables coaxiales Ethernet 10base2.

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).

Los conectores **Tipo N** (también por Neill, aunque algunas veces atribuidos a "Navy") fueron desarrollados originalmente durante la Segunda Guerra Mundial. Se pueden utilizar a más de 18 Ghz 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.

**SMA** es un acrónimo de Sub Miniatura versión A, y fue desarrollado en los 60. Los conectores SMA son unidades subminiatura de precisión que proveen excelentes prestaciones eléctricas hasta más de 18 GHz. Estos conectores de alto desempeño son de tamaño compacto y tienen una extraordinaria durabilidad.

Los **SMB** cuyo nombre 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 4 GHz.

Los conectores **MCX** se introdujeron en los 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.

Además de estos conectores estándar, la mayoría de los dispositivos WiFi utilizan una variedad de conectores patentados. A menudo son simplemente conectores de microondas estándar con las partes centrales del conductor invertidas o con roscas a contramano. Estos conectores especiales a menudo se acoplan a los otros elementos del sistema de microondas utilizando un cable delgado y corto llamado latiguillo, en inglés **pigtail (cola de cerdo)** que convierte el conector que no es estándar en uno más robusto y disponible comúnmente. Entre estos conectores especiales tenemos:

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

**U.FL** (también conocido como **MHF**). El U.FL es un conector patentado realizado por Hirose, y el MHF es un conector mecánicamente equivalente. Probablemente es el conector de microondas más pequeño utilizado ampliamente en la actualidad. El U.FL / MHF se utiliza para conectar una tarjeta de radio mini-PCI a una antena o a un conector más grande (como un N o un TNC).

La serie **MMCX**, también denominada MicroMate, es una de las líneas de conectores de RF más pequeñas desarrolladas en los 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 **MC-Card** son más pequeños y más frágiles que los MMCX. Tiene un conector externo con ranuras que se quiebra fácilmente luego de unas pocas interconexiones. Generalmente están en el equipamiento Lucent / Orinoco / Avaya.

Los adaptadores coaxiales (o simplemente *adaptadores*), son conectores cortos usados para unir dos cables o dos componentes que no se pueden conectar directamente. Los adaptadores pueden ser utilizados para interconectar dispositivos o cables de diferentes tipos. Por ejemplo, un adaptador puede ser utilizado para conectar un conector SMA a un BNC. También pueden servir para unir dos conectores del mismo tipo que no pueden hacerlo directamente por su género (macho-macho/hembra-hembra). Por ejemplo un adaptador muy útil es el que permite unir dos conectores machos Tipo N, que tiene dos conectores hembra en ambos extremos.



Figura 4.3: Adaptador N hembra de barrilito

## Elección del conector apropiado

1. “Una cuestión de género.” Casi todos los conectores tienen un género bien definido que consiste en una clavija (el extremo “macho”) o una toma (el extremo “hembra”). Generalmente los cables tienen conectores macho en ambos extremos y los dispositivos de RF (por ej. transmisores y antenas) tienen conectores hembra. Los acopladores direccionales y dispositivos de medición de línea pueden tener tanto conectores macho como hembra. Asegúrese de que cada conector macho en su sistema coincide con uno hembra.
2. “¡Menos es mejor!” Intente minimizar el número de conectores y adaptadores en la cadena de RF. Cada conector introduce alguna pérdida adicional (¡hasta unos pocos dB por cada conexión, dependiendo del conector!).
3. “¡Compre, no lo haga usted mismo!” Como mencionamos anteriormente, siempre que pueda es mejor que compre cables que ya estén terminados con los conectores que usted necesite. Soldar los conectores no es una tarea sencilla, y en el caso de conectores pequeños como los U.FL y MMCX hacerlo bien es casi imposible. Hasta la conectorización de cables de foam (espuma) es ardua.
4. No use BNC para frecuencias de 2,4GHz o más altas. Utilice los conectores tipo N (o SMA, SMB, TNC, etc.).
5. Los conectores de microondas son componentes de precisión y se pueden dañar fácilmente si se manipulan mal. Como regla general, debe



rotar la manga exterior para apretar el conector, dejando el resto del conector (y el cable) estacionario. Si se tuercen otras partes del conector mientras estamos ajustándolo o aflojándolo es muy posible que las mismas se rompan.

6. Nunca pise, ni deje caer los conectores en el piso cuando desconecte los cables (esto sucede más a menudo de lo que usted se imagina, especialmente cuando trabajamos en un mástil sobre un techo).
7. Nunca utilice herramientas como las pinzas para apretar los conectores. Hágalo siempre con las manos. Cuando trabaje en exteriores recuerde que los metales se expanden a altas temperaturas y reducen su tamaño a baja temperatura: un conector muy apretado puede dilatarse en el verano o quebrarse en el invierno.

## Antenas y diagramas (patrones) de radiación

Las antenas son un componente muy importante de los sistemas de comunicación. Por definición, una antena es un dispositivo utilizado para transformar una señal de RF que viaja en un conductor, en una onda electromagnética en el espacio abierto. Las antenas exhiben una propiedad conocida como **reciprocidad**, lo cual significa que una antena va a mantener las mismas características sin importar si está transmitiendo o recibiendo. La mayoría de las antenas son dispositivos resonantes, que operan eficientemente sólo en una banda de frecuencia relativamente baja. Una antena debe ser sintonizada en la misma banda que el sistema de radio al que está conectada, para no afectar la recepción y transmisión. Cuando se alimenta la antena con una señal, emitirá radiación distribuida en el espacio de cierta forma. La representación gráfica de la distribución relativa de la potencia radiada en el espacio se llama **diagrama o patrón de radiación**.

## Glosario de términos de las antenas

Antes de hablar de antenas específicas, hay algunos términos que deben ser definidos y explicados:

### Impedancia de entrada

Para una transferencia de energía eficiente, la **impedancia** del radio, la antena, y el cable de transmisión que las conecta debe ser la misma. Las antenas y sus líneas de transmisión generalmente están diseñadas para una impedancia de  $50\Omega$ . Si la antena tiene una impedancia diferente a  $50\Omega$ , hay una desadaptación, y se necesita un circuito de acoplamiento de impedancia. Cuando alguno de estos componentes no tiene la misma impedancia, la eficiencia de transmisión se ve afectada.

## Pérdida de retorno

La **pérdida de retorno** es otra forma de expresar la desadaptación. Es una medida logarítmica expresada en dB, que compara la potencia reflejada por la antena con la potencia con la cual la alimentamos desde la línea de transmisión. La relación entre SWR (Standing Wave Ratio –Razón de Onda Estacionaria–) y la pérdida de retorno es la siguiente:

$$\text{Pérdida de Retorno (en dB)} = 20 \log_{10} \frac{\text{SWR}}{\text{SWR}-1}$$

Aunque siempre existe cierta cantidad de energía que va a ser reflejada hacia el sistema, una pérdida de retorno elevada implica un funcionamiento inaceptable de la antena.

## Ancho de banda

El **ancho de banda** de una antena se refiere al rango de frecuencias en el cual puede operar de forma correcta. Este ancho de banda es el número de hercios (Hz) para los cuales la antena va a tener una Razón de Onda Estacionaria (SWR) menor que 2:1.

El ancho de banda también puede ser descrito en términos de porcentaje de la frecuencia central de la banda.

$$\text{Ancho de Banda} = 100 \times \frac{F_H - F_L}{F_C}$$

...donde  $F_H$  es la frecuencia más alta en la banda,  $F_L$  es la frecuencia más baja, y  $F_C$  es la frecuencia central.

De esta forma, el ancho de banda porcentual es constante respecto a la frecuencia. Si fuera expresado en unidades absolutas, variaría dependiendo de la frecuencia central. Los diferentes tipos de antenas tienen variadas limitaciones de ancho de banda.

## Directividad y Ganancia

La **Directividad** es la habilidad de una antena de transmitir enfocando la energía en una dirección particular, o de recibirla de una dirección particular. Si un enlace inalámbrico utiliza locaciones fijas para ambos extremos, es posible utilizar la directividad de la antena para concentrar la transmisión de la radiación en la dirección deseada. En una aplicación móvil donde la an-

tena no está fijada a un punto, es imposible predecir dónde va a estar, y por lo tanto la antena debería radiar en todas las direcciones del plano horizontal. En estas aplicaciones se utiliza una antena omnidireccional.

La ganancia no es una cantidad que pueda ser definida en términos de una cantidad física como vatios u ohmios, es un cociente sin dimensión. La ganancia se expresa en referencia a una antena estándar. Las dos referencias más comunes son la antena *isotrópica* y la *antena dipolo resonante de media longitud de onda*. La antena isotrópica irradia en todas direcciones con la misma intensidad. En la realidad esta antena no existe, pero provee un patrón teórico útil y sencillo con el que comparar las antenas reales. Cualquier antena real va a irradiar más energía en algunas direcciones que en otras. Puesto que las antenas no crean energía, la potencia total irradiada es la misma que una antena isotrópica. Toda energía adicional radiada en las direcciones favorecidas es compensada por menos energía radiada en las otras direcciones.

La ganancia de una antena en una dirección dada es la cantidad de energía radiada en esa dirección comparada con la energía que podría radiar una antena isotrópica en la misma dirección alimentada con la misma potencia. Generalmente estamos interesados en la ganancia máxima, que es aquella en la dirección hacia la cual la antena está radiando la mayor potencia. Una ganancia de antena de 3dB comparada con una isotrópica debería ser escrita como **3dBi**. El dipolo resonante de media longitud de onda puede ser un estándar útil a la hora de compararlo con otras antenas a una frecuencia, o sobre una banda estrecha de frecuencias. Para comparar el dipolo con una antena sobre un rango de frecuencias se requiere de un número de dipolos de diferentes longitudes. La ganancia de una antena comparada con un dipolo debería ser escrita como **3dBd**.

El método para medir la ganancia mediante la comparación de la antena bajo prueba con una antena estándar conocida, de ganancia calibrada, es conocido como técnica de *transferencia de ganancia*. Otro método para medir la ganancia es el de las tres antenas, donde la potencia transmitida y recibida en las terminales de las antenas es medida entre tres antenas elegidas arbitrariamente a una distancia fija conocida.

## Diagramas o Patrones de Radiación

Los *patrones o diagramas de radiación* describen la intensidad relativa del campo radiado en varias direcciones desde la antena a una distancia constante. El patrón de radiación es también de recepción, porque describe las propiedades de recepción de la antena. El patrón de radiación es tridimensional, pero generalmente las mediciones de los mismos son una porción bi-dimensional del patrón, en el plano horizontal o vertical. Estas mediciones son presentadas en coordenadas *rectangulares* o en coordenadas

**polares.** La siguiente figura muestra el diagrama de radiación en coordenadas rectangulares de una antena Yagi de diez elementos. El detalle es bueno pero se hace difícil visualizar el comportamiento de la antena en diferentes direcciones.

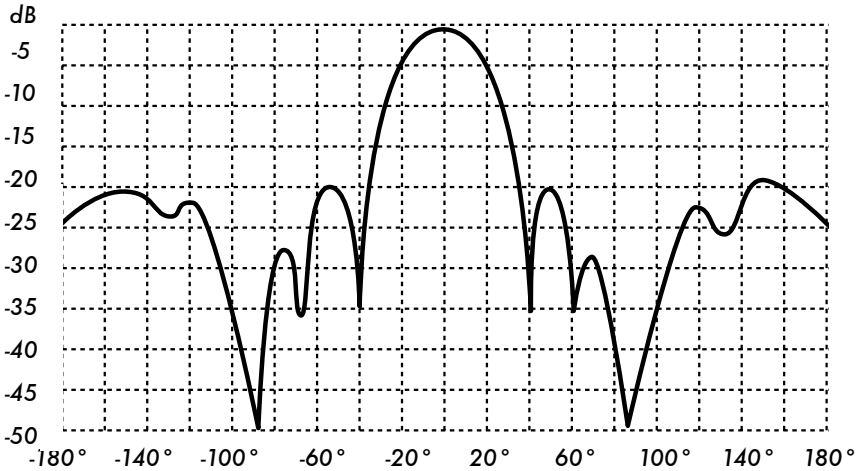


Figura 4.4: Diagrama de radiación de una antena Yagi en coordenadas rectangulares

En los sistemas de coordenadas polares, los puntos se obtienen por una proyección a lo largo de un eje que rota (radio) en la intersección con uno de varios círculos concéntricos. El siguiente es un diagrama de radiación en coordenadas polares de la misma antena Yagi de diez elementos.

Los sistemas de coordenadas polares pueden dividirse en dos clases: **lineales** y **logarítmicos**. En el sistema de coordenadas polares lineal, los círculos concéntricos están uniformemente espaciados y graduados. La retícula resultante puede ser utilizada para preparar un diagrama lineal de la potencia contenida en la señal. Para facilitar la comparación, los círculos concéntricos equiespaciados pueden reemplazarse por círculos ubicados adecuadamente, representando la respuesta en decibeles, con 0 dB correspondiendo al círculo más externo. En este tipo de gráficas los lóbulos menores se suprimen. Los lóbulos con picos menores de 15 dB debajo del lóbulo principal desaparecen por su pequeño tamaño. Esta retícula mejora la presentación de las características de antenas con alta directividad y lóbulos menores pequeños. En un sistema de coordenadas lineales, se puede trazar el voltaje de la señal en lugar de la potencia, En este caso también, se enfatiza la directividad y desenfatan los lóbulos menores, pero no en el mismo grado que en la retícula lineal de potencia.

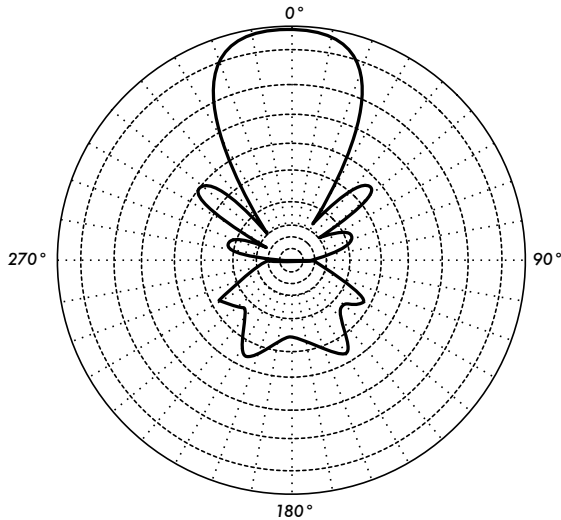


Figura 4.5: Diagrama polar lineal de la misma antena Yagi.

En el sistema de coordenadas polares logarítmico, las líneas concéntricas de la retícula son espaciadas periódicamente de acuerdo con el logaritmo de voltaje de la señal. Se pueden usar diferentes valores para la constante logarítmica de periodicidad, y esta elección va a tener un efecto en la apariencia de los diagramas trazados. Generalmente se utiliza la referencia 0 dB para el extremo externo de la gráfica. Con este tipo de retícula, los lóbulos que están 30 o 40 dB por debajo del lóbulo principal aún pueden distinguirse. El espacio entre los puntos a 0 dB y a -3 dB es mayor que el espacio entre -20 dB y -23 dB, el cual es mayor que el espacio entre -50 dB y -53 dB. Por lo tanto el espacio corresponde a la significancia relativa de dichos cambios en el desempeño de la antena.

Una escala logarítmica modificada enfatiza la forma del haz mayor mientras comprime los lóbulos laterales de muy bajo nivel (<30 dB) hacia el centro del patrón.

Hay dos tipos de diagramas de radiación: los **absolutos** y los **relativos**. Los diagramas de radiación absolutos se presentan en unidades absolutas de potencia o intensidad de campo. Los diagramas de radiación relativos se referencian a unidades relativas de potencia o intensidad de campo. La mayoría de las mediciones de los diagramas de radiación son relativas a la antena isotrópica, y el método de transferencia de ganancia es utilizado para establecer la ganancia absoluta de la antena.

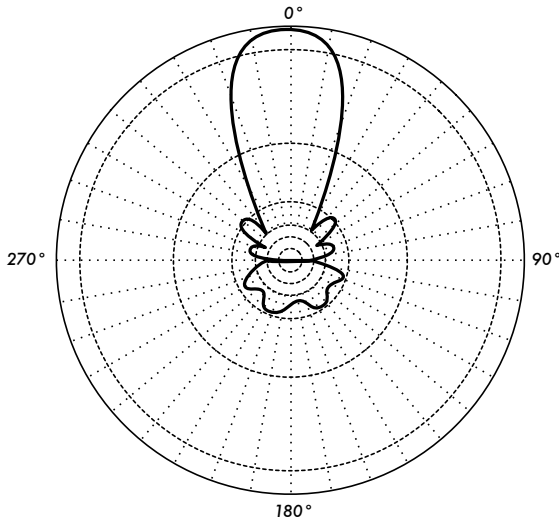


Figura 4.6: Trazado polar logarítmico

El patrón de radiación en la región cercana a la antena no es el mismo que el patrón a largas distancias. El término *campo cercano* se refiere al patrón del campo que existe cerca de la antena, mientras que el término *campo lejano* refiere a los diagramas del campo a largas distancias. El campo alejado también es denominado campo de radiación, y generalmente es el que más interesa. Normalmente el punto de interés es la potencia radiada, y por lo tanto los diagramas de la antena son medidos en la región del campo alejado. Para las medidas necesarias para confeccionar los diagramas es importante elegir una distancia suficientemente grande para estar en el campo lejano, más allá del campo cercano. La distancia mínima depende de las dimensiones de la antena con relación a la longitud de onda. La fórmula aceptada para esta distancia es:

$$r_{\min} = \frac{2d^2}{\lambda}$$

...donde  $r_{\min}$  es la distancia mínima desde la antena,  $d$  es la dimensión más grande de la antena, y  $\lambda$  es la longitud de onda.

## Ancho del haz

El **ancho del haz** de una antena usualmente se entiende como ancho del haz a mitad de potencia. Se encuentra el pico de intensidad de radiación, luego se localizan los puntos de ambos lados de pico que representan la mitad de la potencia de intensidad del pico. La distancia angular entre los puntos de la mitad de la potencia se define como el ancho del haz. La mitad

de la potencia expresada en decibeles es de -3dB, por lo tanto algunas veces el ancho del haz a mitad de potencia es referido como el ancho del haz a 3dB. Generalmente se consideran tanto el ancho de haz vertical como horizontal.

Suponiendo que la mayor parte de la potencia radiada no se dispersa en lóbulos laterales, entonces la ganancia directiva es inversamente proporcional al ancho del haz: cuando el ancho del haz decrece, la ganancia directiva se incrementa.

## Lóbulos laterales

Ninguna antena es capaz de radiar toda la energía en una dirección preferida. Inevitablemente, una parte de ella es radiada en otras direcciones. Esos picos más pequeños son denominados **lóbulos laterales**, especificados comúnmente en dB por debajo del lóbulo principal.

## Nulos

En los diagramas de radiación de una antena, una zona **nula** es aquella en la cual la potencia efectivamente radiada está en un mínimo. Un nulo a menudo tiene un ángulo de directividad estrecho en comparación al haz principal. Los nulos son útiles para varios propósitos tales como la supresión de señales interferentes en una dirección dada.

## Polarización

La **polarización** se define como la orientación del campo eléctrico de una onda electromagnética. En general la polarización se describe por una elipse. Dos casos especiales de la polarización elíptica son la **polarización lineal** y la **polarización circular**. La polarización inicial de una onda de radio es determinada por la antena.

Con la polarización lineal, el vector del campo eléctrico se mantiene en el mismo plano todo el tiempo. El campo eléctrico puede dejar la antena en una orientación vertical, horizontal, o en algún ángulo entre los dos. La radiación **polarizada verticalmente** se ve ligeramente menos afectada por las reflexiones en el camino de transmisión. Las antenas omnidireccionales siempre tienen una polarización vertical. Con la **polarización horizontal**, tales reflexiones causan variaciones en la intensidad de la señal recibida. Las antenas horizontales tienen menos probabilidad de captar interferencias generadas por el hombre, normalmente polarizadas verticalmente.

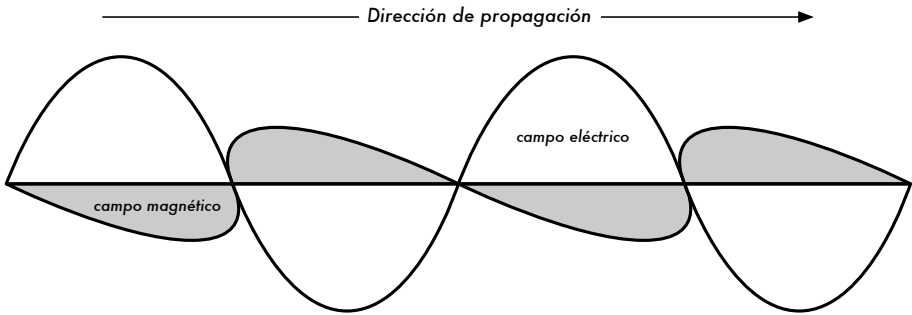


Figura 4.7: La onda senoidal eléctrica se mueve perpendicular a la onda magnética en la dirección de la propagación.

En la polarización circular el vector del campo eléctrico aparece rotando con un movimiento circular en la dirección de la propagación, haciendo una vuelta completa para cada ciclo de RF. Esta rotación puede ser hacia la derecha o hacia la izquierda. La elección de la polarización es una de las elecciones de diseño disponibles para el diseñador del sistema de RF.

### Desadaptación de polarización

Para transferir la máxima potencia entre una antena transmisora y una receptora, ambas antenas deben tener la misma orientación espacial, el mismo sentido de polarización y el mismo coeficiente axial.

Cuando las antenas no están alineadas o no tienen la misma polarización, habrá una reducción en la transferencia de potencia entre ambas antenas. Esto va a reducir la eficiencia global y las prestaciones del sistema.

Cuando las antenas transmisora y receptora están polarizadas linealmente, una desalineación física entre ellas va a resultar en una pérdida por desadaptación de polarización, que puede ser determinada utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdida (dB)} = 20 \log_{10} (\cos \theta)$$

...donde  $\theta$  es la diferencia en el ángulo de alineación entre las dos antenas. Para  $15^\circ$  la pérdida es de aproximadamente 0.3dB, para  $30^\circ$  perdemos 1.25dB, para  $45^\circ$  perdemos 3dB y para  $90^\circ$  tenemos una pérdida infinita.

Resumiendo, cuanto más grande la desadaptación de polarización entre una antena transmisora y una receptora, más grande la pérdida aparente. En el mundo real, la pérdida debida a una desadaptación en polarización de  $90^\circ$  es bastante grande pero no infinita. Algunas antenas como las Yagis, o las antenas de lata, pueden rotarse  $90^\circ$  de forma sencilla para corresponder con la polarización del otro extremo del enlace. La polarización puede a-



provecharse en un enlace punto a punto. Use una herramienta de monitoreo para observar la interferencia desde redes adyacentes, y rote una antena hasta que se minimice la señal recibida. Luego instale su enlace utilizando la polarización en la que había medido interferencia mínima en ambos extremos. Esta técnica puede ser utilizada a veces para construir enlaces estables, aún en medio ambientes con mucho ruido RF.

## Relación de ganancia adelante/atrás

A menudo es útil comparar la **Relación de ganancia adelante/atrás** de las antenas direccionales. Este es el cociente de la directividad máxima de una antena con relación a su directividad en la dirección opuesta. Por ejemplo, cuando se traza el patrón de radiación en una escala relativa en dB, la relación de ganancia adelante/atrás es la diferencia en dB entre el nivel de radiación máxima en la dirección delantera y el nivel de radiación a 180 grados.

Este número no tiene sentido para un antena omnidireccional, pero brinda una idea de la cantidad de potencia dirigida hacia adelante en una antena muy direccional.

## Tipos de Antenas

Una clasificación de las antenas puede basarse en:

- **Frecuencia y tamaño.** Las antenas utilizadas para HF son diferentes de las antenas utilizadas para VHF, las cuales son diferentes de las antenas para microondas. La longitud de onda es diferente a diferentes frecuencias, por lo tanto las antenas deben ser diferentes en tamaño para radiar señales a la correcta longitud de onda. En este caso estamos particularmente interesados en las antenas que trabajan en el rango de microondas, especialmente en las frecuencias de los 2,4 GHz y 5 GHz. A los 2400 MHz la longitud de onda es 12,5cm, mientras que a los 5000 MHz es de 6cm.
- **Directividad.** Las antenas pueden ser omnidireccionales, sectoriales o directivas. Las **antenas omnidireccionales** irradian aproximadamente con la misma intensidad en todas las direcciones del plano horizontal, es decir en los 360°. Los tipos más populares de antenas omnidireccionales son los dipolos y las de plano de tierra. Las **antenas sectoriales** irradian principalmente en un área específica. El haz puede ser tan amplio como 180 grados, o tan angosto como 60 grados. Las **direccionales** o **directivas** son antenas en las cuales el ancho del haz es mucho más angosto que en las antenas sectoriales. Tienen la ganancia más alta y por lo tanto se utilizan para enlaces a larga distancia. Tipos de antenas directivas son las Yagi, las biquad, las de bocina, las helicoidales, las antenas patch, los platos parabólicos, y muchas otras.

- **Construcción física.** Las antenas pueden construirse de muchas formas diferentes, desde simples mallas, platos parabólicos, o latas de café.

Cuando consideramos antenas adecuadas para el uso en WLAN de 2,4GHz, se pueden utilizar otras clasificaciones:

- **Aplicaciones.** Los puntos de acceso tienden a hacer redes punto a multipunto, mientras que los enlaces remotos son punto a punto. Esto implica diferentes tipos de antenas para el propósito. Los nodos utilizados para accesos multipunto pueden utilizar tanto antenas omni, las cuales irradian igualmente en todas direcciones, como antenas sectoriales que se enfocan en un área limitada. En el caso de los enlaces punto a punto, las antenas se usan para conectar dos lugares. Las antenas directivas son la elección principal para esta aplicación.

Ahora le presentamos una breve lista de tipos comunes de antenas para la frecuencia de 2,4GHz, con una corta descripción de la información básica acerca de sus características.

### Antena de 1/4 de longitud con plano de tierra

Esta antena es muy simple en su construcción y es útil para las comunicaciones cuando el tamaño, el costo y la facilidad de construcción son importantes. Esta antena se diseñó para transmitir una señal polarizada verticalmente. Consiste en un elemento de 1/4 de longitud onda como medio dipolo, y tres o cuatro elementos de un 1/4 de longitud de onda inclinados de 30 a 45 grados hacia abajo.

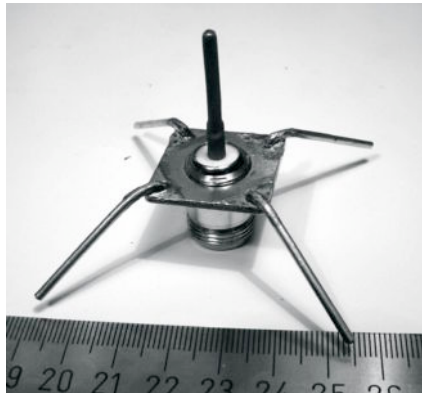


Figura 4.8: Antena de un cuarto de longitud de onda con plano de tierra.

Este conjunto de elementos, denominados radiales, constituyen el plano de tierra. Esta es una antena simple y efectiva que puede capturar una señal con igual facilidad en todas las direcciones. Para incrementar la ganancia, la señal puede hacerse más achatada para concentrar la radiación en el plano

horizontal. El ancho del haz vertical representa el grado de achatamiento en el foco. Esto es útil en una situación de punto a multipunto, si todas las otras antenas se encuentran a la misma altura. La ganancia de esta antena está en el orden de 2 a 4 dBi.

## Antena Yagi

La antena Yagi básica consiste en un cierto número de elementos rectos que miden cada uno aproximadamente la mitad de la longitud de onda. El elemento excitado o activo de una Yagi es el equivalente a una antena dipolo de media onda con alimentación central. En paralelo al elemento activo, y a una distancia que va de 0,2 a 0,5 longitudes de onda en cada lado, hay varillas rectas o alambres llamados reflectores y directores, o simplemente elementos pasivos. Un reflector se ubica detrás del elemento activo y es ligeramente más largo que media longitud de onda; un director se coloca en frente del elemento activo y es ligeramente más corto que media longitud de onda. Una Yagi típica tiene un reflector y uno o más directores. La antena propaga la energía del campo electromagnético en la dirección que va desde el elemento activo hacia los directores, y es más sensible a la energía electromagnética entrante en esta misma dirección. Cuantos más directores tiene una Yagi, mayor la ganancia. Cuantos más directores se agreguen a una Yagi, la misma va a ser más larga. La siguiente es una foto de una antena Yagi con 6 directores y 1 reflector.

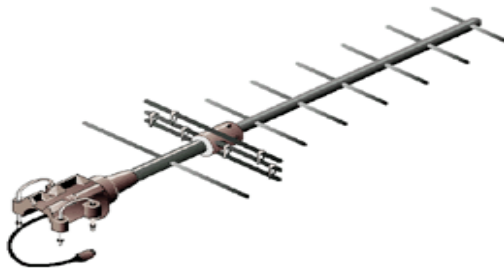


Figura 4.9: Una antena Yagi.

Las antenas Yagi son utilizadas principalmente por los enlaces Punto a Punto; tienen una ganancia desde 10 a 20 dBi y un ancho de haz horizontal de 10 a 20 grados.

## Bocina

El nombre de la antena bocina deriva de su apariencia característica acampanada o de cuerno. La porción acampanada puede ser cuadrada, rectangular, cilíndrica o cónica. La dirección de máxima radiación se corresponde con el eje de la campana. Se puede alimentar sencillamente con una guía de onda, pero también puede hacerse con un cable coaxial y la transición ap-

ropiada. Las antenas bocina se utilizan comúnmente como el elemento activo en una antena de plato. La antena bocina se coloca hacia el centro del plato reflector. El uso de una bocina, en lugar de una antena dipolo o cualquier otro tipo de antena en el punto focal del plato, minimiza la pérdida de energía alrededor de los bordes del plato reflector. A 2,4GHz, una antena bocina simple hecha con una lata tiene una ganancia del orden de 10 a 15 dBi.



*Figura 4.10: Antena bocina hecha con una lata de comida.*

## Plato Parabólico

Las antenas basadas en reflectores parabólicos son el tipo más común de antenas directivas cuando se requiere una gran ganancia. La ventaja principal es que pueden construirse para tener una ganancia y una directividad tan grande como sea requerido. La desventaja principal es que los platos grandes son difíciles de montar y están predispuestos a sufrir los efectos del viento.

Los platos de más de un metro generalmente están hechos de material sólido. Frecuentemente se utiliza el aluminio por una ventaja de peso, su durabilidad y sus buenas características eléctricas. El efecto del viento se incrementa rápidamente con el tamaño del plato y se convierte en un problema severo. A menudo se utilizan platos que tienen una superficie reflectora constituida por una malla abierta. Éstos tienen una relación de ganancia adelante/atrás más pobre pero son seguros de utilizar y sencillos de construir. Materiales como el cobre, aluminio, bronce (latón), acero galvanizado y hierro son apropiados para una malla.



Figura 4.11: Una antena plato sólida.

## BiQuad

La antena BiQuad es fácil de armar y ofrece buena directividad y ganancia para las comunicaciones punto a punto. Consiste en dos cuadrados iguales de  $1/4$  de longitud de onda como elemento de radiación y un plato metálico o malla como reflector. Esta antena tiene un ancho del haz de aproximadamente 70 grados y una ganancia en el orden de 10-12 dBi. Puede ser utilizada como una antena única o como un alimentador para un Plato Parabólico. Para encontrar la polarización, debemos observar el frente de la antena, con los cuadrados colocados lado a lado; en esa posición la polarización es vertical.



Figura 4.12: Antena BiQuad.

## Otras Antenas

Existen muchos otros tipos de antenas y se crean nuevas siguiendo los avances tecnológicos.

- Antenas de Sector o Sectoriales: son muy usadas en la infraestructura de telefonía celular y en general se construyen agregando una cara reflectora a uno o más dipolos alimentados en fase. Su ancho de haz horizontal puede ser tan amplio como 180 grados, o tan angosto como 60 grados, mientras que el vertical generalmente es mucho más angosto. Las antenas compuestas pueden armarse con varios sectores para cubrir un rango horizontal más ancho (antena multisectorial).
- Antenas Panel o Patch: son paneles planos sólidos utilizados para cobertura interior, con una ganancia de hasta 20 dB.

## Teoría de los Reflectores

La propiedad básica de un reflector parabólico perfecto es que convierte una onda esférica irradiada desde un punto fuente ubicado en el foco, en una onda plana. Recíprocamente, toda la energía recibida en el plato desde una fuente distante se refleja en un punto único en el foco del plato. La posición del foco, o distancia focal, está dada por:

$$f = \frac{D^2}{16 \times c}$$

...donde **D** es el diámetro del plato y **c** es la profundidad de la parábola en su centro.

El tamaño del plato es el factor más importante ya que determina la ganancia máxima que puede lograrse a una frecuencia dada y el ancho de haz resultante. La ganancia y el ancho de haz obtenidos son dados por:

$$\text{Ganancia} = \frac{(\pi \times D)^2}{\lambda^2} \times n$$

$$\text{Ancho del haz} = \frac{70 \lambda}{D}$$

...donde **D** es el diámetro del plato y **n** es la eficiencia. La eficiencia es determinada principalmente por la efectividad de la iluminación del plato por el alimentador, pero también por otros factores. Cada vez que el diámetro del plato se duplica, la ganancia se cuadruplica o incrementa en seis dB. Si ambas estaciones duplican el tamaño de sus platos, la intensidad de la señal

puede incrementarse en 12 dB, un aumento muy sustancial. Se puede estimar una eficiencia del 50% en una antena hecha a mano.

El coeficiente  $f / D$  (longitud focal/diámetro del plato) es el factor fundamental que define el diseño del alimentador para un plato. El coeficiente está directamente relacionado con el ancho del haz del alimentador necesario para iluminar el plato de forma efectiva. Dos platos del mismo diámetro pero con diferentes longitudes focales requieren diferentes diseños del alimentador si ambos van a ser iluminados eficientemente. El valor de 0,25 corresponde al plato común de plano focal en el cual el foco está en el mismo plano que el aro del plato.

## Amplificadores

Como mencionamos anteriormente las antenas no crean potencia. Ellas simplemente dirigen toda la potencia disponible en un patrón particular. Por medio de la utilización de un **amplificador de potencia**, usted puede usar energía DC para aumentar su señal disponible. Un amplificador se conecta entre el transmisor de radio y la antena, y tiene un cable adicional que se conecta a una fuente de energía. Existen amplificadores para trabajar a 2,4GHz, que agregan varios vatios de potencia a su transmisión. Estos dispositivos detectan cuando el radio está transmitiendo, y empiezan a amplificar la señal. Cuando la transmisión termina se apagan otra vez. En recepción también agregan amplificación a la señal antes de enviarla al radio.

Desafortunadamente, el simple hecho de agregar amplificadores no va a resolver mágicamente todos los problemas de nuestra red. No discutimos acerca de los amplificadores de potencia en profundidad en este libro, porque hay varios inconvenientes en el uso de los mismos:

- **Son caros.** Los amplificadores deben trabajar a relativamente grandes anchos de banda a 2400MHz, y deben tener una conmutación lo suficientemente rápida para trabajar con aplicaciones Wi-Fi. Estos amplificadores existen pero tienden a costar varios cientos de dólares por unidad.
- **Va a necesitar por lo menos dos.** Mientras que las antenas proveen una ganancia recíproca que beneficia a ambos lados de la conexión, los amplificadores trabajan mejor amplificando una señal transmitida. Si se agrega sólo un amplificador en un extremo del enlace con una ganancia de antena insuficiente, ésta probablemente va a ser escuchada, pero usted no va a ser capaz de escuchar el otro extremo.
- **No proveen direccionalidad adicional.** Agregar ganancia a una antena provee beneficios de ganancia y direccionalidad a ambos extremos del enlace. No solo mejoran la cantidad disponible de señal sino que tienden a rechazar ruido desde otras direcciones. Los amplificadores amplían cie-

gamente tanto las señales deseadas como las interferencias, y pueden hacer que los problemas de interferencia sean peores.

- **Los amplificadores generan ruido para otros usuarios de la banda.** Debido al incremento de su potencia de salida, usted está creando una alta fuente de ruido para otros usuarios en la banda sin licenciamiento. Esto puede no ser un gran tema en áreas rurales, pero puede causar grandes problemas en áreas pobladas. Por el contrario, agregar ganancia de antena va a mejorar su enlace y puede bajar el nivel de ruido para sus vecinos.
- **Utilizar amplificadores puede ser ilegal. Cada país impone límites de potencia para el espectro sin licenciamiento.** Agregar una antena a una señal altamente amplificada, probablemente provoque que se excedan los límites legales.

La utilización de amplificadores a menudo se compara con el vecino desconsiderado que quiere escuchar la radio desde afuera de su casa y por eso sube el volumen al máximo. Hasta llega a “mejorar” la recepción poniendo sus parlantes fuera de la ventana. Si bien ahora es capaz de escuchar la radio, la escuchan también todos los del edificio. Este método sirve cuando existe un solo usuario, ¿pero qué sucede cuando todos los vecinos deciden hacer lo mismo con sus radios? Utilizar amplificadores para un enlace inalámbrico causa aproximadamente el mismo efecto a 2400MHz. Su enlace puede “funcionar mejor” por el momento, pero va a tener problemas cuando otros usuarios de la banda también decidan utilizar amplificadores.

Si utiliza antenas de gran ganancia en lugar de amplificadores, se evita todos estos problemas. El costo de las antenas es mucho menor que el de los amplificadores, y puede mejorar un enlace simplemente cambiando la antena en uno de los extremos. Tener radios más sensibles y cables de buena calidad también ayuda de forma significativa en enlaces a larga distancia. Estas técnicas no causan problemas a otros usuarios de la banda, y por lo tanto las recomendamos mucho más que agregar amplificadores.

## *Diseños prácticos de antenas*

El costo de antenas de 2400MHz ha bajado drásticamente desde la introducción del estándar 802.11b. Los diseños innovadores utilizan partes simples y pocos materiales para conseguir imponentes ganancias con pocos pasos de fabricación. Desafortunadamente, la disponibilidad de buenas antenas aún es limitada en muchas zonas del mundo, e importarlas puede ser muy caro. Si bien diseñar una antena puede ser un proceso complejo y propenso a errores, construir antenas con componentes disponibles localmente es muy sencillo, y puede ser muy divertido. Presentamos cuatro prácticos diseños de antena que pueden armarse con muy poco dinero.



## USB *dongle* como iluminador de un plato

Posiblemente el diseño de antena más simple es el uso de una parábola para dirigir la salida de un dispositivo inalámbrico USB (conocido en el ámbito de las redes como **USB *dongle***). Poniendo la antena dipolo interna presente en el dispositivo inalámbrico USB en el foco del plato parabólico, se puede obtener una ganancia significativa sin la necesidad de soldar o abrir el dispositivo inalámbrico en sí mismo. Muchos tipos de platos parabólicos pueden funcionar, incluyendo platos satelitales, antenas de televisión, y hasta implementos metálicos de la cocina (como un wok, una tapa redonda o un tamiz). Como un extra, se utilizan cables USB –baratos, libres de pérdidas de RF–, eliminando la necesidad de adquirir los cables coaxiales o heliax que son mucho más caros.

Para construir una parabólica con USB *dongle*, va a necesitar encontrar la orientación y la ubicación del dipolo dentro del *dongle*. La mayoría de los dispositivos orientan al dipolo para que el mismo esté paralelo con el borde corto del *dongle*, pero algunos montan el dipolo perpendicular al borde. Puede abrir el *dongle* y verificarlo por usted mismo, o simplemente probar el *dongle* en ambas posiciones y ver cuál provee más ganancia.

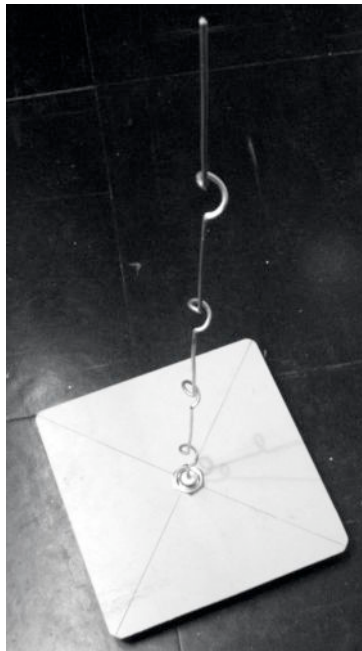
Para probar la antena, diríjala a un punto de acceso alejado varios metros, y conecte el *dongle* USB a una computadora portátil. Use el driver original del *dongle* o una herramienta como Netstumbler (vea el capítulo seis), y observe la intensidad de la señal recibida del punto de acceso. Ahora, mueva lentamente el *dongle* en relación con la parabólica y vaya mirando el medidor de intensidad de señal. Debe ver un aumento significativo en la ganancia (de 20 dB o más) cuando encuentre la posición adecuada. El dipolo generalmente se ubica de 3 a 5 centímetros de la base del disco, pero esto va a depender de la forma de la parábola. Busque varias posiciones mientras mira su medidor de intensidad de señal hasta que encuentre la posición óptima.

Una vez que encontró la mejor ubicación, fije el *dongle* en su lugar de forma segura. Va a tener que impermeabilizar el *dongle* y el cable si la antena se utiliza en exteriores. Use un compuesto de silicona o un segmento de tubo de PVC para proteger del clima los elementos electrónicos. Muchos diseños e ideas de parabólicas con alimentadores USB están documentados en línea en <http://www.usbwifi.orcon.net.nz/>.

## Omni colineal

Esta antena es muy sencilla de armar; se requiere de un pedazo de alambre, un conector tipo N y una placa metálica cuadrada. Puede usarse para una cobertura punto a multipunto de corta distancia, en interiores o exteriores. La placa tiene un agujero perforado en el medio para colocar el chasis del

conector tipo N el cual se atornilla en el lugar. El alambre se suelda en la clavija del conector N y tiene espiras para desfasar los elementos activos. Se pueden hacer dos versiones de la antena: una con dos elementos activos y dos espiras, y otra con cuatro elementos activos y cuatro espiras. Para la antena más corta, la ganancia ronda los 5dBi, mientras que la más larga, con cuatro elementos, va a tener de 7 a 9 dBi de ganancia. Solo vamos a describir cómo construir la antena larga.



*Figura 4.13: La antena omni colinear completa*

### Lista de componentes

- Un conector tipo N hembra de rosca
- 50 cm de alambre de bronce o de cobre de 2 mm de diámetro
- Una placa metálica cuadrada de 10x10 cm o más grande



Figura 4.14: Placa de aluminio de 10 cm x 10 cm.

### Herramientas requeridas

- Regla
- Pinzas
- Lima
- Estaño y soldador
- Taladro con un juego de mechas para metal (incluyendo una mecha de 1,5 cm. de diámetro)
- Un pedazo de tubo, o una mecha con un diámetro de 1 cm.
- Prensa o abrazadera
- Martillo
- Llave inglesa

### Construcción

1. Enderece el alambre utilizando la prensa.



*Figura 4.15: Deje el alambre tan recto como le sea posible.*

2. Con un marcador, dibuje una línea a 2,5 cm comenzando desde uno de los extremos del alambre. En esa línea doble el alambre a 90 grados con la ayuda de la prensa y el martillo.



*Figura 4.16: Golpee con delicadeza el alambre para hacer una curva cerrada.*

3. Dibuje otra línea a una distancia de 3,6 cm desde la curva anterior. Utilice la prensa y el martillo, doble otra vez el alambre en esta segunda línea a 90 grados, en la dirección opuesta a la primera curva pero en el mismo plano. El alambre debe verse como una "Z".

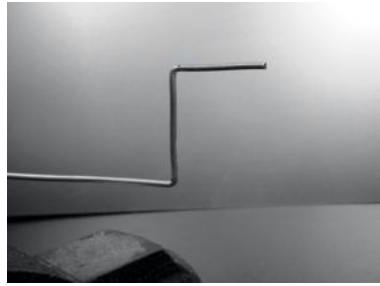
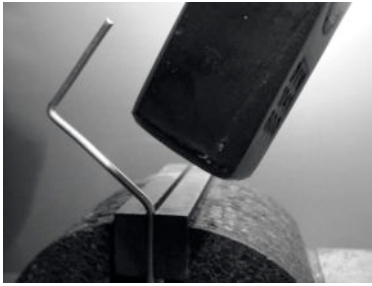


Figura 4.17: Doblar el alambre en forma de "Z".

4. Vamos a retorcer la porción "Z" del alambre para hacer un anillo de 1 cm de diámetro. Para esto, vamos a utilizar el tubo o la mecha y curvamos el alambre a su alrededor, con la ayuda de la prensa y de las pinzas.



Figura 4.18: Curvar el alambre alrededor de un tubo para hacer un anillo.

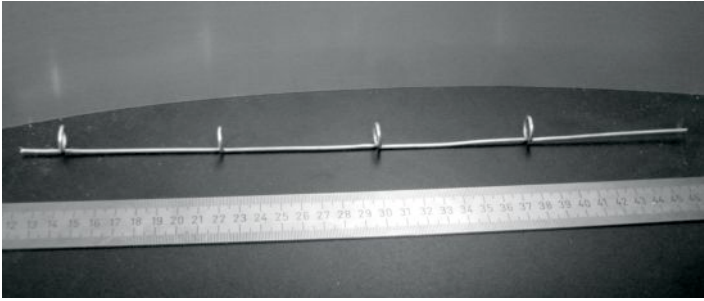
El anillo va a verse así:



Figura 4.19: El anillo completo.

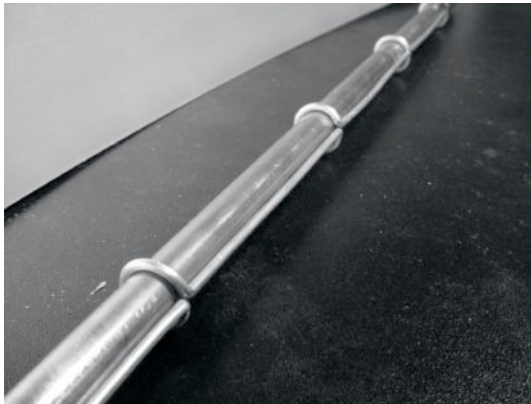
5. Debe hacer un segundo anillo a una distancia de 7,8 cm desde el primero. Ambos anillos deben tener la misma dirección de giro y deben ubicarse alineados del mismo lado del alambre. Haga un tercer y cuarto anillo siguiendo el mismo procedimiento, y a la misma distancia de 7,8

cm cada uno del otro. Corte el último elemento activo a una distancia de 8,0 cm desde el cuarto anillo.



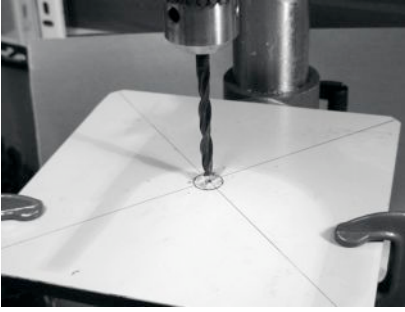
*Figura 4.20: Intente mantenerlo lo más recto posible.*

Si los anillos fueron hechos correctamente, ahora debe ser posible insertar un tubo a través de todos ellos como se muestra en la imagen.



*Figura 4.21: Insertar un tubo puede ayudar a enderezar el alambre.*

6. Con un marcador y una regla, dibuje las diagonales en la placa metálica para encontrar su centro. Con una mecha pequeña, haga un agujero piloto en el centro de la placa. Incremente el diámetro del agujero utilizando mechas de mayor diámetro.



*Figura 4.22: Taladrar el agujero en la placa de metal.*

El conector N debe encajar exactamente en la perforación. Si es necesario use una lima.



*Figura 4.23: El conector N debe encajar exactamente en la perforación.*

- Para tener una impedancia de antena de 50 Ohms, es importante que la superficie visible del aislante interno del conector (el área blanca alrededor de la clavija central) esté al mismo nivel que la superficie de la placa. Por esta razón, debe cortar 0,5 cm de un tubo de cobre con un diámetro externo de 2 cm, y colocarlo entre el conector y la placa.



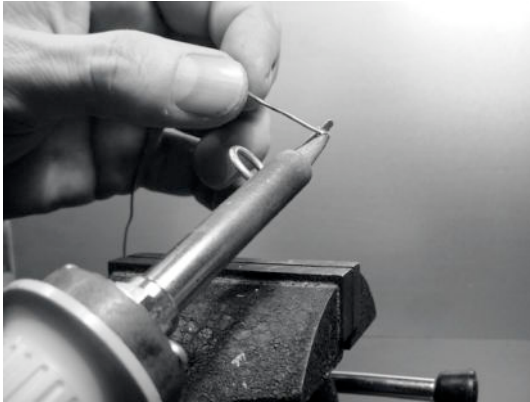
*Figura 4.24: Agregar un tubo de cobre espaciador ayuda a obtener la impedancia de la antena de 50 Ohms.*

- Atornille la tuerca al conector para fijarlo firmemente en la placa utilizando la llave inglesa.



*Figura 4.25: Asegure el conector N firmemente a la placa*

- Pula con la lima el lado del alambre que tiene 2,5 cm de largo desde el primer anillo. Cubra de estaño aproximadamente 0,5 cm en el extremo pulido ayudándose con la prensa.



*Figura 4.26: Agregue una pequeña capa de estaño al extremo del alambre para “estañearla” antes de soldarlo.*

- Con el soldador, “estañee” la clavija del conector. Mantenga el alambre en posición vertical con las pinzas y suelde el lado “con estaño” en la clavija. El primer anillo debe estar a 3,0 cm de la placa



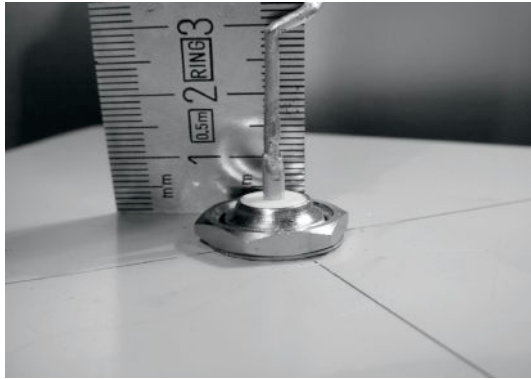


Figura 4.27: El primer anillo debe comenzar a 3,0 cm desde la superficie de la placa

11. Ahora vamos a estirar los anillos extendiendo el largo total del alambre. Usando la prensa y las pinzas estire el alambre hasta que el largo final de cada anillo sea de 2,0 cm.



Figura 4.28: Estirar los anillos. Sea muy cuidadoso y trate de no raspar la superficie del alambre con las pinzas.

12. Repita el mismo procedimiento para los otros tres anillos, llevando su longitud hasta 2,0 cm.

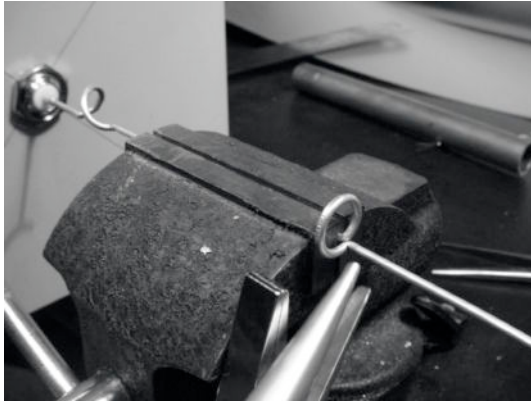


Figura 4.29: Repita el procedimiento de ajuste para todos los anillos restantes.

13. Al terminar, la antena debe medir 42,5 cm desde la placa hasta la punta.

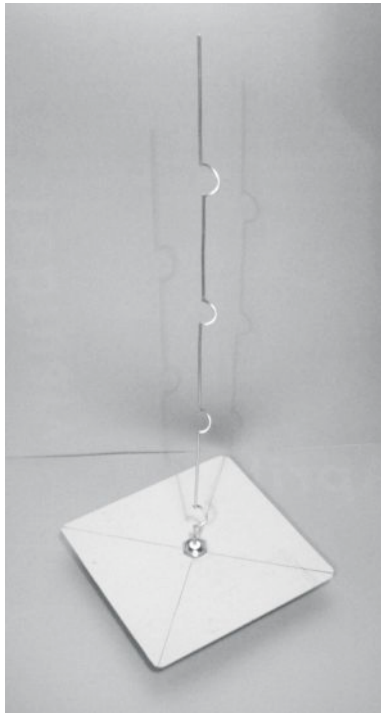


Figura 4.30: La antena terminada debe medir 42,5 cm. desde la placa hasta el final del alambre.

14. Si tiene un Analizador de Espectro con un Generador de Barrido y un Acoplador Direccional, puede chequear la curva de la potencia reflejada de la antena. La imagen que sigue muestra el despliegue del Analizador de Espectro.

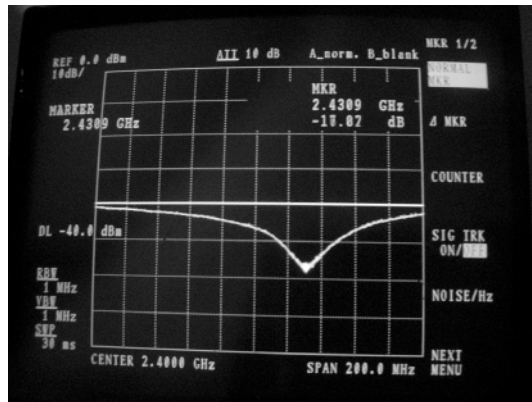


Figura 4.31: Un trazado del espectro de la potencia reflejada por la antena omnidireccional.

Si quiere utilizar esta antena en exteriores, va a necesitar impermeabilizarla. Un método simple es encerrar toda la antena en un tubo de PVC cerrado con tapas. Abra una perforación abajo para la línea de transmisión y selle la antena con silicona o pegamento.

## Antena de lata o de guía-onda

Esta antena algunas veces llamada Cantenna, utiliza una lata como guía de onda y un cable corto soldado a un conector N como sonda para la transición del cable coaxial a la guía de onda. Puede construirse fácilmente al precio del conector únicamente, reciclando una lata de comida o de jugo. Es una antena direccional, útil para enlaces punto a punto de corta a media distancia. También puede utilizarse como alimentador para un plato o una malla parabólica.

No todas las latas son buenas para construir una antena porque existen algunas limitaciones en cuanto a la dimensión:

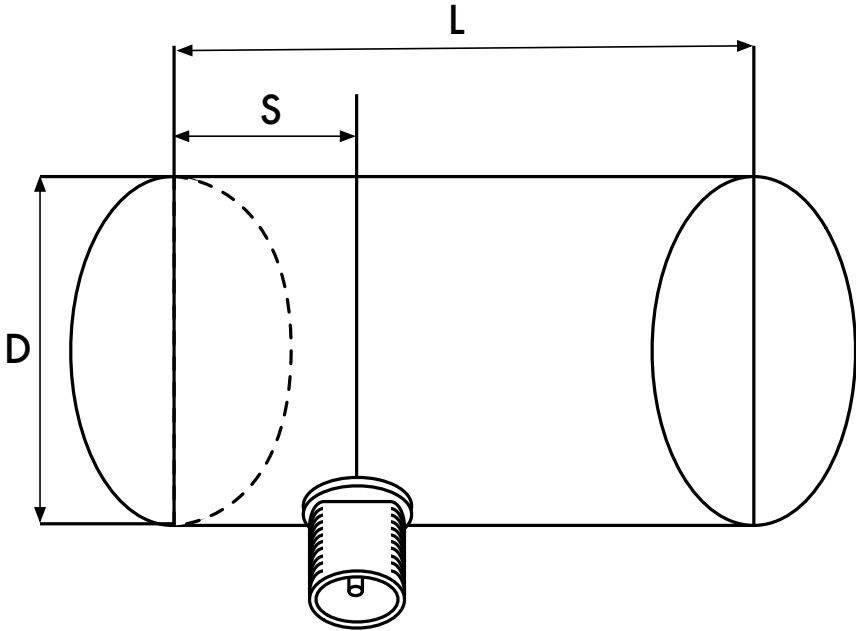


Figura 4.32: Limitaciones de dimensión en la antena guía-onda.

1. Los valores aceptables para el diámetro  $D$  del alimentador están entre 0,60 y 0,75 de longitud de onda en el aire a la frecuencia designada. A 2440 MHz la longitud de onda  $\lambda$  es de 12,2 cm, por lo tanto, el diámetro de la lata debe estar en el rango de 7,3 a 9,2 cm.
2. El largo  $L$  de la lata debería ser preferiblemente de al menos  $0,75 \lambda_G$ , donde  $\lambda_G$  es la longitud de onda dentro de la guía y está dada por:

$$\lambda_G = \frac{\lambda}{\text{sqrt}(1 - (\lambda / 1.706D)^2)}$$

Cuando  $D$  sea = 7,3 cm, necesitamos una lata de al menos 56,4 cm, mientras que para  $D = 9,2$  cm la lata debería ser de al menos 14,8 cm. Generalmente cuanto más chico el diámetro, más larga debe ser la lata. Por ejemplo, vamos a usar latas de aceite que tienen un diámetro de 8,3 cm y una altura de aproximadamente 21 cm.

3. El elemento activo para la transición del cable coaxial a la guía de onda debe posicionarse a una distancia  $S$  desde el fondo de la lata, dada por:

$$S = 0.25 \lambda_G$$

Su largo debe ser de  $0,25 \lambda$ , el cual a 2440 MHz corresponde a 3,05 cm.

La ganancia para esta antena va a estar en el orden de 10 a 14 dBi, con un ancho de haz de alrededor de 60 grados.



*Figura 4.33: La antena guía-onda terminada.*

### Lista de componentes

- Un conector tipo N hembra atornillable
- 4 cm de alambre de bronce o de cobre de 2 mm de diámetro
- Una lata de aceite de 8,3 cm de diámetro y 21 cm. de largo



Figura 4.34: Componentes necesarios para la antena de lata.

## Herramientas requeridas

- Abrelatas
- Regla
- Pinzas
- Lima
- Soldador
- Estaño
- Taladro con un juego de mechas para metal (con una mecha de 1,5 cm de diámetro)
- Prensa o abrazadera
- Llave inglesa
- Martillo
- Perforadora / Sacabocados

## Construcción

1. Con el abrelatas quite cuidadosamente la parte superior de la lata.



Figura 4.35: Tenga cuidado con las puntas afiladas de los bordes al abrir la lata.

El disco circular tiene puntas muy afiladas. ¡Sea cuidadoso al manejarla! Vacíe la lata y lávela con jabón. Si la lata contenía ananás, galletitas, u otras cosas sabrosas, tenga la bondad de servir la comida a un amigo.

2. Con la regla, mida 6,2 cm desde el fondo de la lata y dibuje un punto. Tenga cuidado de medir desde el lado interior del fondo. Utilice un punzón (o una mecha pequeña o un destornillador Phillips) y un martillo para marcar el punto. Esto hace que sea más sencillo taladrar el agujero de forma precisa. Asegúrese de no deformar la lata insertando un pequeño bloque de madera u otro objeto dentro de la lata antes de golpearla.



Figura 4.36: Marque el agujero antes de taladrar.

3. Con una mecha pequeña del taladro, haga un agujero en la posición previamente marcada. Incremente el diámetro del mismo utilizando mechas con un diámetro cada vez mayor. El conector N debe encajar exactamente en la perforación. Use la lima para alisar el borde del agu-

jero y para remover la pintura que lo rodea para asegurar un mejor contacto eléctrico con el conector.



*Figura 4.37: Taladre cuidadosamente un agujero piloto, luego use una mecha más grande para terminar el trabajo.*

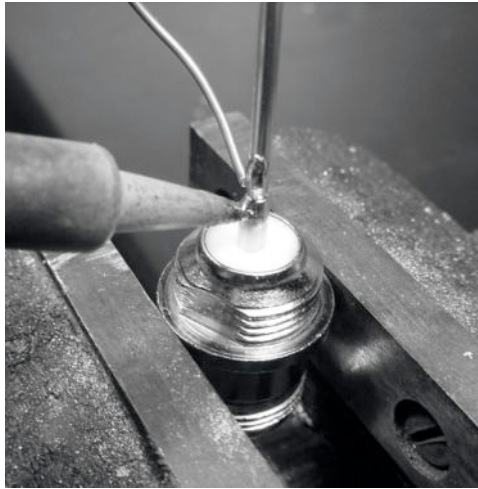
4. Alise con la lima uno de los extremos del alambre. Cubra con estaño el alambre alrededor de 0,5 cm en el mismo extremo ayudándose con la prensa.



*Figura 4.38: Estaño el extremo del alambre antes de soldarlo.*

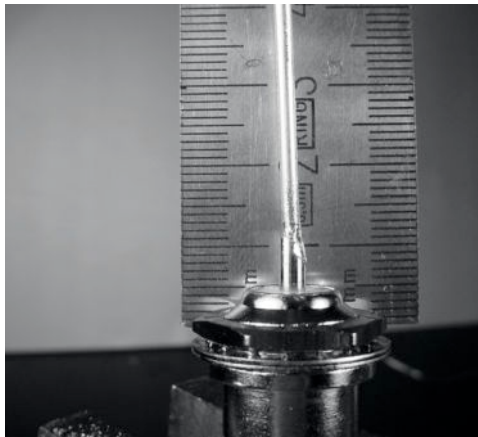
5. Con el soldador, suelde la clavija del conector. Mantenga el alambre en posición vertical con las pinzas, suelde el lado estañado en el agujero de la clavija





*Figura 4.39: Suelde el alambre a la copa dorada en el conector N.*

6. Inserte una arandela y atornille suavemente la tuerca en el conector. Recorte el alambre a 3,05 cm medidos desde la base de la tuerca.



*Figura 4.40: El largo del alambre es crucial.*

7. Destornille la tuerca del conector, dejando la arandela en el lugar. Inserte el conector en el agujero de la lata. Atornille la tuerca al conector desde el interior de la lata.



Figura 4.41: Arme la antena.

8. Utilice las pinzas o la llave inglesa para ajustar firmemente la tuerca al conector. ¡Ha terminado!



Figura 4.42: Su antena guía-onda terminada

Al igual que los otros diseños de antenas, debe hacer una cubierta a prueba de agua para la antena si quiere usarla en exteriores. El PVC funciona bien para la antena de lata. Coloque toda la antena en un tubo grande de PVC, y selle los extremos con tapas y pegamento. Va a tener que hacer una perforación en un lado del tubo en el lado de la lata para pasar el conector N con la línea de transmisión.

## La antena de lata como alimentador de plato

Al igual que con la parabólica con *dongle* USB, se puede utilizar el diseño antena de lata como un alimentador para obtener una ganancia significati-

vamente mayor. Monte la antena de lata en la parabólica con el lado abierto de la lata enfocando al centro del plato. Use la técnica descrita en el ejemplo de la antena *dongle* USB (observar cómo cambia la intensidad de la señal variando la posición del iluminador) para encontrar la ubicación óptima de la lata para el plato que está usando.

Con el uso de una antena de lata bien construida en una parabólica afinada correctamente, se puede lograr una ganancia global de la antena de 30dBi o más. Al incrementar el tamaño de la parabólica, se aumenta la ganancia y la directividad de la antena. Con parábolas muy grandes, usted puede obtener una ganancia mucho más grande.

Por ejemplo, en 2005, un equipo de estudiantes estableció exitosamente un enlace desde Nevada a Utah en los Estados Unidos. ¡El enlace cruzaba una distancia de más de 200 kilómetros! Estos entusiastas del mundo inalámbrico usaron platos de satélite de 3,5 metros para establecer un enlace 802.11b que corría a 11Mbps, sin utilizar un amplificador. Los detalles acerca de este logro pueden encontrarse en <http://www.wifi-shootout.com/>

El 13 de abril de 2006, un equipo de la Fundación EsLaRed (Ermanno Pietrosevoli y Javier Triviño), y del ICTP (Carlo Fonda) lograron transferir archivos con tecnología Wi-Fi a una distancia de 279 km usando dos enrutadores Linksys WRT54 con firmware de código abierto. Se usaron antenas satelitales recicladas, a la frecuencia de 2.412 MHz, sin emplear amplificadores. La experiencia se realizó en Venezuela, entre el Pico del Águila, a 4.100m, y el cerro El Baúl, a 125 m de altura. Detalles en <http://www.wilac.net/>

## NEC2

El **NEC2**, nombrado así por **Numerical Electromagnetics Code**, es un paquete de modelación de antenas gratuito. NEC2 le permite construir un modelo de antena en 3D, y luego analiza la respuesta electromagnética de la misma. Fue desarrollado hace más de diez años y ha sido compilado para correr en diferentes sistemas de computadoras. NEC2 es particularmente efectivo para analizar modelos basados en configuraciones de alambres, pero también tiene ciertas facilidades para modelar superficies planas.

El diseño de la antena se describe en un archivo de texto, y luego se construye el modelo utilizando esa descripción textual. Una antena descrita en NEC2 está dada en dos partes: su **estructura** y una secuencia de **controles**. La estructura es simplemente una descripción numérica de dónde se localizan las diferentes partes de la antena y cómo están conectados los alambres. Los controles le dicen a NEC dónde está conectada la fuente de RF. Una vez definidos, se modela la antena transmisora. Debido al teorema de reciprocidad el patrón de ganancia de transmisión es el mismo que el de

recepción, por lo tanto modelar las características de transmisión es suficiente para comprender el comportamiento de la antena en su totalidad.

Se debe especificar una frecuencia o rango de frecuencias de la señal de RF. El siguiente elemento importante son las características del terreno. La conductividad de la tierra varía mucho de lugar a lugar, pero en muchos casos juega un rol vital en determinar el patrón de ganancia de la antena.

Para correr NEC2 en Linux, instale el paquete NEC2 desde el URL que está abajo. Para iniciarlo, escriba **nec2** e ingrese los nombres de los archivos de entrada y de salida. También vale la pena instalar el paquete **xnecview** para verificar la estructura y el trazado del patrón de radiación. Si todo funciona bien, se debe obtener un archivo que contiene el resultado. Este puede separarse en varias secciones, pero para una rápida idea de lo que representa se puede trazar un patrón de ganancia utilizando xnecview. Usted debería ver el patrón esperado, omnidireccional horizontalmente, con un pico correspondiente al ángulo óptimo de salida. También están disponibles las versiones Windows y Mac.

La ventaja de NEC2 es que podemos tener una idea de cómo funciona la antena antes de construirla y cómo podemos modificar el diseño para tener la ganancia máxima posible. Es una herramienta compleja y requiere algo de investigación para aprender a utilizarla efectivamente, pero es invaluable para los diseñadores de antenas.

NEC2 está disponible desde los "Archivos NEC no Oficiales" de Ray Anderson en <http://www.si-list.org/swindex2.html>

Se puede obtener documentación en la "Página Principal no Oficial de NEC" en <http://www.nittany-scientific.com/nec/>