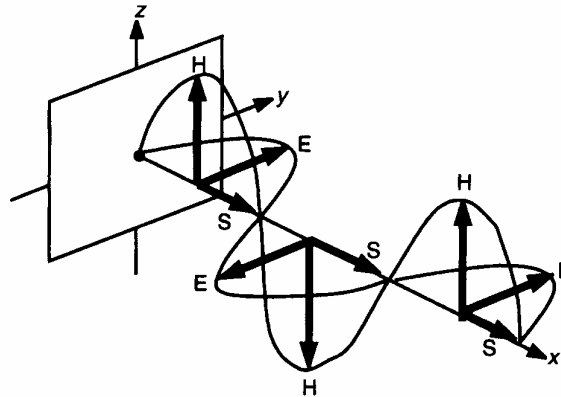


## 6 Antenas para Enlaces de Microondas

### Consideraciones de antenas

El componente principal bajo el control del planificador de radio en términos de diseño de enlace detallado es la ANTENA. Sus características generales incluyen ganancia, rechazo a la interferencia, altura sobre el nivel del suelo, carga en la torre, son todos factores críticos para obtener un diseño exitoso. Por esta razón se dedica un capítulo completo a la antena, su alimentador asociado y sistema auxiliar.

**Teoría fundamental electromagnética:** Cuando analizamos los parámetros de los circuitos eléctricos uno usualmente analiza el efecto de un flujo de corriente a través de una cierta impedancia que se establece por el elemento. Cuando se considera antenas es muy útil analizar los efectos en términos de vectores de campos eléctricos y magnéticos del frente de onda, el cual es generado por una antena, viajando como un campo electromagnético. Una onda electromagnética (EM) tiene dos componentes ortogonales: un campo eléctrico y, perpendicular a éste, un campo magnético. Estos dos campos pueden ambos ser considerados señales variando sinusoidalmente perpendicular a cada uno del otro, ambos normal a la dirección de propagación, como se muestra en la figura 6.1.



En una onda electromagnética, los campos eléctricos y magnéticos interactúan uno con el otro. Una variación del campo magnético inducirá un campo eléctrico y una variación del campo eléctrico inducirá un campo magnético. El frente de onda es la línea imaginaria que es dibujada a través del plano de fase constante. Una onda plana es una que tiene un frente de onda plano. Un frente de onda uniforme es uno que tiene magnitud y fase constante. La magnitud de los vectores de campo eléctrico y magnético son por tanto iguales y están “en fase”, los máximos y mínimos por lo tanto ocurren al mismo tiempo para ambas ondas. La onda EM viaja en una dirección perpendicular al frente de onda.

Ondas EM en el espacio libre viajan como una onda plana uniforme, esto es conocido como una onda transversal EM (TEM).

#### 6.1.1. Período

El período de la onda es la longitud de tiempo antes que la onda se repita asimismo y puede ser expresada como:

$$T = 1/f \quad \dots (6.1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia (El número de ciclos en 1 segundo, medido en Hertz).

### Longitud de onda

La longitud de onda de la señal es la distancia entre 2 puntos de la igual fase, el cual depende del medio en el cual la señal esta viajando y puede ser expresada como:

$$\lambda = v / f \quad \dots (6.2)$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación (m/s) y  $f$  es la frecuencia (Hertz)

### Velocidad de propagación

La velocidad de propagación puede ser expresada como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon \cdot \mu)}} \quad \dots (6.3)$$

Donde ( $\epsilon$ ) es llamado la permitividad y puede ser expresado como  $K \cdot \epsilon_0$ ;  $\epsilon_0$  es la permitividad del espacio libre =  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m;  $K$  es la permitividad relativa por ejemplo,  $K(\text{aire}) = 1$ ; ( $\mu$ ) es la permeabilidad y puede ser expresada como  $K_m \cdot \mu_0$ ;  $\mu_0$  es la permeabilidad del espacio libre =  $1.257 \times 10^{-6}$  H/m; y  $K_m$  es la permeabilidad relativa dependiendo del material usado; por ejemplo,  $K_m(\text{aluminio}) = 1.00000065$ .

Todo medio dieléctrico es especificado en términos de permitividad y permeabilidad, las cuales miden capacitancia e inductancia respectivamente.

En el vacío:

$$v = \frac{1}{\sqrt{(\epsilon_0 \cdot \mu_0)}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \quad \dots (6.4)$$

$v = c$  (velocidad de la luz)

La velocidad de propagación en otro medio depende de la permitividad y permeabilidad de aquel medio. En el aire, la permitividad y permeabilidad es aproximadamente el mismo como en el vacío, por tanto el haz de microonda viaja a la velocidad de la luz, independientemente de la frecuencia.

### Polarización

La polarización de la señal corresponde al plano del vector del campo eléctrico. Si uno imagina una onda sinusoidal viaja perpendicularmente a fuera de la página, la amplitud del vector podría oscilar desde un máximo positivo a través de cero a un máximo negativo. En este plano, en el vector eléctrico oscila verticalmente y por lo tanto es polarizado verticalmente.

### Densidad de potencia

Una onda EM transporta energía que puede ser representada como una densidad de potencia  $P_d$  en Watts/m<sup>2</sup>. Una fuente puntual de radiación que transmite energía uniformemente en todas direcciones es llamada fuente isotrópica. Si uno considera una esfera alrededor de esta fuente isotrópica con potencia de salida  $P_t$  teniendo como área  $A = 4\pi r^2$ , luego la densidad de potencia ( $P$ ) puede ser expresado como:

$$P = P_t / (4\pi r^2) \quad \dots (6.5)$$

### Características de las antenas

Una antena es básicamente un elemento radiante que convierte energía eléctrica en forma de corriente en un frente de onda EM en la forma de oscilación de campos eléctricos y magnéticos. Cualquier flujo de corriente en un conductor establecerá un campo magnético. Cualquier variación de flujo de corriente generará una variación de campo magnético que establece un campo eléctrico; hay por lo tanto una interacción entre el campo eléctrico y magnético que resulta en la propagación EM, la rapidez de variación de estos campos, incrementa la radiación del elemento conductor (antena). Los componentes del campo que no son radiados son producidos por la parte capacitiva e inductiva de la antena, resultando en la antena la aparición de una impedancia compleja y no precisamente una resistencia.

### Ganancia

Una antena es un dispositivo pasivo y así por definición no puede amplificar la señal; sin embargo, ello puede dirigir la señal a ser fuerte en una dirección respecto de otras. Considerando un globo: Si uno globo fue apretado en los lados, ello podría expandir en las puntas. Este es la base por el cual nosotros consideramos como ganancia de antena. La referencia es un radiador isotrópico que por definición tiene ganancia cero. El aumento por el cual la antena dirige la señal en una particular dirección es descrita en términos de su ganancia. Cuando uno habla de la ganancia de la particular antena, esto es, la radiación es enviada directamente afuera por el frente de la antena, la ganancia es expresada como la razón entre la densidad de potencia de referencia  $P$  de un radiador isotrópico y la densidad de potencia en una particular dirección de la antena en consideración. Este es usualmente expresado en una escala logarítmica en decibeles, las antenas de microonda son usualmente especificada en  $\text{dB}_i$  y puede ser expresada como:

$$\text{dB}_i = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{di}} \quad \dots(6.6)$$

Donde  $P$  es la densidad de Potencia en la dirección considerada y  $P_{di}$  es la densidad de potencia de un radiador isotrópico. Siendo un radiador isotrópico no puede ser construido en la práctica, otra manera de expresar la ganancia es comparar ello con un dipolo doblado, el cual la construcción física de la antena se aproxima a la antena de radiador isotrópico. Este es típicamente hecho para antenas de VHF y UHF los cuales son expresados como  $\text{dB}_d$ .

$$\text{dB}_d = 10 \log_{10} \frac{P}{P_{dd}} \quad \dots (6.7)$$

Donde  $P$  es la densidad de potencia en la dirección considerada y  $P_{dd}$  es la densidad de potencia de un dipolo omnidireccional, la ganancia de una antena expresada en  $\text{dB}_d$  es 2.16 dB menos respecto a una antena isotrópica ( $\text{dBi}$ ).

Para antenas de microondas, la ganancia es dependiente del área de la apertura de la antena. La ganancia de una antena puede ser expresada como:

$$G(\text{dBi}) = 10 \log \eta (4\pi Aa/\lambda^2) \quad (6.8)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia de apertura de antena,  $Aa$  es el área de apertura de antena, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal.

Maximizando la ganancia por medio de la iluminación de la completa cara parabólica del reflector podría resultar en una muy pobre razón Front-to-Back (F/B).

Este es definido en la sección 6.2.3. El área de iluminación es por lo tanto deliberadamente reducida para mejorar los lóbulos laterales y lóbulos posteriores. Estos son definidos en la sección 6.2.2 típicamente los rangos de eficiencia entre 50% y 60%. Si uno asume un plato parabólico con una eficiencia de 55% y expresa la unidad en metros y Giga Hertz una útil expresión sería la siguiente.

$$G(\text{dBi}) = 17.8 + 20 \log (d.f) \quad \dots(6.9)$$

Donde  $d$  es el diámetro de la antena (metros) y  $f$  es la frecuencia del alimentador (GHz). Esto es una muy útil fórmula para el planificador de radio para estimar la ganancia de cualquier antena parabólica de microonda, si los detalles exactos de la actual antena no se encuentran disponibles.

### 6.2.2 Lóbulos Laterales

Las antenas de microondas están preparadas a sus direccionales, la radiación máxima esta por lo tanto en la dirección de propagación. En la práctica, es imposible concentrar toda la energía en esta dirección. Algunas de ellas se extienden fuera por los lados laterales y posteriores de la antena. Debido a la fase compleja establecida en un patrón de antena, resultan lóbulos. El lóbulo principal esta alrededor del centro de la antena. El objetivo de una antena direccional es para maximizar la energía en el lóbulo principal por medio de la minimización de la energía en los lóbulos laterales. Ello es importante para entender las gráficas de patrón de radiación de la antena.

### 6.2.3 Relación Frente/Espalda o Front-to-Back

Como se discutió, no toda la energía radiada sale por el frente de la antena. Algunas de ellas radian por los lóbulos posteriores. La razón F/B es definido como la razón de la ganancia en la deseada dirección respecto a la ganancia en la dirección opuesta de la parte posterior de la antena. Ello es expresado en decibeles. Ello es muy importante en sistemas backbone (columna vertebral) de radio microonda para tener antenas con una buena razón F/B para habilitar el reuso de frecuencia. Razón de 70dB puede ser requerida. Cuando se especifica la razón F/B de una antena, un ángulo amplio en la parte posterior del plato debiera ser considerado y no precisamente el valor actual en 180 grados.

### 6.2.4 Ancho del Haz

El ancho del haz es una manera de indicar la estrechez del lóbulo principal, el ancho del haz en los puntos de media potencia es el ancho del lóbulo principal a intensidad de media potencia (p.e 3dB por debajo del punto máximo). A mayor ganancia de la antena, más estrecho se hace el ancho del haz. Recordar que cuando ganancia es incrementada en una dirección, los lóbulos laterales decrecen en las otras direcciones. El ancho del haz de la antena es usualmente reducida por el incremento del tamaño del reflector, la alta ganancia de las antenas no solo mejora el margen de desvanecimiento (Fade margin) de un radio enlace pero también resulta en reducir interferencia de señales fuera de vista. Uno precisamente tiene que ser cuidado con antenas de ganancia muy alta que la estabilidad de las torres deba ser bastante rígidas para evitar una pérdida de potencia por el retorcimiento de la torre. No es común tener antenas de microondas con un ancho del haz de menos que un grado. Con antenas de alta ganancia donde el ancho del haz es muy estrecho, ángulo de desvanecimiento puede ocurrir. Esto causa bajo desvanecimiento debido a la discriminación de la antena. En la práctica, este límite es útil para la ganancia de antena especialmente sobre enlaces de altas frecuencias.

### 6.2.5 Polarización

La polarización de la señal es determinada por el terminal del alimentador. Los enlaces de radio deben ser establecidos para transmitir y recibir sobre la misma polarización. Si una señal es recibida con la polarización opuesta, esto hace que la señal sea atenuada debido a la polarización cruzada y es referido como **Cross – Polar Discrimination (XPD)**. La operación de polarización cruzada es frecuentemente empleada sobre caminos que pueden suceder interferencia como se discute en el capítulo 7, la operación de doble polarización es frecuentemente usada a incrementar la capacidad del sistema usando una polarización dual en el terminal del alimentador. Este es solo posible en antenas parabólicas sólidas. El reflector de una antena rejilla es naturalmente polarizada de acuerdo al plano que la rejilla excluye y, por lo tanto, solo soportará una polarización. La operación de polarización dual usualmente requiere el uso de un cancelador de interferencia de cruce-polar (XPIC) para contar los efectos de rotación de fase sobre un salto debido a fenómenos de desvanecimiento tal como la lluvia.

#### 6.2.6 Patrón de Radiación

El patrón establecido por una antena tiene un aspecto tridimensional, uno normalmente necesita conocer la forma y amplitud de varios lóbulos. Esto es hecho por el ploteo de la señal alrededor de 360 grados en ambos planos. En el caso de VHF y VHF antenas, este es usualmente hecho con una gráfica polar. Para antenas de microondas la gráfica es aplanada dentro de un patrón de radiación de envolvente (RPE), el cual indica los lóbulos desde  $-180$  grados a  $+180$  grados sobre una línea base. Gráficas polares y RPEs son comparados en la figura 6.2.

#### 6.2.7 VSWR

Una antena presenta una impedancia compleja respecto del sistema alimentador, el cual esta conectada a ella. El sistema alimentador también representa una impedancia fija, allí puede ocurrir una impedancia desbalanceada en la conexión a la antena, no toda la potencia es por lo tanto radiada afuera por la antena. Alguna potencia es reflejada hacia la parte posterior al alimentador. Este desbalance es cuantificado en términos de la razón de voltaje de onda estacionaria (VSWR). En un sistema real siempre estará allí algún desbalance en ambos terminales. Una onda estacionaria es por tanto establecida en el cable por las ondas reflejadas que son reflejadas arriba y abajo del cable. El cable estará atenuando la señal reflejada. La señal reflejada por el desbalance en la antena será reflejado a la fuente, sin embargo, siendo ello está atenuado por 3 veces por la atenuación del cable ello no es por tanto normalmente un problema, la onda reflejada establece una onda estacionaria en un voltaje mínimo y máximo cada cuarto de longitud de onda. El voltaje máximo coincide con puntos donde la onda incidente y reflejada están en fase y el voltaje mínimo donde ellos se cancelan en fase. El VSWR puede así ser expresado como:

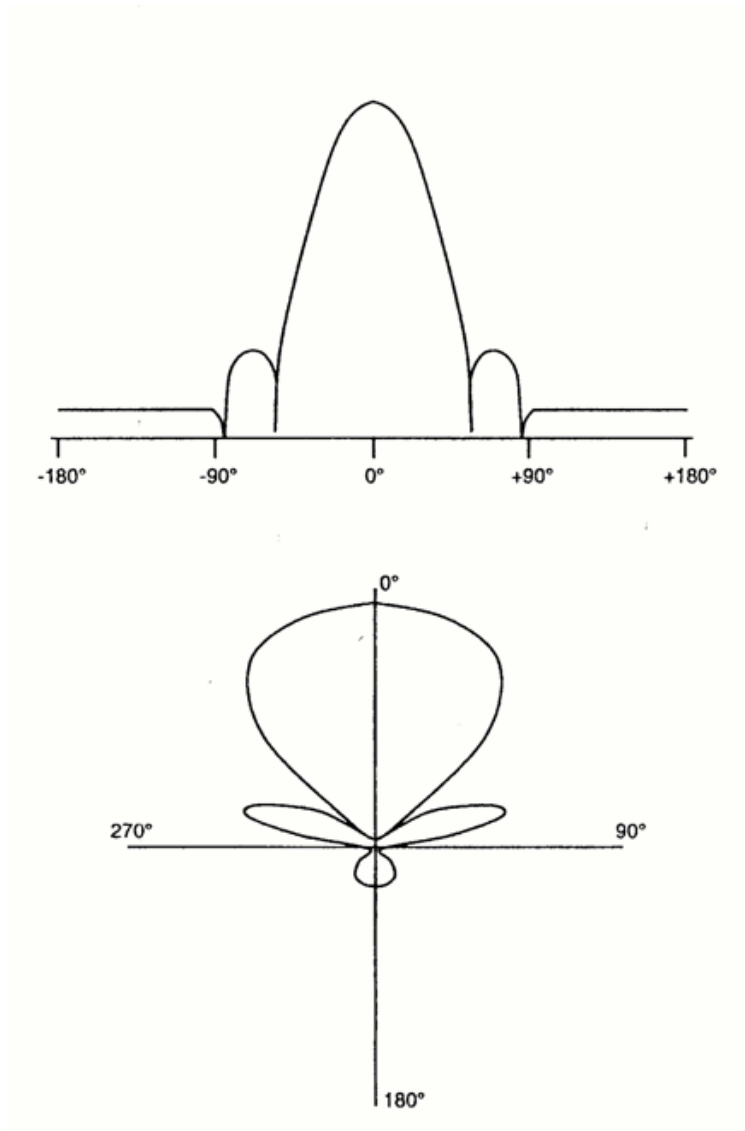
$$VSWR = V_{m\acute{a}x} / V_{mi} \quad (6.10)$$

El valor VSWR siempre será mayor que la unidad y el mejor VSWR es un valor que aproxime a la unidad. Prácticamente, una buena comparación estará resultando en un valor alrededor de 1.2.

Un coeficiente de reflexión ( $\rho$ ) definido, expresa la relación entre las ondas reflejada e incidente.

$$\rho = (VSWR - 1) / (VSWR + 1) \quad \dots(6.11)$$

Las muchas maneras de expresar este desbalance es con el retorno pérdida (RL), el cual es la diferencia decibel entre la potencia incidente sobre el desbalance y la potencia reflejada por el desbalance. La (RL) en decibelios es expresado en términos del coeficiente de reflexión.



$$RL_{dB} = 20 \log (1/\rho) \quad \dots (6.12)$$

El valor alto del RL, es mejor. Típicamente esta figura debiera ser superior que 20 dB para sistemas de radio microonda. Para lograr esto, los componentes individuales debieran exceder 25 dB.

### 6.2.8 Campo Cercano, Campo Lejano

Los patrones de antena son solo completamente establecidos a una determinada distancia desde la antena. Este es asimismo llamado campo lejano (far-field), la física geométrica puede ser usada por predecir la fuerza del campo. Conceptos tales como ganancia de la antena y perdida en el espacio libre son todos definidos en el campo lejano. La fuerza de la señal en el campo cercano (near-Field) no es fácilmente definido debido a ello se tiene un patrón oscilatorio. La distancia del campo lejano es definido como:

$$\text{Far field: distancia} = \frac{2D^2}{\lambda} \quad \dots(6.13)$$

Donde  $D$  es el diámetro de la antena en metros y  $\lambda$  es la longitud de onda en metros. El efecto sobre la ganancia de antena cuando las antenas están en el campo cercano es mostrado en la figura 6.3. En el primer 40% del campo cercano tiene un efecto no es tan drástico, pero una vez esta distancia es excedida la respuesta es oscilatoria; por lo tanto, ello es extremadamente difícil decir cual es la ganancia de la antena.

Esta curva es especialmente útil para sistemas de antenas Back-to-Back donde el corto terminal del salto pueden tener antenas que están bastante próximas. Como un ejemplo, asuma las antenas están separadas por 60m, la ganancia a 8 GHz, 1.8m de plato es 40.8 dBi en el campo lejano. La ganancia de un plato de 3m en el campo lejano es de 45.2 dBi. En 60m las antenas están en el campo cercano. El factor normalizado del campo cercano  $X$  es

$$X = R/2D^2 / \lambda \quad \dots(6.14)$$

Donde  $R$  es la distancia entre las 2 antenas en metros.  $D$  es el diámetro de la antena, y  $\lambda$  es la longitud de onda de la señal.

Usando (6.14) nosotros podemos calcular que para antenas de 1.8m operando a 8 GHz y separado por 60m,  $x = 0.35$  usando figura 6.3 nosotros podemos ver que la reducción de la ganancia de la antena es aproximadamente 2dB.

La ganancia efectiva de un plato de 3m es así 39.2 dBi. Ello puede ser visto, por tanto, que debido al efecto del campo cercano, la ganancia de la antena efectiva no incrementa cuando el tamaño de la antena es incrementado.

Las antenas próximas están acopladas, entonces cuando la ganancia de la antena incrementa el factor de acoplo incrementa también.

### 6.3 Tipos de antenas de microondas

Los diferentes tipos de antenas considerados aquí son todos basados sobre un reflector parabólico. El terminal alimentador es siempre colocado en el punto focal, tanto la señal reflejada fuera el elemento reflector están en fase, como se muestra en la figura 6.4

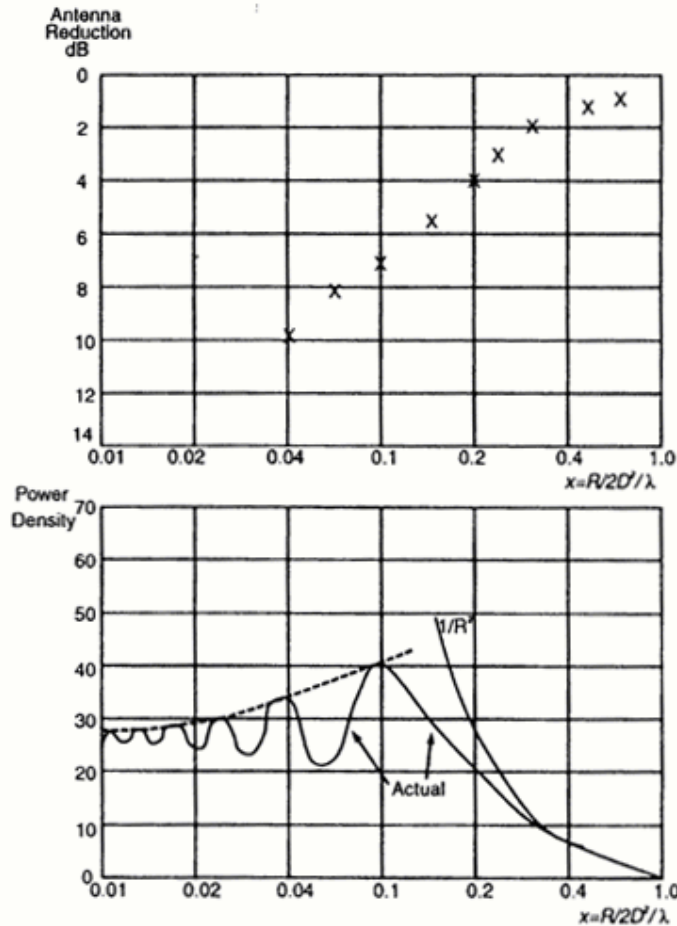
#### 6.3.1 Grid antena (Grilla)

Las antenas rejillas pueden ser usadas en frecuencias de microondas bajas, por debajo cerca de 2.5 GHz, la ventaja de las antenas rejillas es que ellos tienen significativamente menos carga de viento (wind loading) sobre la torre.

Desde un punto de vista eléctrico tienen los mismos parámetros de la antena de plato sólido, exactamente puede ser usado el mismo terminal alimentador (conector).

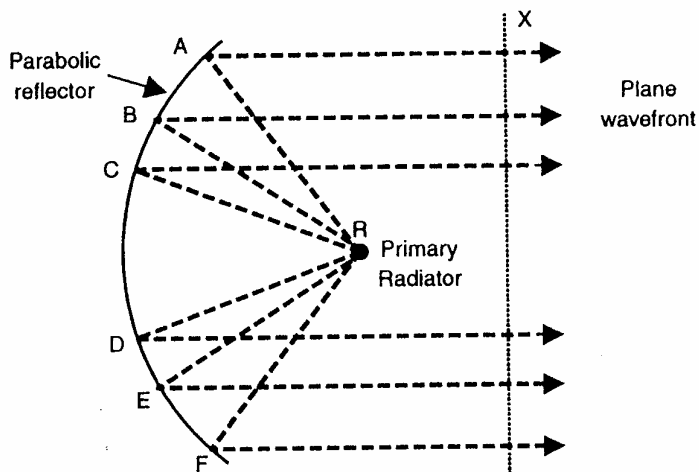
La longitud de onda se escoge tal que la “apertura” entre las rejillas no afecta el comportamiento eléctrico de la antena. Eléctricamente no hay diferencia entre un reflector sólido y un reflector tipo rejilla.





En la práctica, el reflector rejilla tiene un poco menos razón  $F/B$  debido a la difracción alrededor de los elementos de rejillas. Una limitación de las rejillas es que ellos no pueden soportar más de una polarización. La varilla reflectora naturalmente polariza la señal en la dirección que la varilla se sitúa. Esto resulta una muy buena discriminación de cruce polar.

Las antenas de rejillas tienden a ser significativamente más económicas que las antenas sólidas. El terminal alimentador es de simple construcción y el aumento de material usado por el reflector es perdida. Los costos por transporte, una porción significativa del costo de una antena, son también reducidos debido a que ellos pueden ser distribuidos en partes.



### 6.3.2 Antenas Parabólicas Sólidas

#### 6.3.2.1 Antenas estándares

Antenas parabólicas estándares son usualmente construidos de aluminio. Ellos son manufacturados por planchado de una hoja de aluminio alrededor de un spinning parábolas-shaped chuck. Los reflectores asimismo no son

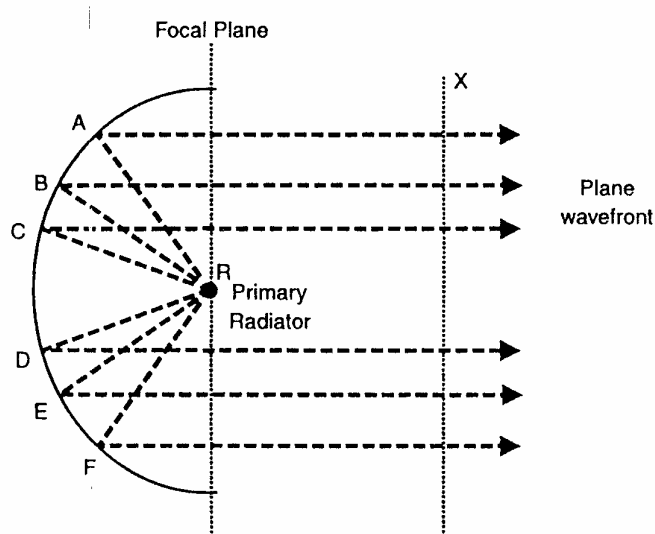
dependientes de la frecuencia, pero a más alta frecuencia, mas perfección de la superficie es requerida. En la práctica los reflectores son por tanto especificados por la banda de frecuencia. Esta antena tiene parámetros estándares de, ganancia, relación F/B, ancho de haz y RL. Si uno desea una mejora en estos parámetros, se deben hacer ciertos cambios en la antena

#### 6.3.2.2 Antena de plano focal

En orden para mejorar la supresión de lados laterales y la razón F/B, la antena de plano focal extiende el reflector parabólico hacia el plano del foco. Esto significa que el área de apertura es incrementada, más que incrementar el área iluminada, el cual debiera resultar en un incremento en ganancia, el área semejante es iluminada, reduciendo el ensanchamiento que resulta en bandas laterales y posteriores lóbulos. En la práctica, la ganancia disminuye debido a la reducción de la eficiencia de iluminación de la antena. Para mejorar la razón F/B adicionalmente, la antena tiene especial geometría de borde. El plato es construido con un borde dentado. Este desaparece completamente las corrientes remolino, cancelando las componentes activos de fase, así reduciendo radiación detrás del plato. Este tipo de disco ofrece al menos 10 dB mejorando en la razón F/B comparado con una antena estándar, con una muy delgada reducción en ganancia (significativamente menor que 1 dB). El principio de una antena plana focal es mostrado en la figura 6.5.

#### 6.3.2.3 Antena de alto rendimiento (performance)

Cuando una muy buena razón F/B es requerido con excelente supresión de lóbulo lateral, alta-performance, muy-alta-performance, y ultra-alta-performance estas antenas, son requeridas. Estas antenas usan un amortaje alrededor del borde del plato para eliminar radiación desde los lados laterales y posteriores de la antena. Estas amortajas son envueltas en alto material absorbente que absorbe la energía de radio microonda.



En el caso de antenas de ultra-alta-performance, el terminal alimentador asimismo es también envuelto con este material para eliminar el puñado de a fuera. Esto produce un poco de reducción en la ganancia debido a que parte de la energía expedido es absorbido también. Alimentadores especiales son también empleados para este tipo de plato. El RPEs son especificados por cada lado de la antena siendo el terminal alimentador no simétrico y por lo tanto el patrón varía un poco de cada lado. Antenas de alta performance son significativamente más costosas que las antenas estándares pero es usualmente necesario sí se requiere reuso de frecuencia.

#### 6.3.2.4 Antenas Slipfit

Para sistemas de radio donde la unidad de antena RF es montado al aire libre, la antena es frecuentemente montada directamente con la unidad RF. Este elimina la necesidad para una conexión de guía de onda, significativamente reduciendo todas las pérdidas. Esta conexión es propietaria debido a ello es desarrollado por un diseño de empalme entre los fabricantes de radio y antenas.

### 6.3.3 Radomes

Son protectores de las antenas



### 6.4 Cable coaxial

El propósito de la línea de transmisión (feeder) en este contexto es para transferir la señal RF desde el módulo transmisión del equipo de radio al sistema de antena en la manera más eficiente. Para configuraciones de equipo que tiene la Unidad RF a la espalda de la antena, el alimentador es usado para llevar la banda base y señales IF más la energía y señales de telemetría, hay dos tipos principales de líneas de transmisión usados en sistemas de microondas: Cables coaxiales y guías de onda.

#### 6.4.1 Cable coaxial

Los cables coaxiales son construidos con un núcleo metálico interno con un material dieléctrico separando el conductor metálico exterior, como se muestra en la figura 6.6.



El cable está envuelto con una cubierta plástica de protección. El material dieléctrico es usualmente aire o espuma, en la práctica, los cables son bastante robustos y por tanto fáciles de instalar. Diferentes cubiertas de cable son disponibles para interiores y al aire libre. Para aplicaciones en exteriores la cubierta UV resistente es el factor clave. El núcleo central del conductor es siempre de cobre para asegurar la alta conductividad. El cable exterior tiene una mayor área superficial y por tanto conductividad no tan crítica. Cobre revestido de aluminio o plata laminada de alambre de acero es también usado. El conductor exterior frecuentemente toma la forma de alambre trenzado para mejorar la flexibilidad sin embargo un conductor sólido tiene de lejos un superior producto de performance intermodular (IMP). En este caso, una superficie circular es usualmente desarrollada para mejorar la flexibilidad.

La pérdida por cable es una función del área de cruce seccional; por lo tanto el grosor del cobre disminuye la pérdida. Obviamente la desventaja del grosor de los cables es la reducción de flexibilidad e incrementar el costo. La pérdida del cable es calculado en decibelios por 100m. Cables con dieléctrico de aire ofrece una solución de baja pérdida pero tiene la complejidad de presionar para guardar la humedad exterior.

Cuando la frecuencia de operación incrementa, la resistencia del conductor incrementa, resultado en pérdida de potencia debido a la temperatura. Cualquier corriente alternando no tiene una uniforme densidad de corriente. La densidad de corriente tiende a ser mayor en la superficie del conductor, el cual es un fenómeno conocido como el efecto piel. A frecuencias de giga hertz, este cambio en resistencia puede ser grande. La pérdida del conductor por 100m por tanto incrementa con el incremento de frecuencia.

Otra razón que produce la pérdida producida por el incremento de la frecuencia es que la pérdida de radiación de un conductor incrementa con la frecuencia a la potencia de 4 ( $10^4$ ), la energía RF viaja dentro del conductor como una onda EM por el conductor interno y el conductor externo acoplados los campos de esta manera propagan la señal. Como la frecuencia incrementa, nuevos nodos de acoplo son introducidos que interfieren con la señal. Este efecto de acoplo inserta pérdidas que limita su uso de un conductor coaxial a solo frecuencias por debajo de 3 GHz. Longitud de cable RF muy corto es requerido, por ejemplo para conectar la unidad RF exterior a la antena en configuraciones de unidad de radio dividida, cables coaxiales especiales puede ser usado en bandas de frecuencias de 23 GHz.

Para aplicaciones donde hay una configuración de radio de unidad-dividida, el cable es usado para llevar la banda base IF, telemetría y potencia DC. Las características de atenuación usualmente limita la longitud del cable a aproximadamente a 150m para un cable tipo RG-6. Esta longitud puede ser duplicada para un tipo de cable RG-11. Cables coaxiales son disponibles en  $50\ \Omega$  o  $75\ \Omega$ .

$$Z_0 = 138 / \sqrt{E} \times \log D/Kd \quad \dots(6.15)$$

Donde E es la constante dieléctrica, D es el diámetro del núcleo exterior, d es el diámetro del núcleo interior y k el factor de trenzado.

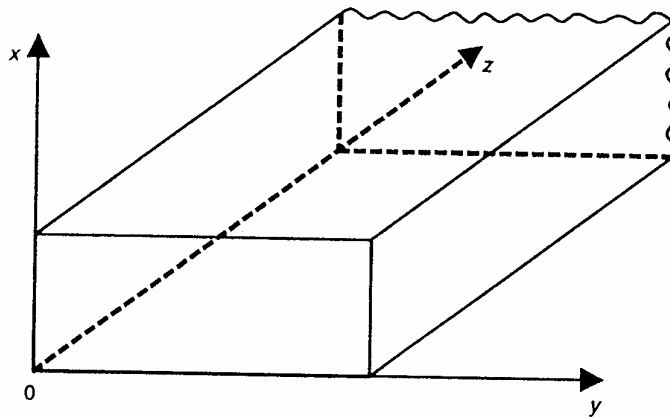
El estándar usual usado es de  $50\ \Omega$  para aplicaciones RF y  $75\ \Omega$  para aplicaciones IF. Tradicionalmente, este es para acomodar el efecto que cable IF tienen tendidos de cables largos. Cables coaxiales con impedancia característica de  $75\ \Omega$  tiene una baja atenuación respecto al cable coaxial de  $50\ \Omega$ , la impedancia de salida del equipo de radio, los cables conectores y el cable mismo debería ser fabricado para asegurar una buena transferencia de potencia y baja distorsión de la señal.

El conector asimismo no tiene una impedancia característica a menos que una sección dieléctrica viene siendo insertada dentro del conector cilíndrico.

Uno necesita chequear que las dimensiones de los pines comprados con los conectores tradicionales tienen diferentes tamaños de pines para los diferentes conectores.

#### 6.4.2 Guía de onda

La energía de microondas puede ser guiada en un tubo metálico llamado una guía de onda con muy baja atenuación, los campos eléctricos y magnéticos son contenidos dentro de la guía y por lo tanto no hay pérdida de radiación. Adicionalmente, siendo el dieléctrico de aire, la pérdida por dieléctrico son pequeñas. Una guía de onda solo opera entre 2 frecuencias límites; llamadas frecuencia de corte. Estas frecuencias dependen de la geometría de la guía de onda comparada con la longitud de onda de operación. Las guías de onda deben ser escogidas por la banda de frecuencia a trabajar que soporta el deseado modo de propagación.



Recordar que una onda no guiada viajando a través del espacio libre viaja como fuente de onda TEM. En una guía de onda rectangular las ondas planas guiadas son reflejadas de pared a pared, resultando en una componente de campo eléctrico o magnético en la dirección del frente de onda y otra componente en posición paralela a ella. Ello por tanto no está viajando como una onda TEM. Este es ilustrado en la figura 6.7.

En guía de ondas las configuraciones de campo (o modos) pueden ser clasificados como TE (transversal eléctrico) o TM (transversal magnético). En una guía rectangular los modos son diseñados como  $TE_{mn}$  y  $TM_{mn}$ , donde m y n denotan valores enteros para los números de media longi-

tudes de onda en las direcciones X e Y, respectivamente, asumiendo la onda viajando en la dirección Z como se muestra en la figura 6.8.

Por debajo de una cierta frecuencia de corte crítica, no hay propagación de la onda en la guía. Esta frecuencia de corte es expresado como

$$f_c = 1/(2\pi\sqrt{\mu\epsilon}) \cdot \sqrt{(K_x^2 + K_y^2)} \quad \dots (6.16)$$

donde  $\sqrt{(K_x^2 + K_y^2)}$  es el número de onda de corte y  $\mu\epsilon$  son las constantes dieléctricas del medio. Para una guía de onda con dimensiones de altura (a) y dimensión del ancho (b).

$$K_x = m\pi/a \quad \dots (6.17)$$

y

$$K_y = n\pi/b \quad \dots (6.18)$$

Usando (6.15) y sustituyendo (6.16) y (6.17). Obtenemos la frecuencia de corte en una guía rectangular.

$$f_c = 1/(2\sqrt{\mu\epsilon}) \cdot \sqrt{(m^2/a^2 + n^2/b^2)} \quad \dots(6.19)$$

La frecuencia de corte es por tanto una función de las dimensiones de la guía. El tamaño físico determina el modo de propagación. En una guía rectangular el ancho es usualmente dos veces la altura, por tanto  $2a = b$ .

El modo con la frecuencia de corte más baja es llamado el modo dominante. En un modo rectangular este es el modo  $TE_{01}$ . Si nosotros recordamos que  $1/(\sqrt{\mu\epsilon})$  es igual a la velocidad de propagación y que la constante dieléctrica del aire puede ser asumida igual a la unidad, luego la frecuencia de corte para una guía rectangular operando en el modo  $TE_{01}$  puede ser expresado como

$$f_c = c/(2 \cdot \sqrt{(1/b^2)}) \quad \dots(6.20)$$

$$c = c/2b$$

Donde c es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/seg). Para  $TE_{10}$ ,  $f_c = c/2a$

Es posible tener más de un modo en una guía de onda, sin embargo usualmente solo el modo dominante se propagará y los otros modos decaen muy rápidamente.

Otro importante concepto en la teoría de guía de onda es que la longitud de onda dentro de la guía difiere de aquella en el exterior. La longitud de onda dentro de la guía para modos  $TE_{mn}$  puede ser expresado como

$$\lambda_g = \lambda / \sqrt{(1 - (f_c/f)^2)} \quad \dots(6.21)$$

Debido a las configuraciones de campo complejo y fuerte dependencias sobre la forma de la guía de onda, las instalaciones deben ser conducidas con el debido cuidado. Las guías de ondas

tienen una limitación para doblarse en ambos planos, la guía de onda debiera no ser variada debido a que esto resulta en un no cuantificable distorsión de retardo de grupo.

Las más comunes guía de onda usadas en una instalación de radio microonda es la guía de onda elíptica. Este tiene paredes de cobre corrugado con una funda de plástico para la protección. Estas corrugaciones producen un cable fuerte con una limitada habilidad de doblarse, la limitación sobre la dobléz es especificado en términos de un radio de dobléz en el plano–E y plano–H, un pequeño radio de dobléz es permitido en el plano–E, por tanto, uno debiera utilizar este cuando planifica instalar una guía de onda. Aunque una máxima variación es especificada, variaciones debieran ser evitadas, cuando se planifica una instalación.

Un cambio en el plano desde E a H puede fácilmente ser disponible dentro de unos pocos metros sin variación de la guía de onda por medio de la dobléz de la guía de onda dentro del especificado radio de dobléz de cada plana E y H respectivamente, la efectiva longitud de la guía de onda es determinada por la pérdida en la guía de onda. La pérdida en la guía de onda es especificada en decibeles por 100 m e incrementa significativamente con el incremento de la frecuencia. Por encima de 10 GHz, la pérdida empieza a ser excesivo y los fabricantes frecuentemente ofrecen la elección de una banda base y conexión IF a la unidad RF montado sobre la torre para evitar largas longitudes de guía de onda.

### **Accesorios de los sistemas de antenas**

#### **Presurizadores**

Para evitar el ingreso de aire húmedo dentro del alimentador dieléctrico, este debe estar presurizado. Las variaciones diarias de temperatura dan lugar a la variación del volumen de aire en el interior del alimentador. Durante el enfriamiento nocturno, el aire húmedo caliente puede penetrar el alimentador, originando humedad sobre sus paredes esta puede producir una oxidación no deseada. Se usa aire seco o gas inerte como el nitrógeno con una presión de casi 10m bar para prevenir que la humedad ingrese. Una ventana de presión debe ser insertada sobre las secciones presurizada y no presurizada del alimentador, la cual se ubica usualmente en el borde del radiador tras las conexiones.

La unidad presurizada debe dimensionarse según el largo total del alimentador que será presurizado. Los presurizadores de aire seco son con frecuencia llamados deshidratadores. Convencionalmente los de este tipo conducen el aire húmedo a través de un desecador, el cual absorbe la humedad. Los más recientes usan una membrana para separar la humedad.

#### **Conectores**

Las conexiones de guías de onda sobre el radiador y la antena pueden ser hechas fácilmente usando una combinación secciones rígidas rectas, con giros y curvas. Estas necesitan ser cuidadosamente planificadas según la medida de la altura de la guía de onda de entrada con respecto a la guía de onda de fuerza sobre el equipo y también considerando la polarización de la antena.

#### **Equipos para una “Puesta a tierra”**

Es importante no permitir inducción dentro del equipo la cual se origina por el cable alimentador. Así el cable debería estar propiamente a potencial de tierra. Los equipos en tierra son convenientes estos proveen un buen contacto entre la guía de onda misma y el cable a tierra. Cuando se hace esta instalación es importante sellar la unidad así no se permitirá el ingreso de humedad dentro de la conexión. Las trayectorias de prueba corta y directa deben solicitarse entre el equipo terrestre el punto de tierra.

Para cables coaxiales los de captura directa son adecuados estos usan tubos de gas de captura para absorber los que puedan surgir. Un problema con estos tubos es que frecuentemente estos pueden descargarse sin que el usuario tenga conocimiento que el tubo tiene fallas, pruebas continuas son así requeridas.

#### Sujetadores de cable

Los cables sobre la torre están sujetos para soportar fuertes tensiones y torsiones debidas a la vibración originada por diversas fuerzas. Es importante que estén fijados con seguridad a la estructura de guía de onda. El caso de la guía de onda también es importante para soportar el peso del cable, de otro modo las aperturas del alimentador en la base de la torre pueden comenzar a unirse, normalmente se recomienda que los tornillos no están situados a mas de 1m de distancia.

La unión no debe cortar o distorsionarse al alimentador, las uniones plásticas adquieren fragilidad muy rápidamente debido a la radiación UV, proveniente del sol. Un material libre de corrosión y resistente a la radiación UV semejante al acero reforzado es normalmente requerido.

#### Instalaciones prácticas

Las antenas pueden pesar media tonelada y estar sujetas a severas fuerzas de viento. Se deben intentar que estén operativas por 20 meses o más. Esto es importante, por eso, se deben instalar apropiadamente y tomar las medidas necesarias para asegurar un largo periodo de servicios. Tornillos galvanizados pueden ser usados para total conveniencia. El acero inoxidable es un buen material libre de corrosión, pero este tiende a doblarse y por ello debe ser usado con cuidado.

El uso de tornillos es bastante adecuado aunque la tuerca debe contar con el espacio necesario para sacarla, limpiarlas y volver a ajustarla. Las antenas largas usualmente tienen un contorno al costado para frenar los giros sobre la torre. Se puede asegurar de estos movimientos, por eso es esencial una adecuada selección de armazones reforzados.

Por razones de seguridad, alineamiento de brazos, contornos, y cables de alimentación no deben obstruir el paso peatonal. Las conexiones a tierra pueden estar instaladas encima o debajo del alimentador sobre la torre en los extremos de la dirección vertical. Además, si en la dirección horizontal de la torre hacia las estructuras excede la distancia de 5m, un a conexión adicional a tierra podría ser instalado en la entrada de guía de onda.

Parte de la instalación y comisionamiento de un sistema de microondas para por realizar el calculo del nivel de recepción. Este es hecho por alineamiento de antenas.

Como se discutió anteriormente, las antenas de microondas son directivas y la máxima ganancia se alcanzada cuando se asegura que la señal principal fuera del campo visual de la antena A sea recibida por el campo visual de la antena B. Uno de los errores más comunes cuando se comisiona un sistema de radio es tener las antenas alineadas sobre un lóbulo lateral. Esto puede ser evitado por alineamientos para obtener máxima potencia de salida con un amplio ángulo.

Una vez que la señal máxima es recibida, un alineamiento adicional puede resultar en una reducción inicial de la señal seguida por un gradual incremento hacia un nuevo pico en un nivel mas bajo. Esto confirma que repuesta hacia esta posición. Con tal que estos dimensionamiento sean tomados, las antenas pueden ser alineadas para conseguir estar dentro de 3 dB del nivel de recepción calculado. Cuando esto es conseguido es un buen indicador para el planificador del sistema este es un diseño aceptable.

Todo perno y material fijado debe ser protegido contra la corrosión, están disponibles rociadores para vulcanización para cubrir enteramente pernos, tuercas, etc. Las conexiones del alimentador hacia la antena y las conexiones a tierra, deben también estar protegidas contra los elementos, sellándolos con cintas vulcanizadas cubiertas con pedazos de cinta de un material resistente a rayos UV.

El adecuada colocación del alimentador es muy importante, los soportes deben ser hechos con un material libre de corrosión como al cobre y asegurado firmemente sobre el alimentador con cuidado, con sujetadores firmes para evitar dañar el alimentador.

La futura expansión del sitio debe ser tomada en consideración cuando se hace el planeamiento inicial de la instalación. Los alimentadores nunca deben ser instalados diagonalmente entre el soporte y la estructura de guía de onda. Debido al hecho de que las antenas son frecuentemente colocadas en lugares con montajes especiales para la instalación, es importante que la instalación inicial sea completamente inspeccionada porque el sitio puede estar en un lugar difícil. Esto reducirá algún problema no calculado durante la vida operacional (útil) del sistema.