

Capítulo 2

Antenas

2.1 Antecedentes de electromagnetismo y álgebra vectorial para antenas

2.1.1 Ecuaciones de Maxwell

Las Ecuaciones de Maxwell son expresiones matemáticas que sirven para modelar el comportamiento de los campos eléctrico y magnético e inducción magnética y eléctrica.

Los campos eléctrico y magnético son campos vectoriales, estos cumplen propiedades determinadas por las operaciones divergencia y rotacional, cuyas interpretaciones físicas dan lugar al entendimiento del comportamiento de las ondas electromagnéticas y luego entonces el diseño de dispositivos que radian energía y transmiten información.

Algunas propiedades importantes de los campos vectoriales:

- Una integral de línea de un vector en el caso de una trayectoria cerrada se convierte en la circulación del vector alrededor de la trayectoria.
- La integral de superficie de un vector a través de una superficie cerrada se convierte en el flujo hacia fuera del vector a través de la superficie.
- La derivación de un vector A se realiza mediante el operador nabla: ∇ . Teniendo ∇V : gradiente del campo escalar V , $\nabla \cdot A$: divergencia de un campo vectorial A , $\nabla \times A$: rotacional del campo A y $\nabla^2 V$: Laplaciano del campo V .
- La relación de una integral de línea sobre una trayectoria cerrada con una integral de superficie es dada por el teorema de la divergencia:

$$\oint_S \vec{A} \cdot d\vec{S} = \int_V \nabla \cdot \vec{A} dv$$

- La relación de una integral de línea sobre una superficie cerrada con una integral de volumen es dada por el teorema de Stokes:

$$\oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int_S (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{S}$$

- Si el Laplaciano de un campo es cero en una región dada, se tiene un campo escalar armónico.
- Si la divergencia de un campo vectorial es cero es solenoidal, además, si su rotacional también es cero es irrotacional o conservativo.

Ahora, estas propiedades adoptadas en el electromagnetismo, y con uso de identidades vectoriales se llega al planteamiento de las ecuaciones de Maxwell, que son la relación de leyes que fueron antes propuestas y que en conjunto modelan el comportamiento del fenómeno físico de la electricidad y el magnetismo.

Tabla 2. 1 Ecuaciones de Maxwell.

Forma diferencial	Forma integral	Forma fasorial	Apunte
1. $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = I + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$	$\nabla \times \vec{B} = \vec{J} + j\omega \vec{D}$	Ley de los circuitos de Ampere
2. $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$	$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B}$	Ley de Faraday
3. $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho_v dv$	$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$	Ley de Gauss
4. $\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	Inexistencia de cargas magnéticas o Ley de Gauss para campos magnéticos

Usamos la siguiente notación:

\vec{E} : Intensidad de campo eléctrico.

\vec{D} : Inducción eléctrica o densidad de flujo eléctrico.

\vec{H} : Intensidad de campo magnético.

\vec{B} : Inducción magnética o densidad de flujo magnético.

\vec{J} : Densidad de corriente eléctrica.

ρ : Densidad volumétrica de carga eléctrica.

ω : frecuencia angular

C : contorno cerrado

S : superficie regular limitada por C para las primeras 2 ecuaciones y superficie cerrada para las dos últimas

V : volumen limitado por S

La interpretación física de la primera ecuación de Maxwell es que no es exclusiva la existencia del campo magnético debido a una corriente eléctrica. Debido a la existencia de campo eléctrico variable en el tiempo o corriente de desplazamiento también se tiene un campo magnético.

Para la segunda ecuación de Maxwell se interpreta que existe campo eléctrico debido a la presencia de un campo magnético variable en el tiempo.

En el caso de la tercera ecuación de Maxwell, se tiene que las cargas eléctricas son fuentes del campo eléctrico.

Y finalmente para la cuarta ecuación de Maxwell y de manera similar que la tercera sólo que de manera contraria, expresa que no existen las cargas magnéticas.

Las señales u ondas electromagnéticas son cantidades vectoriales porque tienen velocidad, dirección y magnitud determinada por condiciones del medio, frecuencia y polarización. Como resultado podemos transportar información por medio de las ondas.

Las ecuaciones de Maxwell se resuelven de acuerdo al medio que se caracteriza por los siguientes valores escalares: la permeabilidad magnética: μ , conductividad: σ y permitividad eléctrica: ϵ . Los valores de μ , σ y ϵ pueden cambiar en gran medida por la existencia de dos medios y por lo tanto existirán discontinuidades.

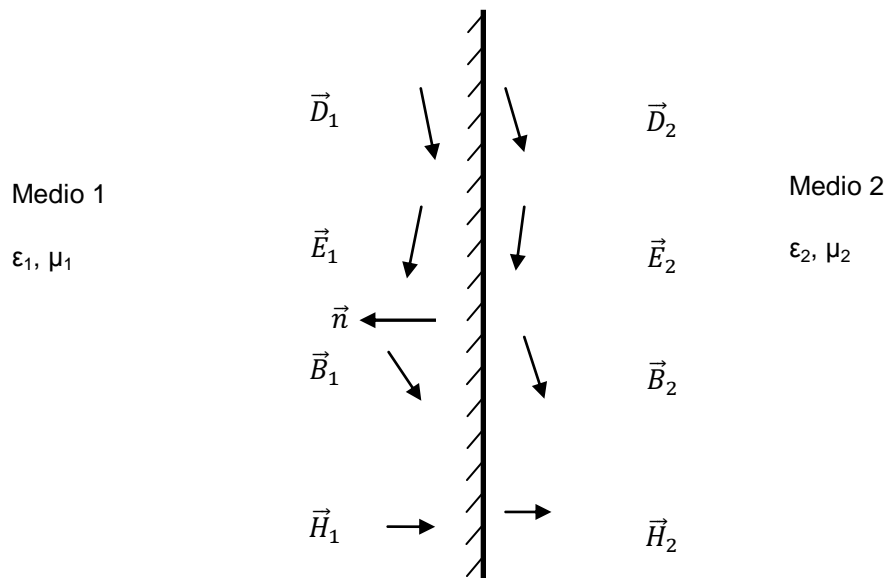


Figura 0.1 Condiciones de frontera.

Estas discontinuidades obedecen las condiciones de frontera:

$$D_{1n} - D_{2n} = \rho_s$$

$$E_{1t} - E_{2t} = 0$$

$$B_{1n} - B_{2n} = 0$$

$$H_{1t} - H_{2t} = K$$

Donde el subíndice n significa componente normal del campo y el subíndice t es la componente tangencial, mientras que \vec{K} es una corriente superficial en la superficie de separación.

2.1.2 Ecuación de onda

Las componentes de los campos eléctrico o magnético cumplen con la siguiente expresión:

$$\nabla^2 A + \gamma^2 A = 0$$

Donde A es una de las componentes de un campo vectorial.

La anterior expresión se denomina ecuación de onda o ecuación de Helmholtz y donde:

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

γ : es la constante de propagación del medio y es número complejo.

La ecuación de Helmholtz es una ecuación diferencial lineal homogénea cuya solución para el campo eléctrico, tomando en cuenta para:

$$E_s = E_{xs}(z)\vec{a}_x$$

Es decir, la componente del campo eléctrico que se propaga a lo largo de $+\vec{a}_z$ y que E_s sólo cuenta con la componente x .

Se tiene entonces:

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} - \gamma^2\right)E_{xs}(z) = 0$$

Cuya solución es:

$$E_{xs}(z) = E_0 e^{-\gamma z} + E'_0 e^{\gamma z}$$

En el tiempo:

$$E(z, t) = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \vec{a}_x$$

Se tiene entonces una onda cuyos frentes son planos paralelos y armónica en el tiempo, $(\omega t - \beta z)$ es la fase en radianes de la onda y la constante de fase: $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$. λ es la longitud de onda, $\lambda = \frac{c}{f}$ o distancia donde los puntos de la onda tienen la misma fase. La constante de atenuación del medio se denomina como: α .

De manera similar se puede resolver con el campo magnético:

$$H(z, t) = H_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \vec{a}_y$$

Se define la impedancia intrínseca como:

$$\eta = \frac{E_0}{H_0}$$

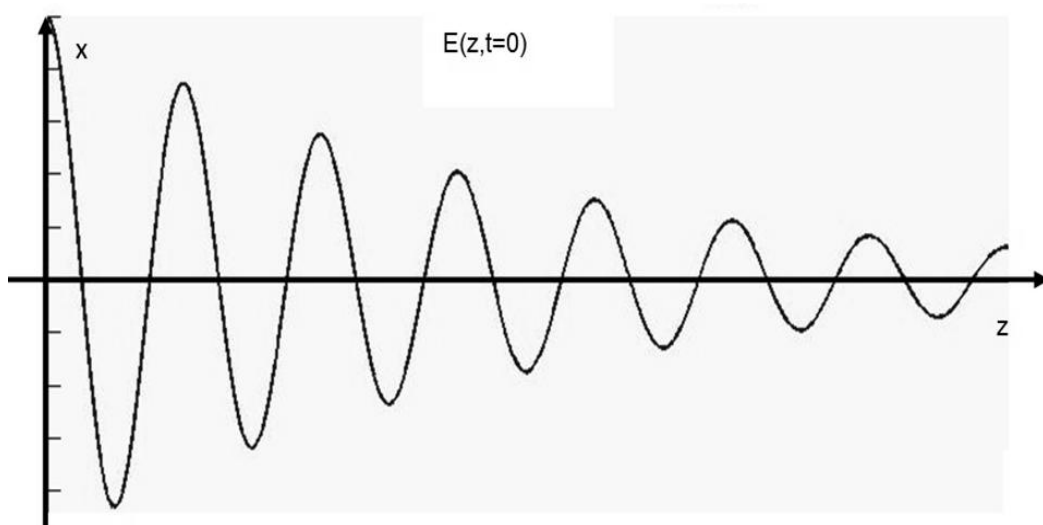


Figura 0.2 Campo E con la componente x en la dirección +z.

2.1.3 Polarización

La polarización de las ondas se define de acuerdo a la orientación del vector del campo eléctrico, siendo:

Polarización lineal si las fases de de las componentes es igual o en contra fase:

$$\rho_{E_{0X}} = \rho_{E_{0Y}}$$

$$\rho_{E_{0X}} = \rho_{E_{0Y}} + \pi$$

Polarización circular si son de magnitudes iguales las componentes del campo eléctrico y además tienen una diferencia de fases de 90° :

$$E_{0x} = E_{0y} (-j)$$

$$|E_{0x}| = |E_{0y}|; \rho_{E_{0x}} = \rho_{E_{0y}} - \frac{\pi}{2}$$

Para definir si es polarización circular derecha o polarización circular izquierda depende de la dirección de propagación.

La polarización elíptica es el caso general donde se tienen magnitudes diferentes y fases diferentes. El caso importante para comunicaciones es la polarización circular.

2.1.4 Vector de Poynting

La propagación de una onda electromagnética implica calor del elemento radiador o pérdidas óhmicas, energía almacenada en los campos eléctrico y magnético y energía de salida o portadora de potencia. Esto es expresado mediante el teorema de Poynting:

$$\oint_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[\frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int_V \sigma E^2 dv$$

La potencia total que sale del volumen es igual a la diferencia de la rapidez de decremento de la energía almacenada en los campos eléctrico y magnético y la disipación de potencia óhmica.

Se define al vector de Poynting como:

$$\vec{P} = \frac{\vec{E} \times \vec{H}^*}{2} = \vec{\Pi}$$

Donde: \vec{H}^* es el complejo conjugado.

Este vector siempre es ortogonal a los campos y coincide con la dirección de propagación.

Esto se interpreta que la propagación de ondas implica portación de potencia, concepto muy útil para calcular la potencia radiada.

Los campos \vec{E} y \vec{H} son normales en cualquier punto de la dirección de la propagación.

Estos modelos son útiles para aproximación de ondas prácticas alejadas de la fuente de radiación.

2.2 Definición de antena

La antena es el dispositivo hecho de estructuras conductoras o dieléctricas que transforma las ondas electromagnéticas dirigidas, provenientes de líneas de transmisión o guías de onda, en ondas electromagnéticas divergentes en el espacio libre o viceversa, es decir, propaga o recibe la energía electromagnética de una manera eficiente. De acuerdo a propiedades de los materiales, frecuencia de operación y diseño geométrico se modifican los parámetros necesarios.

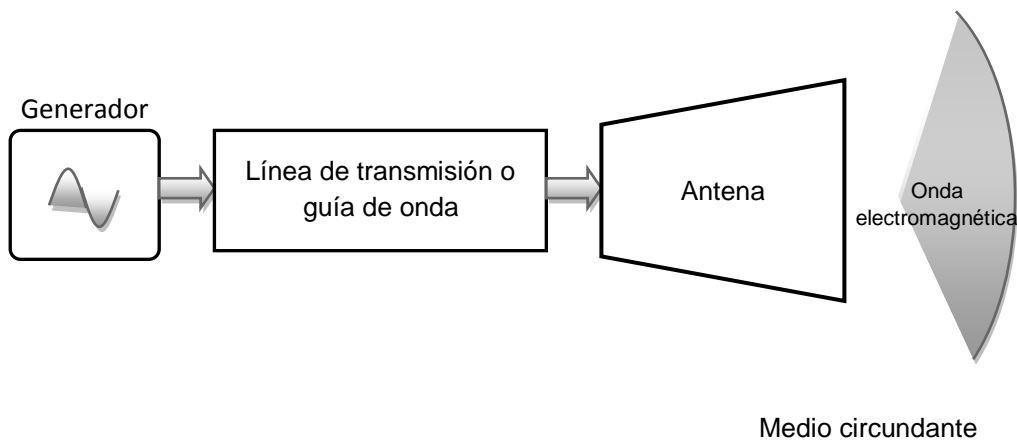


Figura 2.3. Diagrama de antena.

Las antenas se usan para transmitir y recibir energía electromagnética. Su uso depende de las frecuencias de operación y cobertura de las zonas geográficas.

En el satélite de comunicaciones son parte del subsistema de carga útil, es decir, la parte del satélite que contiene la aplicación del mismo. La aplicación se complementa con un sistema repetidor, o también llamado transpondedor. Son funciones de la carga útil: capturar la portadora con la menor cantidad de interferencia, radiar la potencia necesaria en una zona de cobertura definida, en otras palabras, recibe una señal de determinada frecuencia y la repite o amplifica y las transmite a otra frecuencia. En la estación terrena las antenas deben poseer una alta directividad, aislación entre polarizaciones ortogonales y continuo apuntamiento en la dirección del satélite.

2.3 Parámetros

Hay parámetros primarios que sirven para determinar parámetros secundarios para estimar y comparar distintos tipos de antenas. Los parámetros primarios son: la curva característica de emisión vectorial compleja, la resistencia de

radiación, el factor de reflexión de entrada o impedancia de entrada y la potencia límite. Los parámetros secundarios reducen las particularidades de las características de las antenas y son: la anchura del lóbulo principal del diagrama direccional, el nivel de los lóbulos secundarios, la ganancia de antena dirigida o directividad entre otros. Para propósitos de esta tesis, se describen los siguientes: patrón de radiación, ancho de lóbulo principal y ganancia.

2.3.1 Patrón de radiación

Es el factor real positivo de la curva característica de emisión vectorial compleja normada de la antena:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi)\vec{p}(\theta, \varphi)e^{j\phi(\theta, \varphi)}$$

Para llegar a esta expresión se determinan los campos de radiación se requiere determinar:

- La distribución de corriente y hallar el potencial magnético vectorial retardado: \vec{A} .

$$\vec{A} = \int_V \frac{\mu \vec{J}}{4\pi R} dv$$

Donde $R=|r-r'|$, distancia entre el punto de origen r' y el punto de observación r .

- A continuación los campos electromagnético retardados \vec{H} y \vec{E} :

$$\vec{H} = \nabla \times \frac{\vec{A}}{\mu}, \quad \vec{E} = \eta \vec{H} \times \vec{a}_k$$

- Los campos en la zona lejana, se definen en la distancia R :

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

D es la longitud de la antena.

La parte positiva que describe al campo eléctrico es:

$$F(\theta, \varphi)$$

F describe la distribución angular normada del vector de campo eléctrico en la zona lejana de la antena.

Hay varios métodos para representar este parámetro:

Forma tridimensional:

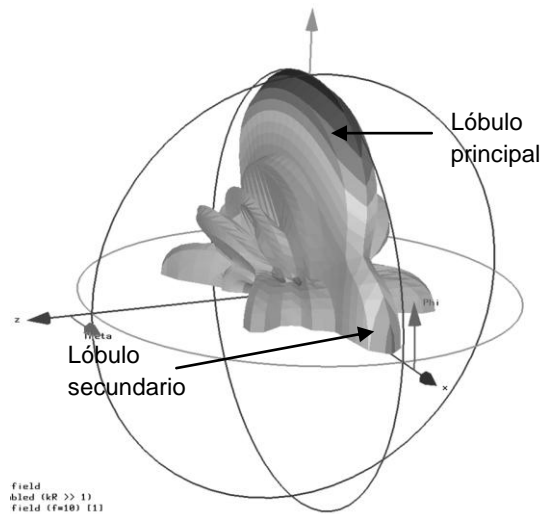


Figura 2.4. Patrón de radiación.

Coordenadas polares:

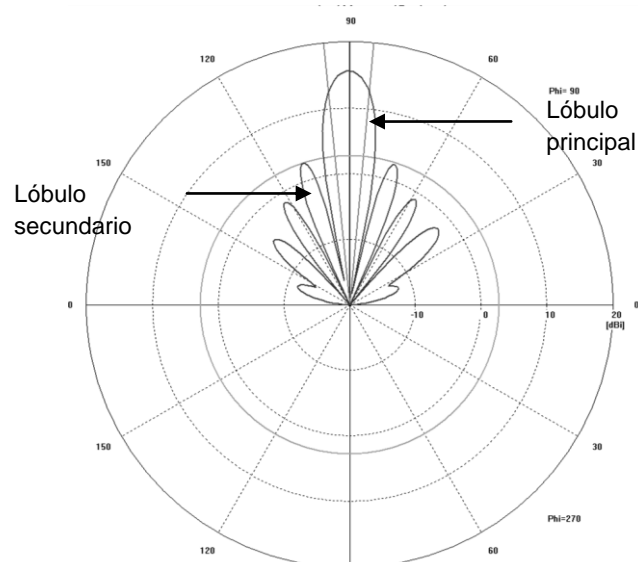


Figura 2.5. Patrón de radiación polar.

Coordenadas cartesianas:

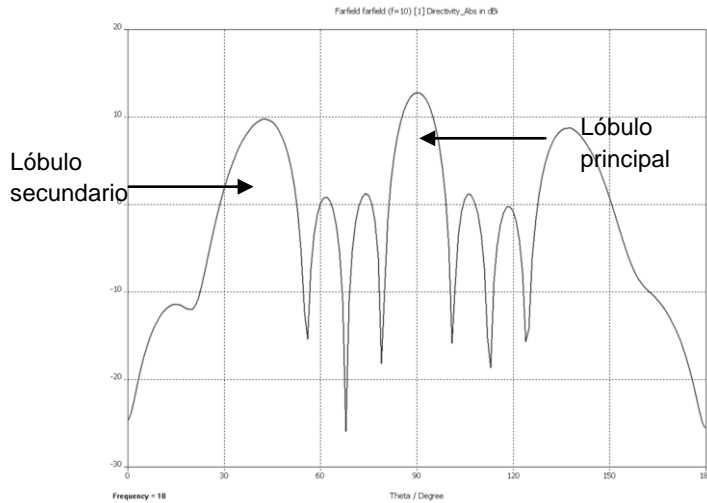


Figura 2.6. Patrón de radiación cartesiano.

El lóbulo principal es la región donde se tiene el máximo de potencia o ganancia y se concentra la mayor parte de la potencia radiada. Se requiere que sea estrecho para tener un buen nivel de señal a mayor distancia, su forma depende principalmente de la geometría de la antena. Los lóbulos laterales, cualquier de los otros lóbulos del patrón de radiación, deben de ser menores que el principal en gran medida (-20, -30 [dB]) ya que son indeseables porque significan desperdicio de potencia.

2.3.2 Ancho de haz angular

Es el ángulo donde la potencia disminuye 3 [dB] respecto al valor máximo, θ_{3dB} .

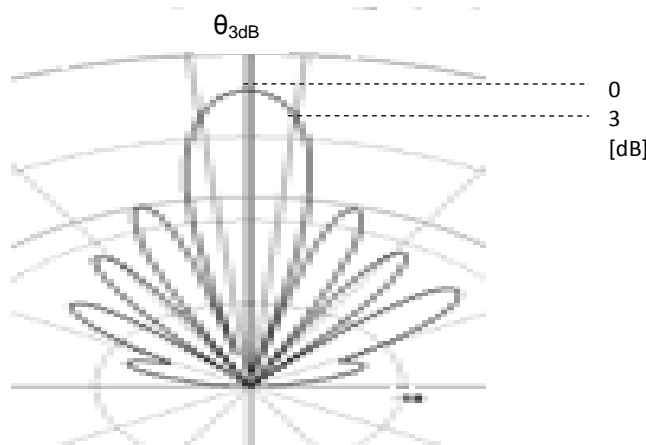


Figura 2.7. Ancho de haz.

El valor de este ángulo puede ser determinado debido a la relación λ/D y un coeficiente que depende de la ley de iluminación escogida. El valor del coeficiente que se usa comúnmente es de 70¹:

$$\theta_{3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}^{\circ}$$

Este parámetro es de gran utilidad ya que determina la protección contra ruido.

La huella de cobertura es la intercepción de la superficie de la Tierra y el lóbulo principal.

2.3.3 Ganancia

Al suministrar potencia a una antena, la cual se puede modelar como una carga resistiva, una parte de la potencia será radiada y otra se transformará en calor. De este hecho se puede utilizar el siguiente parámetro de eficiencia de radiación:

$$\eta = \frac{\text{Potencia radiada}}{\text{Potencia suministrada}}$$

Este factor de eficiencia también depende del acabado de la antena, pérdidas en los bordes, errores de fase entre otros parámetros; por lo general se obtiene este dato por parte del fabricante.

Al usar antenas dirigidas se concentra la potencia en determinada dirección, así es posible usar menos potencia para transmitir o recibir. La directividad de una antena indica cuanto hay que aumentar la potencia de entrada al sustituir una antena real con pérdidas por una antena omnidireccional sin pérdidas ideal y mantener la misma potencia (Figura 2.8). Se puede encontrar de la siguiente forma:

$$D_{max} = \frac{|\vec{\Pi}_{max}|}{|\vec{\Pi}_{prom}|}$$

Es decir, la relación de la magnitud del vector de Poynting en la dirección donde es máxima la radiación entre la magnitud promedio del vector de Poynting.

Entonces para tener un parámetro con más información, se tiene la ganancia de la antena como producto de la directividad por la eficiencia de la antena:

$$G = \eta \cdot D$$

¹ Maral, 2009.

Este parámetro está relacionado con la relación de longitud de onda y el tamaño de la antena, tomando en cuenta el área efectiva de la antena, es decir, la superficie donde se tiene máxima respuesta y la onda plana tiene la misma polarización como la antena, se puede calcular de la siguiente forma:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$$

A_{eff} : Área efectiva de la antena.

$$A_{eff} = \eta A$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

D : diámetro de la antena

Obteniendo:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2$$

También se cumple la relación:

$$P_{recibida} = A_{eff} \cdot |\vec{\Pi}|$$

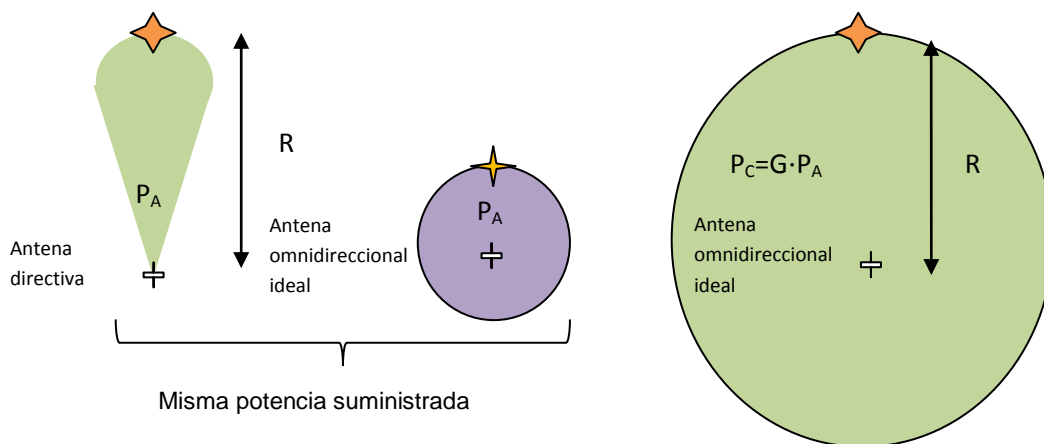


Figura 2.8 Ganancia de antena con reflector.

La ganancia de las antenas se incrementa al usar frecuencias más altas, esto debido a la comparación del tamaño de la antena con la longitud de onda de la señal. Una alta ganancia implica un haz más angosto, es decir si G es muy grande, θ_{3dB} es más pequeño.

2.4 En el Satélite

Las antenas son parte esencial del sistema satelital, para lograr determinadas funciones se tienen distintos tipos. Su función es recibir o transmitir las señales de radiofrecuencia usando uno o múltiples haces de potencia.

Operan principalmente en banda C, Ku y Ka. Y deben cumplir con:

- ✓ Formar el haz para la región de cobertura.
- ✓ Reducir lóbulos laterales
- ✓ Alto aislamiento entre polarizaciones ortogonales.
- ✓ Hacer preciso el apuntamiento del haz.

A continuación se describen los principales tipos de antenas utilizados en el satélite.

2.4.1 Dipolos

Son antenas compuestas por dos conductores alimentados por una distribución de corriente determinada y radia en un eje perpendicular a los conductores.

Un dipolo tiene un patrón de radiación en forma de toroide en tres dimensiones y omnidireccional en el plano perpendicular a los conductores:

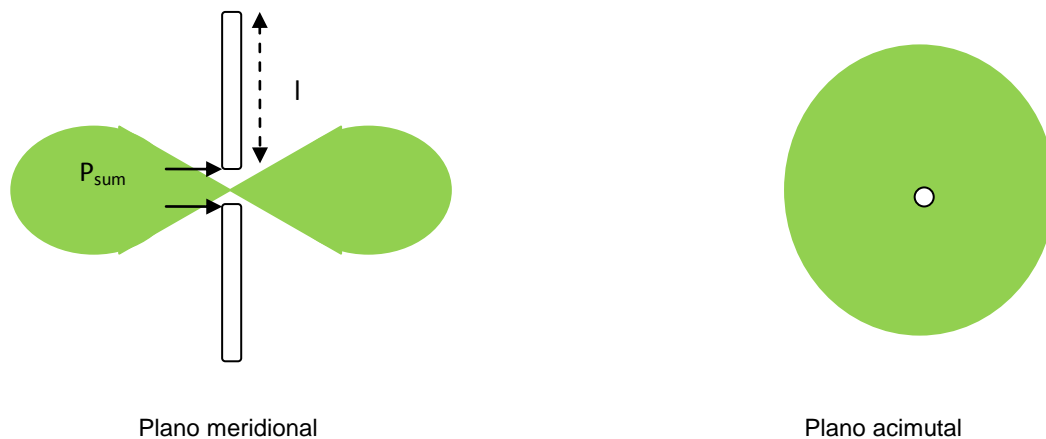


Figura 2.9 Antena Dipolo.

Se puede lograr mayor directividad con un arreglo de dipolos. Su patrón de radiación se modifica de acuerdo a la longitud del dipolo. Por lo general los dipolos son de media longitud de onda: $2l=\lambda/2$ donde alcanzan mayor ganancia ($G=1.5$ y $\theta_{3dB}\approx 50^\circ$) y al superar esta longitud se presentan lóbulos secundarios debido a la aparición de sectores en oposición de fase en el cuadro de distribución de la corriente a lo largo del dipolo.

Dado que son isotrópicas, se usan para enlaces de telemetría y comandos, durante el lanzamiento o cuando no se tiene el posicionamiento debido, ya que permiten recibir o transmitir a cualquier dirección.

Operan en VHF (*Very High Frequencies*), 30 – 300 [MHz] y UHF (*Ultra High Frequencies*), 0.3 – 3 [GHz].

2.4.2 Helicoidal

Este tipo de antenas son hechas con un conductor en forma de espiral, cuyo campo radiado tiene polarización circular y es en dirección del eje del espiral. Los parámetros para modificar el patrón de radiación son la longitud del conductor, el diámetro de las vueltas y la separación de estas.

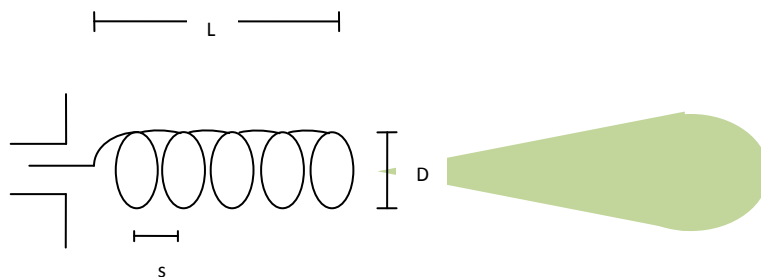


Figura 2.10 Antena Helicoidal.

Una onda progresiva de corriente eléctrica se origina en el espiral y la antena radia el máximo de potencia a lo largo del su eje en dirección del movimiento de la onda de corriente. Alcanzan ganancias de 5 a 20 dBi², es ligera y fácil de montar en el satélite. Funciona para frecuencias debajo de los 2 [GHz]. La forma del haz es de forma cónica cuando se cumple: $D = \frac{\lambda}{\pi}$.

² dBi: ganancia respecto a una antena isotrópica.

2.4.3 Corneta

Son antenas denominadas de apertura por que son extremos abiertos de guías de onda que hace posible radiar energía. Para el caso de guías de onda rectangulares podemos manipular las longitudes de los lados. Existen también para el caso de guías de onda circulares, bocinas cónicas, donde es el diámetro el que podemos manipular. La directividad cambia de acuerdo al ángulo de apertura, si este es grande provoca ensanchamiento del lóbulo principal.

Esta antena se usa por lo general como alimentador de los reflectores, se conectan a guías de onda circular y rectangular. Las antenas sectoriales forman un patrón de abanico, y se logra esto gracias al ensanchamiento de uno de los lados. Estas antenas no tienen lóbulos secundarios significantes.

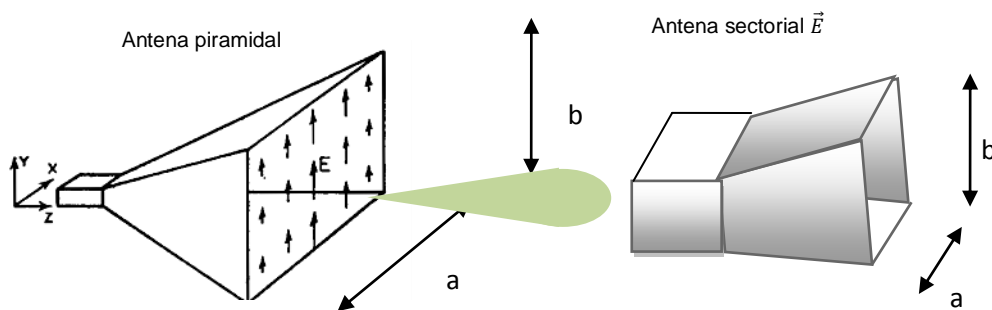


Figura 2.11 Antenas corneta.

La radiación de una antena corneta piramidal, ensanchamiento gradual de los dos lados, forma un haz en forma de pincel o puede servir como alimentador de los reflectores parabólicos. Son de mayor masa que las helicoidales.

Estas antenas se usan en frecuencias mayores a 4 [GHz]. La corneta circular cónica permite trabajar con distintas polarizaciones.

Por su ancho de haz se usan en satélites geoestacionarios y cobertura global, tienen ganancias típicas de entre 5 y 20 [dBi] y $\theta_{3\text{dB}} > 10^\circ$.

³ Ippolito, 2008.

2.4.4 Reflector parabólico

El principio del uso de este tipo de antenas es que las ondas electromagnéticas, que se comportan como una partícula, radiadas por el alimentador y son reflejadas por un elemento en forma de paraboloide de revolución para provocar que los rayos reflejados en la superficie formen una interferencia constructiva debido a que recorren la misma distancia por lo tanto se encuentran en fase y así se concentra la potencia hacia una región, como consecuencia se tiene alta directividad y ganancia además de un ancho de haz filiforme. Estas antenas son excitadas por cornetas generalmente.

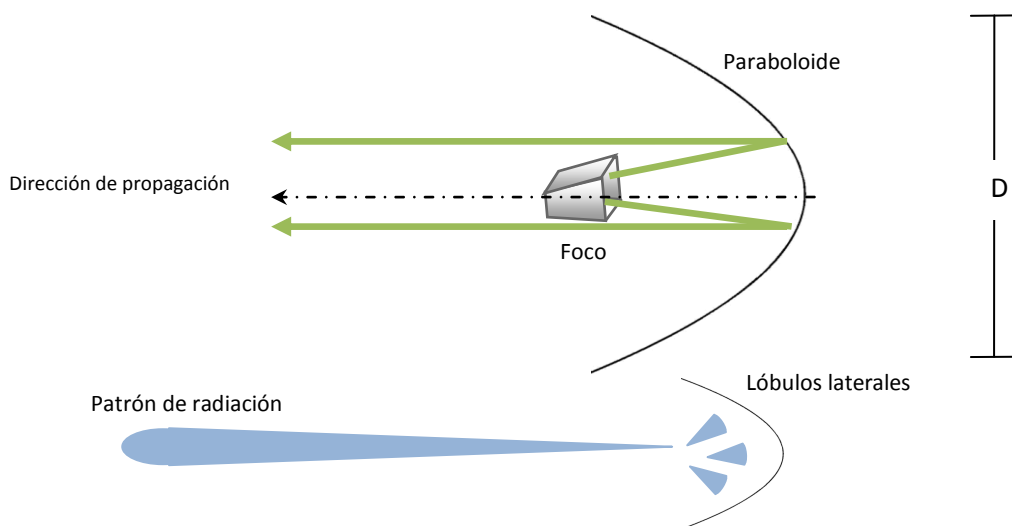


Figura 2.12 Antena parabólica.

Pueden tener ganancia de 15 a 65 [dBi], son del tipo más usado para satélites de comunicaciones que operan en las bandas C, Ku o Ka. Pueden tener anchos de haz de un grado o menos, el nivel del lóbulo secundario es de -22 a -25 [dB].

Este tipo de antenas tiene muchas ventajas, sin embargo, al trabajar en mayores frecuencias, la elaboración de la superficie reflectora es más propensa a provocar errores de fase. El bloqueo de la apertura incrementa los lóbulos laterales. Para el caso de un solo reflector con el alimentador en el centro (Figura 2.12) se tiene una estructura liviana, su diseño puede ser sencillo

Además existen modelos y variantes donde se modifica la posición del alimentador o implementan el uso de dos reflectores.

2.4.5 Alternativas

Con el fin de poder modificar el haz y/o cobertura, moldear el patrón de radiación o de tener múltiples haces de las antenas mientras están en órbita y tener menos masa en el satélite, se han diseñado antenas con las siguientes características.

- Múltiples alimentadores

De acuerdo a la posición de los alimentadores, se pueden generar múltiples haces. Los rayos provenientes de diferentes posiciones reflejarán en la superficie y en algunos puntos llegarán desfasados y en otros en fase provocando una diferencia del patrón de radiación. En otras palabras, se tiene una combinación de haces que dan lugar a un haz compuesto moldeado.

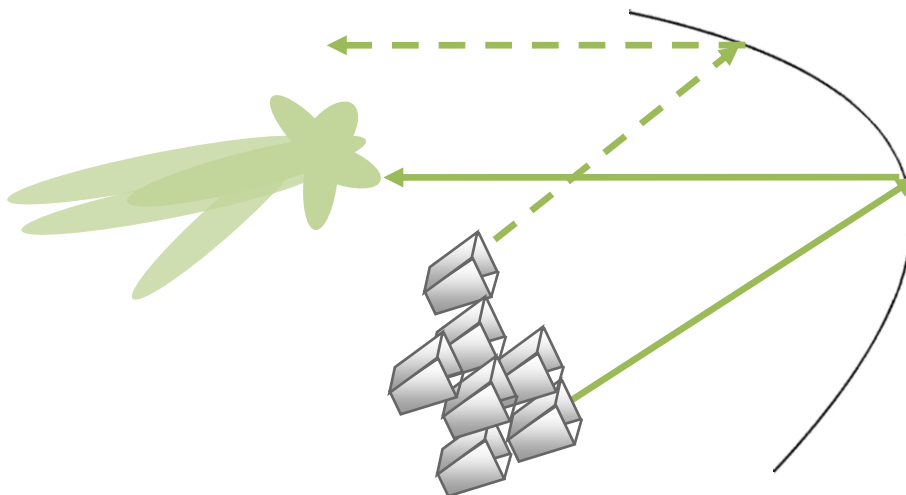


Figura 2.13 Múltiples alimentadores.

Debido a que se usan varios alimentadores, esto incrementa el peso, antenas de hasta 47 [kg], y por lo tanto el costo del sistema también aumenta. Sin embargo tener múltiples alimentadores ayuda a tener un haz de acuerdo a la demanda del servicio; sin desperdiciar potencia, sin provocar interferencia y haciendo más eficiente el sistema. El arreglo puede escanear, por medio de comandos, cambiando la dirección del haz en un margen de 10° , esto se logra mediante conmutar o cambiar la alimentación de los elementos radiadores. El diseño de estos arreglos se logra simulando en programas de computadora bajo un esquema de prueba y error.

La desventaja de la masa se puede mejorar usando dos reflectores, uno parabólico *off.set* y el otro plano. Los alimentadores radian hacia el reflector plano y este hacia el parabólico. Con esto se elimina el incremento de lóbulos laterales ya que no hay bloqueo de apertura.

- Antenas *Reflect Array*

En base al principio del funcionamiento de una antena con reflector, pero utilizando una superficie de diámetro D generalmente plana compuesta de N elementos conductores o metalizaciones fotograbadas sobre un sustrato dieléctrico que actúan como modificadores de fase, Figura 2.14.

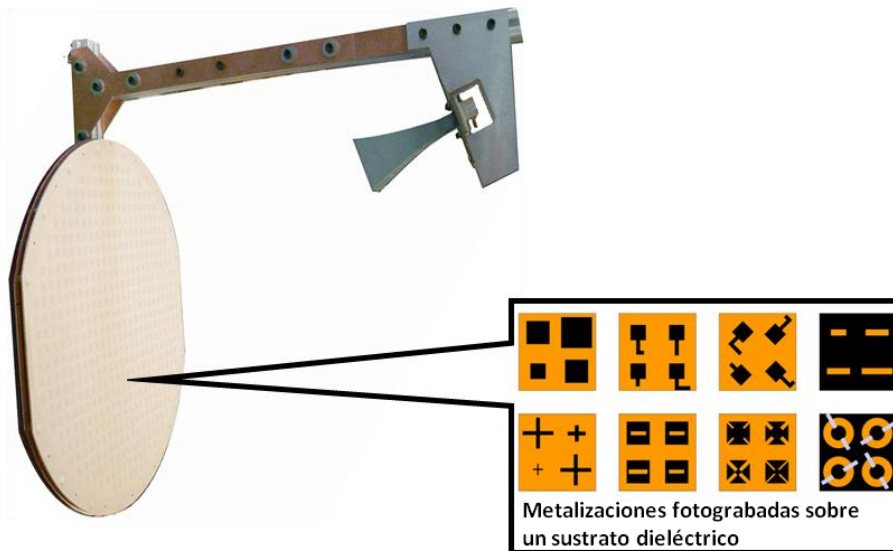


Figura 2.14 Reflect Array (Notas del Dr. Landeros).

Hay varios tipos de metalizaciones y su función de estos materiales es cambiar la fase del rayo incidente, y así la suma de los rayos reflejados darán forma a un haz pincel o con alguna forma determinada por la distribución de los conductores grabados.

Las ventajas de estas antenas son eficiencia de potencia y bajo costo ya que tiene bajas pérdidas, pueden ser desplegables (se pueden doblar o enrollar), tienen una masa liviana en el satélite, ahorrando espacio y costo a diferencia de las antenas de múltiples alimentadores. El ancho de banda se puede ver limitado.

- Reflector perfilado

Otra forma de modificar el haz de radiación sin necesidad de múltiples alimentadores, es modificando el reflector, es decir, en lugar de cambiar de posiciones los alimentadores, los rayos serán reflejados de forma sistemática por hendiduras en el reflector para dar componentes en desfase del campo, alterando el patrón de radiación.

El funcionamiento de estos reflectores, en principio, el mismo que el del reflector parabólico, la diferencia es que el reflector se moldea para que el desfase del campo sea constructivo en ciertos puntos.

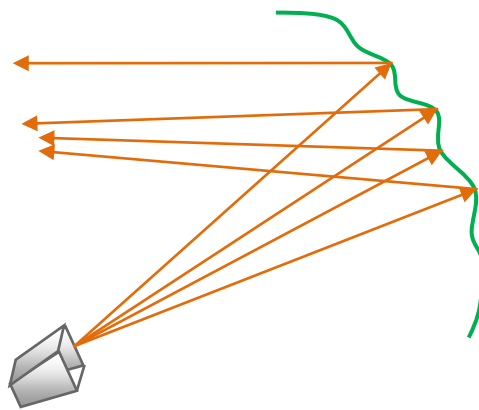


Figura 2.15 Reflector perfilado.

Este tipo de antenas tiene el beneficio de que puede tener las funciones de un arreglo de alimentadores, pero con un solo alimentador, como consecuencia se tiene menor masa para el satélite y como en el caso anterior se tiene un ahorro substancial. Por ejemplo con un arreglo se pueden tener 40 [kg] de carga útil, mientras que con una antena de reflector perfilado se tiene una masa de 6 [kg]. Su diseño se logra con modelos matemáticos iterativos hasta lograr el patrón deseado.

- Antenas con arreglo de fase

Están compuestas por varios alimentadores que son controlados por un sistema de distribución que modifica su fase y amplitud y formar uno o varios haces.

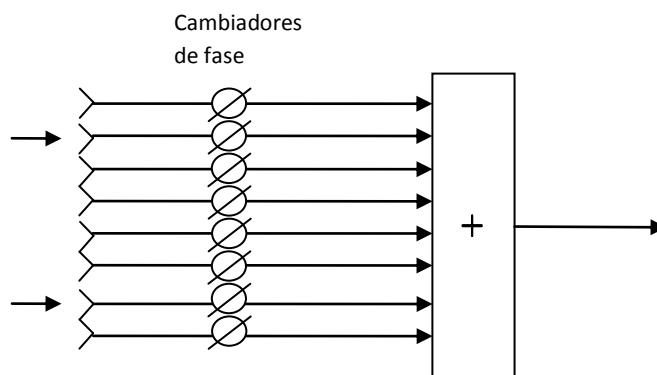


Figura 2.16 Esquema de antenas en arreglo de fase.

Este tipo de antenas tiene ventajas como alta eficiencia de apertura, alta fidelidad, haces independientes y dirigibles, sin embargo son de masa considerable, alto costo, tiene altas pérdidas en el sistema de distribución.

Estas alternativas ofrecen un ahorro sustancial en el costo del sistema, considerando las masas, sin embargo requieren un diseño más complejo, y su elección dependerá de tomar en consideración estos factores.

2.5 En la Estación Terrena

En la estación terrena es donde podemos cambiar los parámetros del enlace, se pueden determinar los diámetros de las antenas o elegir el modelo que más convenga además de incrementar potencia.

Hay diámetros mínimos en la regulación de las telecomunicaciones, esto para no recibir o transmitir interferencias. Ya que un diámetro menor al mínimo está expuesto a interferencia debido a que su haz es más ancho y la separación de los satélites puede ser de 2° .

2.5.1 Reflector parabólico con alimentación frontal

Esta antena está compuesta por un reflector parabólico cuyo alimentador está colocado en el foco geométrico de la parábola como se puede observar en las Figuras 2.17 y 2.18. Los rayos que no sean reflejados se les denominan desborde y pueden ser reflejados por el suelo, esto es un efecto indeseado ya que puede provocar interferencias.

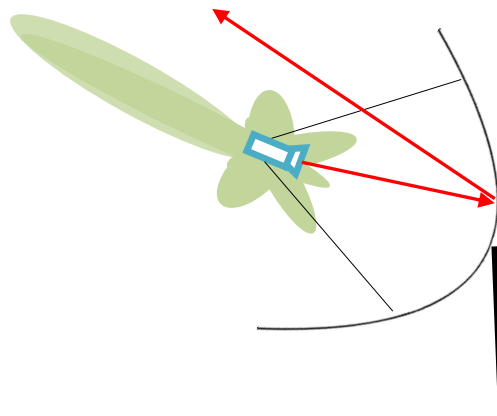


Figura 2.17 Antena con alimentación frontal transmitiendo.

Es el tipo de antena más usado por su diseño que implica poco gastos, sin embargo el ahorro implica algunas desventajas. El efecto sombra se conoce como la “obstrucción que provoca el alimentador a la radiación, desperdiciando potencia en una dirección.



Figura 2.18 Antena con alimentación frontal [Neri, 2003].

Un reflector más grande dará más directividad pero es más costoso. Este diseño es la base de las siguientes antenas, donde número de reflectores y colocación del foco son los parámetros que pueden ser modificados para lograr una radiación más eficiente.

2.5.2 Cassegrain

Es una antena compuesta por dos reflectores que aprovechan las propiedades geométricas del paraboloide y del hiperboloide haciendo coincidir los ejes de las dos formas geométricas.

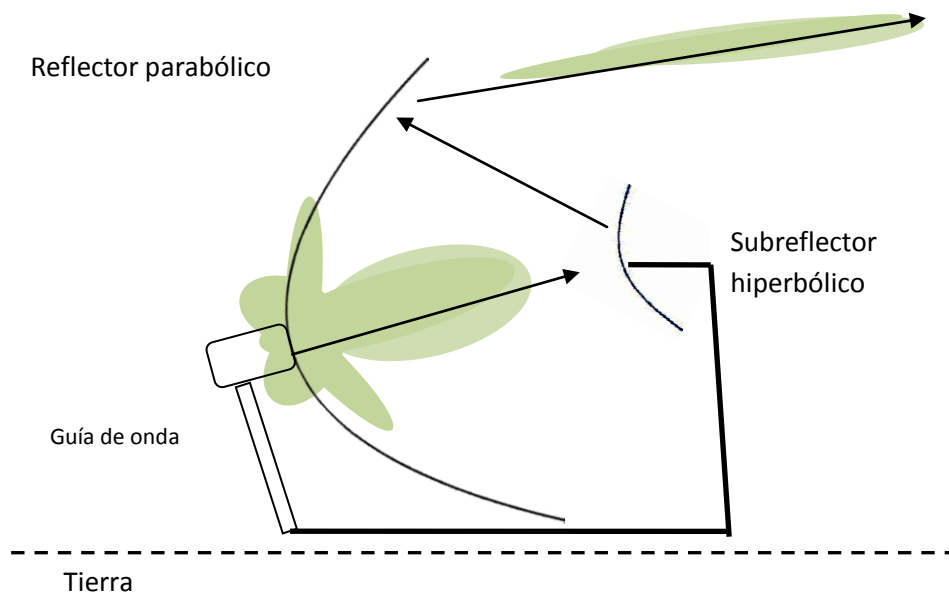


Figura 2.19 Antena Cassegrain transmitiendo

Para el caso de recepción el reflector en forma de paraboloides dirige la señal hacia el subreflector y este a la antena de apertura, concentrando la señal recibida en un haz con mayor ganancia; sucede un proceso en orden reverso para la transmisión.



Figura 2.20 Antena Cassegrain, tomada de [Neri, 2003].

Esta antena permite una fácil colocación de los circuitos de microondas detrás del alimentador sin incluir líneas de transmisión o guías de onda que introducen pérdidas. El alimentador al no apuntar al suelo no añade interferencia por reflexiones en la tierra. Es de un precio alto. Se utiliza para recibir y transmitir televisión, datos en grandes cantidades y en los centros de control del satélite.

2.5.3 Offset

Offset o fuera de foco, se refiere a que el reflector es una sección de paraboloides y la posición del elemento radiador está a un lado del punto focal o alimentación descentrada. Se usa cable coaxial para alimentar, son antenas de 1 a 4 metros de diámetro [Maral 2009].

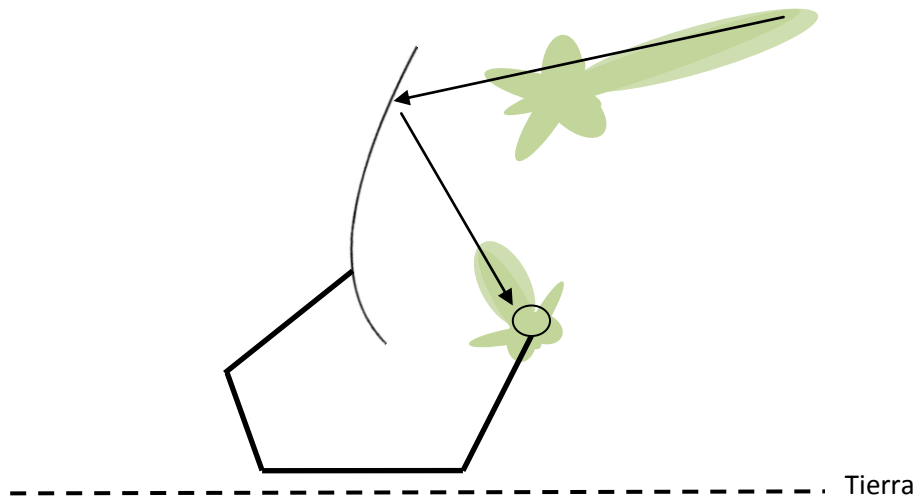


Figura 2.21 Antena Offset recibiendo.

Estas antenas evitan el efecto sombra, el cual se debe a que el alimentador se interpone entre el haz y el reflector. También se pueden colocar los circuitos de microondas detrás del alimentador. El efecto sombra afecta el coeficiente de eficiencia y a su vez la ganancia de la antena. Su principal uso es la recepción de señales de televisión. Es una antena barata y fácil de instalar.

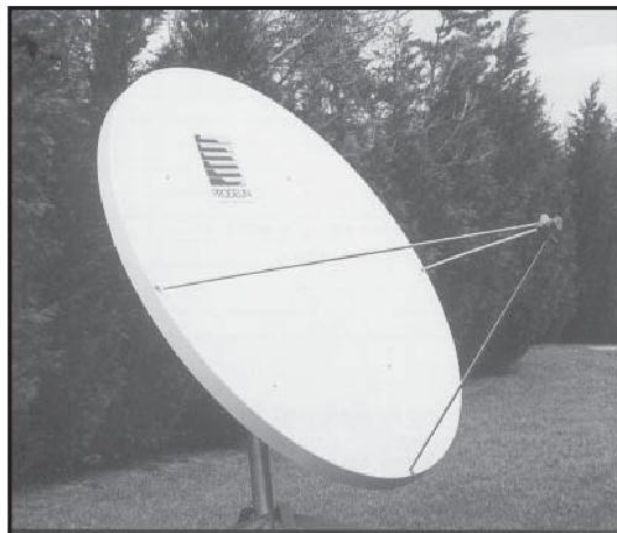


Figura 2.22 Antena Offset [Neri, 2003].

2.5.4 Gregoriana

Antena compuesta por dos reflectores de manera similar a la antena Cassegrain, Para el caso de transmisión el alimentador apunta hacia el reflector elíptico y este envía la radiación hacia el reflector parabólico, el cual genera un lóbulo principal delgado con alta ganancia.

El subreflector de esta antena es cóncavo, mientras que el subreflector de la antena Cassegrain es convexo.

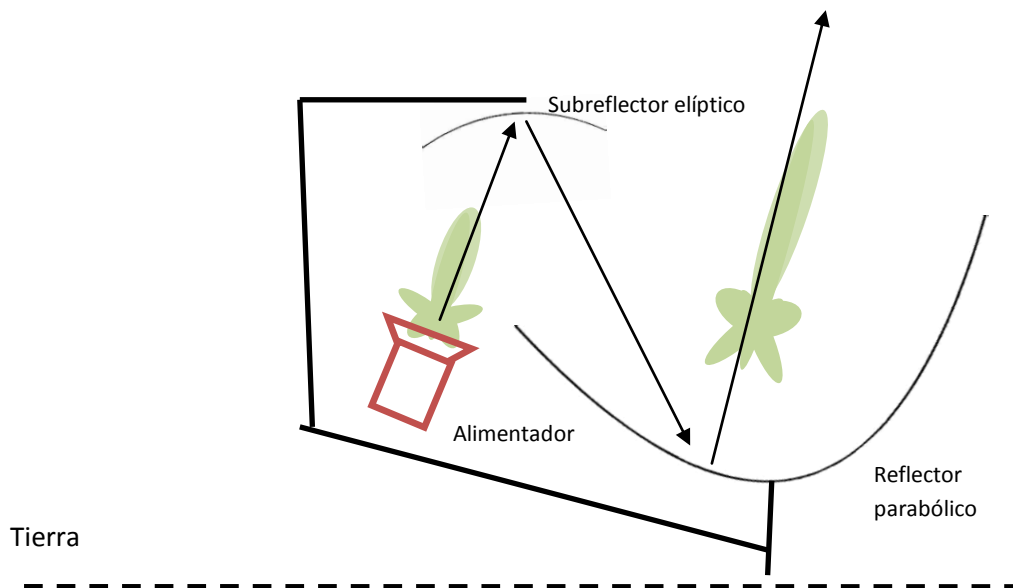


Figura 2.23 Antena Gregoriana transmitiendo.

Es un caso especial de antena off-set con reflector secundario ya que tiene alimentación descentrada. Usa un reflector secundario disminuye las pérdidas por usar línea de transmisión o guías de onda además que tienen mayor ganancia que una antena de un solo reflector.

2.5.5 Ángulos de apuntamiento de la antena

Debido a que las antenas de las estaciones terrenas son de alta directividad, es decir, con un ancho de haz pequeño tienen que ser apuntadas debidamente hacia el satélite, esto evitará tener pérdidas debido al desperdicio de potencia radiada hacia otros puntos. Los parámetros que determinan la posición de la antena en Tierra son dos ángulos que dependen de la posición del satélite y de la localización de la estación terrena en el planeta. Aunque existen otros sistemas de coordenadas y apuntamiento, estos son más comunes y se encuentran como parámetros en los programas de cómputo.

Las coordenadas geográficas de cualquier lugar de la Tierra se definen por altura, longitud y latitud. La altura es la diferencia del suelo en un lugar respecto el nivel del mar. Las longitudes son líneas imaginarias o meridianos que van de

polo a polo, la línea base es el meridiano de Greenwich, se miden con el ángulo L y varía de 0° a 180° Este u Oeste. Las latitudes son circunferencias imaginarias paralelas a la línea del Ecuador y se miden con el ángulo I que varía de 0° a 90° Norte o Sur.

Para el caso de satélites GEO, como se encuentran en el plano ecuatorial, se conocen sus posiciones por grados Este u Oeste siendo la referencia de 0° el meridiano de Greenwich. Se puede entender que los satélites GEO tienen una latitud de 0° , y al ser constante no es relevante en cálculos.

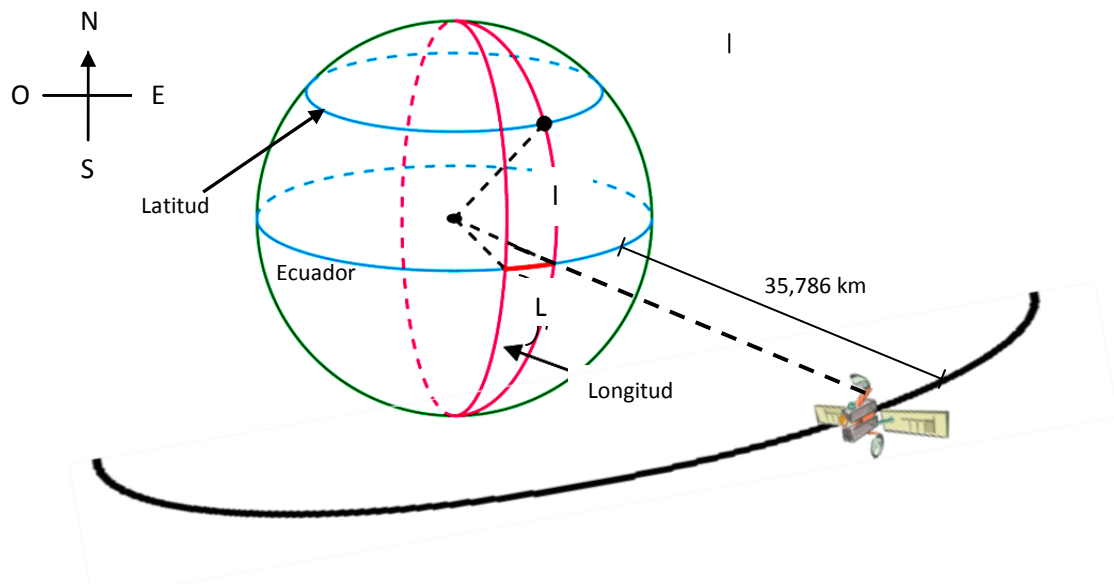


Figura 2.24 Latitud y longitud.

Una vez localizando la estación terrena, se obtienen los siguientes ángulos de apuntamiento para la antena; elevación y azimut. Estos ángulos tienen efectos para los cálculos de enlaces.

El ángulo de elevación, denominado como θ , es el que está formado entre el horizonte local y el eje de la línea de vista entre el satélite y la estación terrena.

El ángulo de azimut, denominado como ϕ , se mide en dirección horaria y se forma entre la línea que une a la estación con el Norte y la proyección horizontal de la línea de vista hacia el satélite.

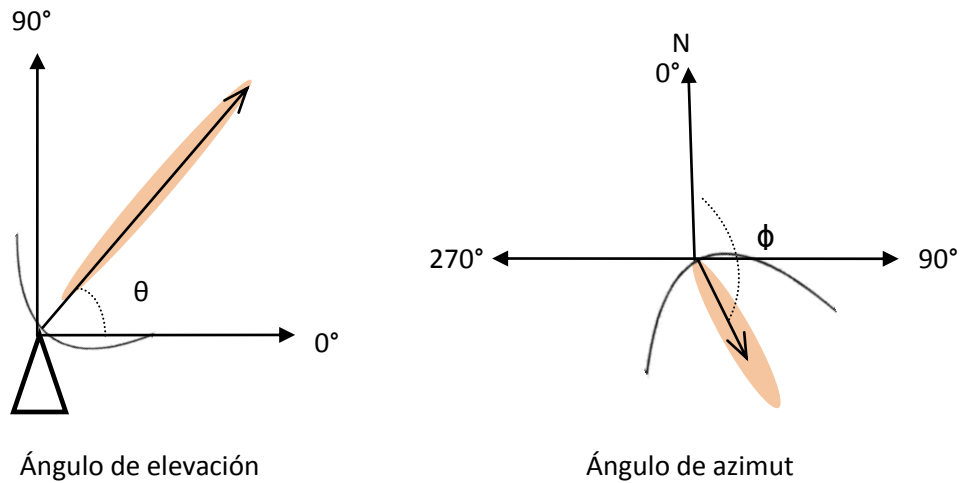


Figura 2.25 Ángulos de apuntamiento de la estación terrena.

Las siguientes fórmulas son resultado de un proceso de uso de relaciones trigonométricas que concluye en lo siguiente:

Para el ángulo de elevación.

$$\theta = \text{angtan} \left[\frac{(\cos l)(\cos \Delta L) - \frac{R_e}{h}}{\text{sen} [\text{angcos} (\cos l \cos \Delta L)]} \right]$$

Donde:

l: latitud de la estación terrena

ΔL : valor absoluto de la diferencia de longitudes de la estación terrena y el satélite

R_e : radio de la Tierra = 6,378 [km]

h: radio de la órbita = 42,164 [km] = 35,786[km] + 6,378[km]

Para el ángulo de azimut.

$$\phi' = \text{angtan} \left[\frac{\tan \Delta L}{\text{sen } l} \right]$$

Se debe considerar el hemisferio y en qué dirección en relación al satélite, ver Tabla 2.2.

Tabla 0.2 Ángulo de azimut

Ubicación	Valor de azimut Φ [°]
Hemisferio Norte Oeste del satélite	$\phi = 180^\circ - \phi'$
Hemisferio Norte Este del satélite	$\phi = 180^\circ + \phi'$
Hemisferio Sur Oeste del satélite	$\phi = \phi'$
Hemisferio Sur Este del satélite	$\phi = 360^\circ - \phi'$

El propósito de estos cálculos es que se tenga lo más aproximado al alineamiento ideal, es decir, que el eje de máxima ganancia de la antena del satélite coincida con el eje de máxima ganancia de la antena de la estación terrena. Se puede apreciar que estos son algoritmos sencillos de implementar en un lenguaje de programación. Para aplicaciones FSS el apuntamiento es un procedimiento sencillo, sin embargo para servicios MSS se debe tener un sistema de rastreo automático para mantener continua la comunicación con el satélite.