

3.1 Introducción.

Algunos sistemas de comunicaciones utilizan la propagación de ondas en el espacio libre, sin embargo también se puede transmitir información mediante la confinación de las ondas en cables o guías. En altas frecuencias las líneas de transmisión y los cables coaxiales presentan atenuaciones muy elevadas por lo que impiden que la transmisión de la información sea la adecuada, son imprácticos para aplicaciones en HF o de bajo consumo de potencia, especialmente en el caso de señales cuyas longitudes de onda son del orden de centímetros, esto es, microondas.

La transmisión de señales por guías de onda reduce la disipación de energía, es por ello que se utilizan en las frecuencias denominadas de microondas con el mismo propósito que las líneas de transmisión en frecuencias más bajas, ya que presentan poca atenuación para el manejo de señales de alta frecuencia.

El nombre de guías de onda se utiliza para designar los tubos de un material conductor de sección rectangular, circular o elíptica, en los cuales la dirección de la energía electromagnética debe ser principalmente conducida a lo largo de la guía y limitada en sus fronteras. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda al interior por reflexión en la superficie, donde el tubo puede estar vacío o relleno con un dieléctrico. El dieléctrico le da soporte mecánico al tubo (las paredes pueden ser delgadas), pero reduce la velocidad de propagación.

En las guías los campos eléctrico y magnético están confinados en el espacio que se encuentra en su interior, de este modo no hay pérdidas de potencia por radiación y las pérdidas en el dieléctrico son muy bajas debido a que suele ser aire. Este sistema evita que existan interferencias en el campo por otros objetos, al contrario de lo que ocurría en los sistemas de transmisión abiertos.

La guía de onda se puede visualizar de una manera simplificada en la Figura 3.1-1, suponiendo que está formada por dos láminas conductoras y que el transporte de la energía electromagnética se lleva a cabo mediante reflexiones continuas y no por medio de corrientes superficiales, como en el caso de las líneas de transmisión.

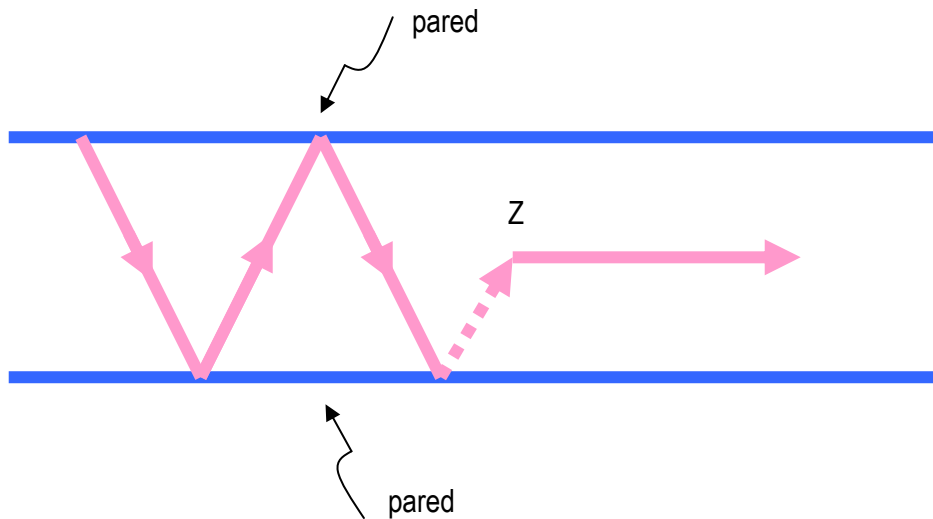


Figura 3.1-1. Transporte de la energía en la guía de onda.

La guía está diseñada fundamentalmente para operar un solo modo de propagación con el ancho de banda requerido, atenuando los demás modos de orden superior. En otras palabras, esto quiere decir que transmite óptimamente la frecuencia portadora, para la cual se ha seleccionado la guía con su respectivo ancho de banda de transmisión.

En ésta tesis sólo se profundizará en guías de onda rectangular y circular, pero existen varios tipos de guías de onda, entre los tipos de guías más importantes se encuentran:

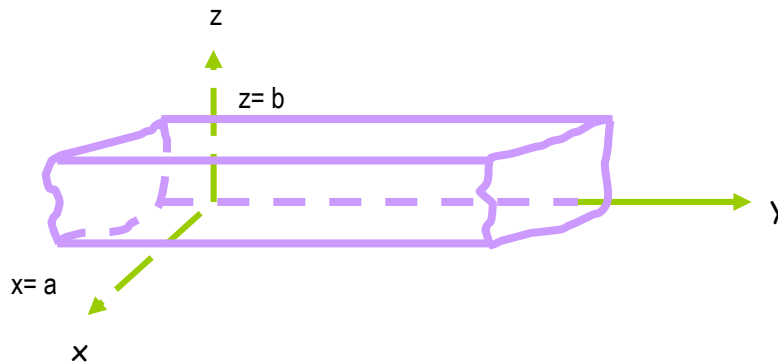
- Guía de onda rectangular (circular, elíptica): Son aquellas cuya sección transversal es rectangular (circular, elíptica).
- Guías de onda (línea de transmisión) de haz: Guía de onda (línea de transmisión), constituida por una sucesión de lentes o espejos, capaz de guiar una onda electromagnética.
- Guía de onda tabicada: formada por dos cilindros metálicos coaxiales unidos en toda su longitud por un tabique radial metálico.

- Guía de onda acanalada, guiada en V; guiada en H: Guía de onda rectangular que incluye resaltes conductores interiores a lo largo de una de cada una de las paredes de mayor dimensión.
- Guía de onda cargada periódicamente: Guía de onda en las que la propagación viene determinada por las variaciones regularmente espaciadas de las propiedades del medio, de las dimensiones del medio o de las superficies de contorno.
- Guía de onda dieléctrica: formada íntegramente por uno o varios materiales dieléctricos, sin ninguna pared conductora.

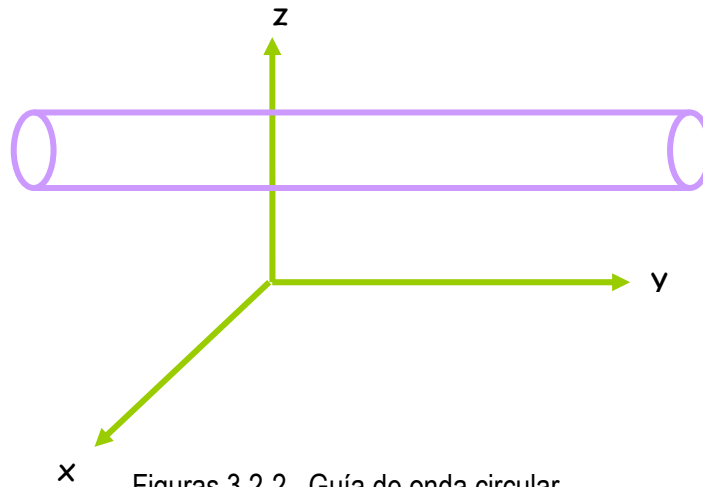
3.2 Características de la guía de onda.

Dado que la energía se transporta por ondas electromagnéticas, las características de las guías de ondas tales como impedancia, potencia y atenuación se expresan mediante campos eléctricos y magnéticos característicos de la guía en consideración.

Por lo general, las guías de onda poseen una sección transversal rectangular, pero pueden tenerla circular ó elíptica. En las Figuras 3.2-1 y 3.2-2, se muestran tanto una guía de onda rectangular como circular en una vista en sección transversal.



Figuras 3.2-1. Guía de onda rectangular.



Figuras 3.2-2. Guía de onda circular.

Las dimensiones de la sección transversal se escogen de tal manera que la onda electromagnética se propague en el interior de la guía de onda. Una guía no está diseñada para conducir corriente, sino que sirve como límite que confina a la onda en su interior, debido a que la guía de onda se encuentra compuesta de un material conductor se refleja la energía electromagnética que choca con la superficie. Si la pared de la guía de onda es un conductor muy delgado en sus paredes fluye poca corriente y como consecuencia se disipa poca potencia. La conducción de la energía, en la realidad no ocurre en las paredes, sino en el dieléctrico que se encuentra dentro de la guía.

El análisis de las guías de onda se da en términos de los campos magnético y eléctrico que se propagan en su interior y los cuales deben cumplir con las condiciones de frontera dadas por las paredes conductoras.

Ya que la guía de onda se encuentra compuesta por un material real, la onda electromagnética penetra en las paredes de ésta provocando que la onda ceda energía al material de la guía, es por ello que la onda pierde amplitud conforme a la distancia que avanza.

3.2.1 Impedancia Característica.

La impedancia característica de la guía de onda es similar a la de una línea de transmisión de cable paralelo y la cual se encuentra estrechamente relacionada con la impedancia del espacio libre.

Con relación a reflexiones de la señal, acoplamiento de la carga y ondas estacionarias la impedancia característica de una guía de onda tiene el mismo significado que la de una línea de transmisión, pero difiere en un aspecto puesto que la impedancia característica de una guía de onda es una función de la frecuencia.

El valor de la impedancia del espacio libre es de 120π , por lo tanto, es de esperarse que una guía de onda tenga un valor aproximado a éste, si la guía posee un dieléctrico de aire. A continuación se muestra en la siguiente fórmula la comprobación de esta suposición.

$$Z_o = \frac{120\pi}{\sqrt{1 - \left(\frac{fc}{f}\right)^2}} \quad (3.2.1-1)$$

donde Z_o es la impedancia característica, f es la frecuencia de operación y fc es la frecuencia de corte. En general se denomina Z_o como la impedancia característica de la guía, ya que como se observa a través de la ecuación, no varía su valor a lo largo de la guía; es decir, permanece constante una vez que se fijan las frecuencias de operación.

3.2.2 Clasificación de impedancias en una guía de onda.

Las impedancias en una guía de onda se pueden clasificar en:

- Impedancia *característica* se refiere a la relación de los fasores de tensión y de corriente en una línea de transmisión infinita de dos conductores.

- Impedancia *intrínseca* se refiere a la razón de campos fasoriales E y H para una onda plana (TEM) en un medio no limitado.
- Impedancia *de onda* se refiere a la relación de una componente del campo eléctrico a una del campo magnético en el mismo punto de la misma onda TEM, la impedancia de onda es la misma impedancia intrínseca, pero para modos de orden superior.

3.2.2.1 Impedancia de onda de los modos TE y TM.

Como ya habíamos mencionado las guías de onda se comportan como filtros pasa-altas, debido a que no pueden guiar ondas TEM definidas en la sección 3.3; es decir ondas electromagnéticas de baja frecuencia, sino nada más ondas TE o TM definidas en la sección 3.3. Y existirá un región de corte y una de paso para un modo determinado.

Debido a que a partir de la frecuencia de corte la relación entre las magnitudes tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación no permanecen constantes puesto que dependen de la frecuencia, es de suma importancia tener un conocimiento previo del comportamiento de la impedancia de onda en función de la frecuencia. Para los modos TE la impedancia de onda es la siguiente:

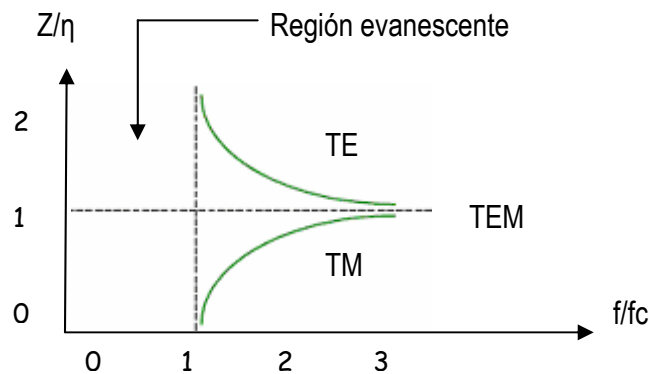
$$Z_{TEmn} = 4\pi\mu v_f \quad (3.2.2-1)$$

donde para la ecuación 3.2.2-1, v_f es la velocidad de fase, la cual se explicara en la sección 3.5 y $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ es la permeabilidad para una guía rellena de aire. Para los modos TM la impedancia de onda es:

$$Z_{TMmn} = 4\pi\mu v_f \left[1 - \left(\frac{f_c}{f_o} \right)^2 \right] \quad (3.2.2-2)$$

donde, f_c es la frecuencia de corte y f_o es la frecuencia de operación.

A continuación se presenta la gráfica 3.2.2-4 de las ecuaciones (3.2.2-1) y (3.2.2-2) para un modo cualquiera mn en función de la frecuencia, normalizada con relación a la frecuencia de corte correspondiente al igual que la impedancia de onda normalizada con relación a la impedancia intrínseca del medio.



Gráfica 3.2.2-4 de la impedancia normalizada para los modos de propagación TE y TM.

Como se puede ver en la gráfica se observa que tanto la impedancia Z_{TE} como Z_{TM} son puramente resistivas y que conforme aumenta la frecuencia, las curvas se acercan a un valor de η que sería la impedancia de una onda TEM en el mismo medio. En lo único que difiere es que Z_{TE} es mayor que la impedancia intrínseca del medio y Z_{TM} es menor.

Supongamos que la guía de onda trabaja a una frecuencia menor a la frecuencia de corte, entonces la impedancia de onda correspondiente para ambos modos TE y TM sería puramente reactiva y por lo tanto no podría haber flujo de potencia ni propagación, a ésta región se le conoce bajo el nombre de región evanescente.

3.2.3 Atenuación y Cargas resistivas en guías de onda.

La atenuación de las guías de onda es causada por los siguientes factores:

- Obstáculos o discontinuidades.
- Pérdidas inherentes a las corrientes que pasan por las paredes de la guía.
- Pérdidas en los dieléctricos, si es que los hay en el interior de la guía.

La medida de la atenuación Q_{dB} , de la guía en decibels queda determinada por el parámetro α , de tal manera que:

$$Q = e^{\alpha z} \quad (3.2.3-1)$$

donde z es la longitud de la guía y α el factor de atenuación, donde tenemos que alfa es igual a:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_c} \quad (3.2.3-2)$$

Por otro lado, de las ecuaciones (3.2.3-1) y (3.2.3-2) se tiene que para Q_{dB} :

$$Q_{dB} = 20 \log e^{\alpha z} = \frac{40\pi z}{\lambda_c} \log e, \quad (3.2.3-3)$$

la cual se reduce a:

$$Q_{dB} = \frac{54.5z}{\lambda_c} dB. \quad (3.2.3-4)$$

Las pérdidas por atenuación se reducen de manera considerable cuando se plantea la guía. Otro elemento importante en las guías son las cargas resistivas, éste tipo de cargas de material dieléctrico resulta ser un acoplamiento casi perfecto que suelen ubicarse al final de la guía para evitar reflexiones. La energía absorbida por estas cargas se disipa por medio de radiadores.

3.3 Modos de propagación.

Las ondas electromagnéticas viajan a través de las guías por medio de diversas configuraciones a las que llamamos modos de propagación. Un modo es la manera en la que la energía se puede propagar a lo largo de la guía de onda, cabe aclarar que todos estos modos deben satisfacer ciertas condiciones de frontera para que se puedan dar. En teoría existen un número infinito de modos de propagación y cada uno tiene su frecuencia de corte a partir de la cual existe. En otras palabras a medida que se va aumentando la frecuencia se irá incrementando el número de modos a partir de cada frecuencia de corte de cada modo respectivamente. Específicamente una guía soporta tres modos de propagación y los cuales son:

- *Modo transversal magnético* (TM_{mn}), también denominado modo E, en el cual las soluciones se derivan a través de la componente del campo eléctrico E_z , con la condición de que $H_z = 0$, esto es, la componente axial del campo magnético es cero, por lo cual se asegura la transmisión de la potencia en la dirección z que es la que se ha seleccionado como la dirección de propagación de la línea.
- *Modo transversal eléctrico* (TE_{mn}) o modo H. En este caso las soluciones se derivan de la componente del campo magnético H_z , con la condición $E_z = 0$.
- *Modo transversal eléctrico magnético* (TEM), en el cual $E_z = H_z = 0$. Este modo tiene la característica de que no se puede propagar en una guía, debido a la estructura misma de ésta, puesto que no puede transmitir ondas electromagnéticas de baja frecuencia, la transmisión tiene lugar a un valor determinado de frecuencia que depende de las dimensiones de la guía. Sin embargo, es la representación por medio de campos electromagnéticos de una línea de transmisión de baja pérdida.

La notación TM_{mn} y TE_{mn} implica guías de onda rectangulares y TM_{mn} , TE_{mn} circulares. Los subíndices m y n en rectangulares designan números enteros que denotan el número de medias longitudes de onda de intensidad de campo magnético para el TE y eléctrico para el TM, entre cada par de paredes. El subíndice m se mide a lo largo del eje x y el n sobre el eje y . Las siglas TM tanto TE significan que las líneas del campo magnético como el eléctrico son transversales en todos los puntos, lo que quiere decir que todas las líneas son perpendiculares a las paredes de la guía.

Dentro de una guía es posible la propagación de varios modos de ondas electromagnéticas. Cada modo tiene una frecuencia de corte asociada, de manera que si la frecuencia de la señal a transmitir es mayor que la frecuencia de corte, la energía electromagnética se transmitirá a través de la guía sin atenuación. En otro caso, si la frecuencia de la señal es menor que la de corte, la energía se atenuará exponencialmente con la distancia, teniendo un valor extremadamente bajo a una distancia muy corta (este caso se denomina onda evanescente).

El modo dominante en una guía determinada es aquél que tiene la frecuencia de corte más baja. Las dimensiones de la guía pueden escogerse de modo que para una señal dada, sólo el modo principal pueda transmitirse por ella.

Los modos de orden superior son todas aquellas formas en que la energía se propaga por arriba de la frecuencia de corte del modo dominante. Sin embargo no es recomendable operar en frecuencias donde éstos tipos de modos se presenten, puesto que no acoplan bien a la carga, ocasionando reflexiones y la aparición de ondas estacionarias.

3.4 Excitación y extracción de los modos TE y TM.

Siempre que se quiere excitar o detectar cualquier modo, el método empleado debe maximizar la transferencia de potencia entre la fuente y la guía, o entre esta última y el receptor. La manera más común de excitar o detectar la energía en una guía de onda es mediante la inserción de un cable coaxial que actúe en forma de lazo o punta de prueba como lo muestra la Figura 4.3-1.



Figura 4.3-1. Métodos de excitación y su circuitos equivalente con lazo: a) con lazo, b) con punta de prueba.

Como se puede ver el cable se puede conectar a la guía de tal manera que, su dirección esté en la dirección del campo eléctrico, como en la figura a, o su excitación sea normal al campo magnético, figura b. En cualquiera de los casos anteriores, la parte del coaxial que se introduce en la guía "h", forma una onda estacionaria de corriente. La mínima distancia h que la prueba debe introducir es de un cuarto de longitud de onda, ya que de otra manera, no se formaría completa la onda estacionaria. La punta de prueba es en realidad un cable que opera en circuito abierto y su circuito equivalente es un circuito tal que resuena a la frecuencia del modo de operación.

3.5 Velocidades de los modos TE y TM.

La velocidad de fase de una onda plana al propagarse en un medio sin pérdidas se define como:

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (3.5-1)$$

donde, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m y $\varepsilon = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$, son la permeabilidad y permitividad del espacio libre respectivamente.

Cabe aclarar que la velocidad de fase es la velocidad con la que una onda cambia de fase en dirección paralela a una superficie conductora. Se puede observar claramente, que β la constante de propagación, es una función lineal de ω , lo cual provoca que v sea una constante independiente de la frecuencia, pero existen casos, tales como la propagación en un dieléctrico cuyas pérdidas son muy altas o dentro de guías de onda en que β no es una función lineal de ω . En otras palabras, ondas de diferentes frecuencias se propagan con velocidades de fase distintas.

Toda señal que contiene información no es una onda senoidal pura a una sola frecuencia, sino la superposición de muchas componentes armónicas dentro de la banda de frecuencias de la señal; lo cual provoca distorsión en la forma de la señal recibida, puesto que estas componentes viajan a lo largo de la guía de onda con distintas velocidades de fase; es decir la onda se dispersa. Acordemente, una guía de onda es un medio de propagación dispersivo.

Geoméricamente para las placas paralelas, la longitud de onda en la guía λ_g es mayor que la longitud de onda característica λ_0 , como lo muestra la siguiente Figura 3.5-3.

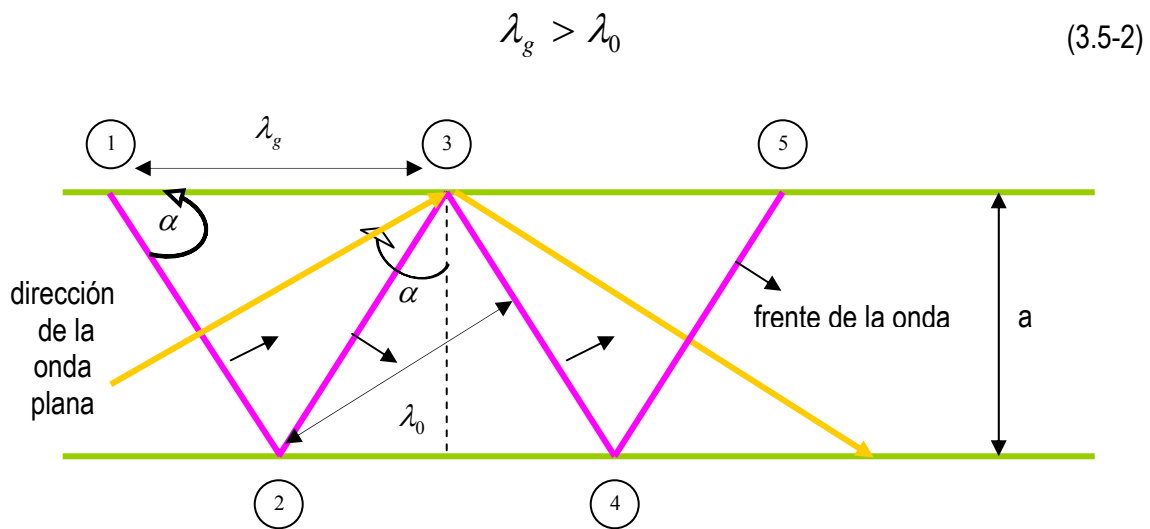


Figura 3.5.-3. Propagación de una onda entre dos placas paralelas.
En casos extremos sí:

$$\alpha = 0, \quad \lambda_g = \infty \quad (3.5-4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2}, \quad \lambda_g = \lambda_0 \quad (3.5-5)$$

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2}, \quad \lambda_g > \lambda_0 \quad (3.5-6)$$

y

$$v_{guía} > v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.5-7)$$

Como ambas longitudes de onda representa la distancia entre dos puntos consecutivos de la onda con la misma fase, en un caso medida a lo largo de la guía y en el otro a lo largo de la dirección de la onda plana, resulta que los puntos a lo largo de la guía se deben mover más rápido, pues tienen que recorrer una distancia mayor en el mismo tiempo que los puntos sobre la onda plana.

Así que, la velocidad a lo largo de la guía es mayor que la velocidad de fase de la onda plana, lo cual parece violar la Teoría de la Relatividad, la cual dice que ninguna forma de energía puede viajar a una velocidad mayor a la de la luz en el espacio libre, pero no es así, la realidad es que no hay ninguna contradicción ya que ésta velocidad mayor sólo es aparente, la información no viaja a esta velocidad. La potencia de la señal viaja en la misma dirección que la onda plana, a la misma velocidad de fase, que es inferior o igual a la velocidad de la luz según el tipo de material dieléctrico.

Por lo tanto, la velocidad de fase v_f , a lo largo de la guía, a diferencia de v que representa la velocidad de fase en la dirección de la onda plana es:

$$v_f = \frac{2\pi f_o}{\beta} \quad (3.5-8)$$

donde,

$$\beta = \frac{2\pi}{v} (f_o^2 - f_c^2)^{\frac{1}{2}}, \text{ es la constante de propagación.} \quad (3.5-9)$$

y la frecuencia de operación de la guía de onda:

$$f_o = \frac{(f_c)(\text{porcentaje de operación})}{100} + f_c \quad (3.5-10)$$

donde es claro que:

$$v_f > v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.5-11)$$

Sin embargo, aún queda otra velocidad por definir, que es la más importante de todas ya que es la velocidad a la que realmente la información viaja dentro de la guía de onda, a ésta velocidad se le conoce como velocidad de grupo y se representa como v_g . La velocidad de grupo es la velocidad a la que se mueve un “grupo” de frecuencias, es decir, es la velocidad a la que viajan las señales de información, también es la velocidad a la que la energía se propaga. Ésta velocidad es inversamente proporcional a la velocidad de fase y se calcula como:

$$v_g = \frac{v^2}{v_f} \quad (3.5-12)$$

La velocidad de grupo y de fase tienen el mismo valor en el espacio libre, pero si se toman medidas de las dos velocidades con la misma frecuencia en la guía se encontrará que, en general, las dos velocidades no son iguales, ya que la velocidad de fase es siempre mayor o igual a la velocidad de grupo.

3.6 Ecuaciones de onda para el campo eléctrico y magnético.

Como las características de transmisión en una guía de onda se realizan a través de sus campos electromagnéticos, es necesario analizar su comportamiento en el interior de la guía de onda, lo cual se efectúa a través de las ecuaciones de onda para el campo magnético o el eléctrico y las ecuaciones de Maxwell.

En un sistema de microondas, las expresiones analíticas para el campo eléctrico y magnético deben cumplir con lo siguiente:

- Las soluciones de las componentes de los campos deben satisfacer simultáneamente las ecuaciones de Maxwell.
- Las soluciones de los campos eléctricos, como las de los magnéticos deben satisfacer las condiciones de frontera en la superficie de la guía.

Estas condiciones van encaminadas a no tener radiación hacia fuera de la guía de onda y esto se cumple haciendo cero las componentes tangenciales del campo eléctrico para el caso del modo TM, o bien que las componentes normales del campo magnético sean cero para el caso del modo TE.

3.7 Guía de onda rectangular.

Las guías de onda rectangulares son una sección de tubo rectangular con lados a y b , la cual se encuentra orientada a lo largo del eje y . Las guías de onda más comunes son las guías con sección transversal rectangular, las cuales tienen varias aplicaciones como en sistemas de radiofrecuencia, microondas terrestres y satelitales. Son fáciles de fabricar y presentan varias ventajas puesto que poseen un gran ancho de banda y presentan pocas pérdidas.

Éste tipo de guías trabajan en base al fenómeno llamado ondulatorio. La caracterización de éste fenómeno en el interior de las guías viene de la mano de la adecuada combinación de las

famosas leyes de Maxwell así como de las condiciones de frontera. Los modos de propagación en una guía de onda rectangular son las soluciones a las ecuaciones de onda.

Una onda TEM no puede tener una componente tangencial del campo eléctrico en las paredes de la guía de onda, lo cual es un factor limitante de las ecuaciones de Maxwell, pues una onda no puede viajar directamente hacia abajo de una guía de onda sin reflejarse a los lados, puesto que el campo eléctrico tendría que existir junto a una pared conductiva.

La energía electromagnética se propaga en el espacio libre como ondas electromagnéticas transversales (TEM) con un campo eléctrico, un campo magnético y una dirección de propagación ortogonales entre sí, para propagar una onda TEM a través de una guía de onda de manera exitosa, la onda debe propagarse a lo largo de la guía en forma de zigzag con el campo eléctrico máximo en el centro de la guía y cero en las superficies de las paredes.

3.7.1 Guías rectangulares en modo transversal magnético, TM_{mn}

Una guía de onda rectangular se forma adicionando a los dos planos paralelos conductores horizontales otros dos planos paralelos conductores verticales, con el propósito de confinar la energía electromagnética y de servir como soporte a los dos planos paralelos conductores horizontales que son los que ayudan a la propagación.

Este modo se define con la característica de que el campo magnético es transversal, únicamente $H_z = 0$ en la dirección de la propagación; sin embargo si existe componente de campo eléctrico en la dirección de la transmisión de la señal E_z .

Los subíndices m y n en la nomenclatura TM_{mn} designan de manera análoga a los planos conductores paralelos a números enteros, que denotan el número de medias longitudes de onda de intensidad de campo para los modos TM entre las paredes de la guía, siendo m asignado a lo largo del eje x y n en el eje y .

En el modo TM_{mn} las líneas de campo magnético forman curvas cerradas, de tal manera que el campo magnético varía en la dirección “x” e “y”, por esto el modo TM_{m0} , $n = 0$, no puede existir en guías de onda rectangulares, porque esto implicaría que no se tiene variación en el eje “y” y por lo tanto el campo magnético no forma curvas cerradas. Para los modos TM_{mn} la frecuencia de corte se termina de la siguiente manera ecuación 3.7.1-1, donde mn son los subíndices de los modos de propagación y a como b son las dimensiones de la ventana de la guía de onda, por lo tanto:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.7.1-1)$$

y la longitud de onda de corte es:

$$\lambda_c = \frac{v}{f_c} \quad (3.7.1-2)$$

La velocidad de fase y de grupo para los modos TE_{mn} y TM_{mn} en guías de onda rectangulares, se obtienen de la misma forma que la desarrollada en la sección 3.5 para los modos TE y TM entre placas paralelas, pero como se pudo ver tanto la velocidad de grupo como la de fase se encuentran expresadas en términos de la constante de propagación, pero también puede expresarse en términos de frecuencia, como se muestra a continuación:

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_o}\right)^2}} \quad (3.7.1-3)$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_o}\right)^2}$$

Cuando dos modos tienen la misma frecuencia de corte se llaman modos degenerados. En una guía rectangular los correspondientes TE_{mn} y TM_{mn} son todos degenerados y en una guía cuadrada lo son los modos TE_{mn} , TE_{nm} , TM_{mn} y TM_{nm} .

Las guías rectangulares tienen ordinariamente una relación de dimensiones $a = 2b$. El modo con la frecuencia de corte más bajo en una guía determinada se conoce como modo dominante. En una guía rectangular con $a > b$ es el modo TE_{10} . Normalmente en una guía dada conviven simultáneamente un gran número de modos, sin embargo, lo que ocurre normalmente es que sólo el modo dominante se propaga y los modos superiores simplemente decaen muy rápido cerca de las fuentes o en las discontinuidades.

3.7.2 Guías rectangulares en modo transversal eléctrico, TE_{mn}

El modo TE_{mn} implica que la componente de campo eléctrico en la dirección de propagación z es cero; por lo tanto tenemos que $E_z = 0$. Los enteros m y n denotan como el número de medias longitudinales de onda de intensidad de campo entre cada pared de la guía.

El desarrollo del modo TE_{mn} para obtener tanto la configuración de sus campos como sus características, se sigue de manera similar a la del modo TM_{mn} y de hecho su velocidad de fase y de grupo son las mismas, así como muchos otros resultados.

El modo TE_{mn} presenta la frecuencia de operación más baja en guías de onda, lo que facilita la alimentación de la guía, debido a que existen modos de frecuencia más bajos esto permite una configuración más sencilla. Para la evaluación de los campos eléctricos y magnéticos en el modo TE_{mn} , con $E_z = 0$, se plantea la ecuación de onda para H_z , a partir de la cual se obtienen las componentes transversales.

La frecuencia de corte, como la velocidad de grupo y de fase son idénticas a los que teníamos en el caso de los modos TM_{mn} , por lo tanto tenemos que:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (3.7.2-1)$$

$$v_f = \frac{v}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_o}\right)^2}} \quad (3.7.2-2)$$

$$v_g = v \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_o}\right)^2} \quad (3.7.2-3)$$

Dado que la frecuencia de corte es función del modo y de las dimensiones de la guía, el tamaño físico de la guía de onda determinará los modos que se van a propagar.

3.8 Guías de onda circulares.

Las leyes que rigen la propagación de las ondas en las guías son independientes de la forma de la sección transversal de la guía y de sus dimensiones, debido a esto el concepto de campos eléctricos y magnéticos, así como la frecuencia de corte y en general todos los parámetros presentados en guías de onda rectangulares se cumplen también para guías de onda circulares exceptuando que el problema de los modos de transmisión para guías circulares se presentan en coordenadas cilíndricas Figura 3.8-1.

La guía de onda rectangular se utiliza en distancias cortas y debido a su rigidez no se puede doblar, lográndose que la señal se refleje en otra dirección. La guía circular es un ducto flexible de uno cuantos centímetros de diámetro, el cual puede doblarse sin excesivas reflexiones. A continuación se muestra el sistema de referencia de la guía.

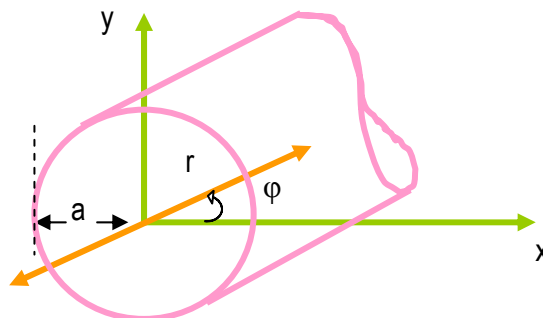


Figura 3.8-1. Sistema de referencia para la guía de onda circular.

Para evitar confusiones con la presentación de los modos de transmisión de una guía rectangular, los cuales han sido representados como TM_{mn} y TE_{mn} , en coordenadas cilíndricas se invierten los subíndices m y n ; es decir, TM_{nm} y TE_{nm} . En las guías circulares, el subíndice n denota el número de variaciones de la intensidad de campo en una longitud de onda, o sea, en 2π rad y el subíndice m representa el número de variaciones de la intensidad de campo en $\lambda/2$ en dirección radial.

Las guías de ondas circulares tienen aplicaciones específicas las cuales son muy importantes, se usan en radar y microondas terrestres, pues son útiles para propagar ondas polarizadas tanto horizontalmente como verticalmente en la misma guía. Además de la ventaja mencionada de la flexibilidad en su manejo, la guía de onda circular es de fabricación más sencilla que la rectangular y sus conexiones son más fáciles de realizar; sin embargo, éste tipo de guía presenta más área que la rectangular que opera en la misma frecuencia.

Para encontrar la frecuencia de corte así como la longitud de onda en una guía circular se utilizan las funciones de Bessel.

3.8.1 Modos de propagación en guías de ondas circulares.

Las guías de onda operan (propagan ondas) dentro de los límites de un rango de frecuencias determinado por sus dimensiones. Para que la propagación tenga lugar en la guía de onda, la configuración de campos eléctricos y magnéticos de las ondas debe satisfacer ciertas condiciones.

Hay muchas posibles configuraciones, llamadas modos. Los modos se designan según las direcciones que los campos eléctrico y magnético de la onda electromagnética asumen respecto de la dirección de propagación. Así tenemos modos "*transversal-electromagnéticos*" (TEM) donde tanto el campo eléctrico como el magnético son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, modos "*transversales eléctricos*" (TE) donde solo el campo eléctrico de la onda es perpendicular a la

dirección de propagación y modos "transversales magnéticos" (TM) donde sólo el campo magnético es perpendicular a la dirección de propagación.

El componente no transversal de campo eléctrico o magnético está asociado a fenómenos de pérdidas inherentes a la interacción de la onda con materiales no ideales. Pero pueden ocurrir varios modos TEM, TE, y TM diferentes en una guía de ondas circular, según las veces que el campo eléctrico varíe a lo largo de la circunferencia de la guía de ondas, o a lo largo de un radio de la misma.

La Figura 3.8.1-1, muestra algunas configuraciones de campo (modos) en guías de onda circulares y la correspondiente designación. Lo que se observa son configuraciones de ondas estacionarias dentro de la guía de onda, con las líneas de puntos representando las líneas de fuerza del campo magnético y las líneas continuas al campo eléctrico.

Se puede observar que las líneas de fuerza del campo magnético y del eléctrico son perpendiculares entre sí en cualquier punto de la guía de onda y que se cumplen las condiciones de contorno del campo eléctrico y magnético.

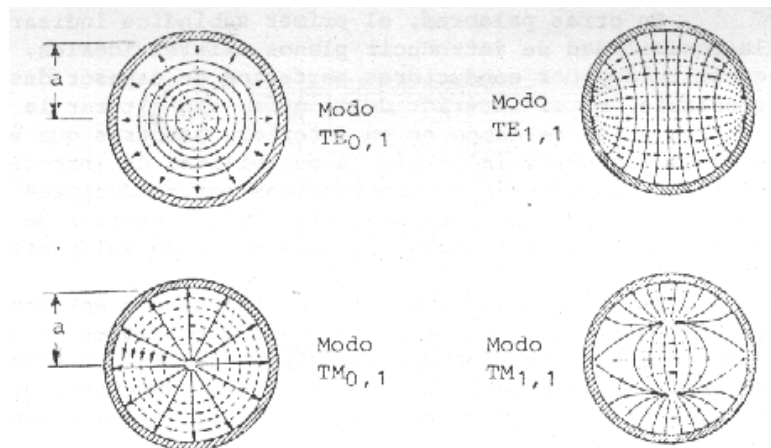


Figura 3.8.1-1. Algunos modos de propagación.

3.8.2 Frecuencia de corte.

La propagación puede ocurrir con muy baja pérdida si las longitudes de onda operativas son más cortas que un cierto valor crítico, llamado *cutoff* (límite o corte) de longitud de onda. Si la longitud de onda es más larga, o la correspondiente frecuencia de operación es más baja que el valor de corte, ocurrirán pérdidas extremadamente altas.

Para cada modo de propagación, hay una frecuencia o longitud de onda de corte diferente. En la guía de ondas circular, el límite está determinado por el diámetro interno de la guía de onda. El modo con la frecuencia de corte más baja que se propagará en la guía de onda circular es el modo "transversal eléctrico 11" (o como le llamaremos de aquí en más TE₁₁) y es por ello llamado el "modo dominante". En la tabla 3.8.2-1, se muestra la comparación de las frecuencias y longitudes de onda de corte en guías de onda circulares para distintos modos de propagación, en función del diámetro de la guía de onda.

Modo	Longitud de onda de corte	Frecuencia de corte
TE ₁₁ (dominante)	$\lambda_c = 1,71 \times D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,71 \times D}$
TM ₀₁	$\lambda_c = 1,31 \times D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,31 \times D}$
TE ₂₁	$\lambda_c = 1,03 \times D$	$f_c = \frac{c}{\lambda_c} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,03 \times D}$

T abla 3.8.2-1 de longitudes de onda y frecuencias de corte en función del diámetro.

Notas:

1. D es el diámetro de la guía de ondas.

2. El verdadero valor de λ_c para el modo TE_{11} es $1,7065 \times D$ pero lo he redondeado.

Es mejor elegir un diámetro de guía de onda tal que la frecuencia de operación deseada se encuentre entre la frecuencia de corte de los modos TE_{11} y TM_{01} , minimizando el diámetro. La frecuencia de operación debe quedar siempre debajo de la frecuencia de corte del modo TE_{21} . De esta forma, sólo el modo dominante se propaga con muy poca atenuación. Los otros modos directamente no pueden propagarse (o se propagan con una atenuación altísima). La ventaja de permitir sólo la propagación de un modo es que los elementos de excitación de la guía se calculan con mayor facilidad y operan en condiciones más simples.

Como se había mencionado anteriormente para encontrar la frecuencia de corte así como la longitud de onda en una guía circular se utilizan las funciones de Bessel. Las primeras cuatro funciones de Bessel de primera clase son mostradas en la Figura 3.8.2-2:

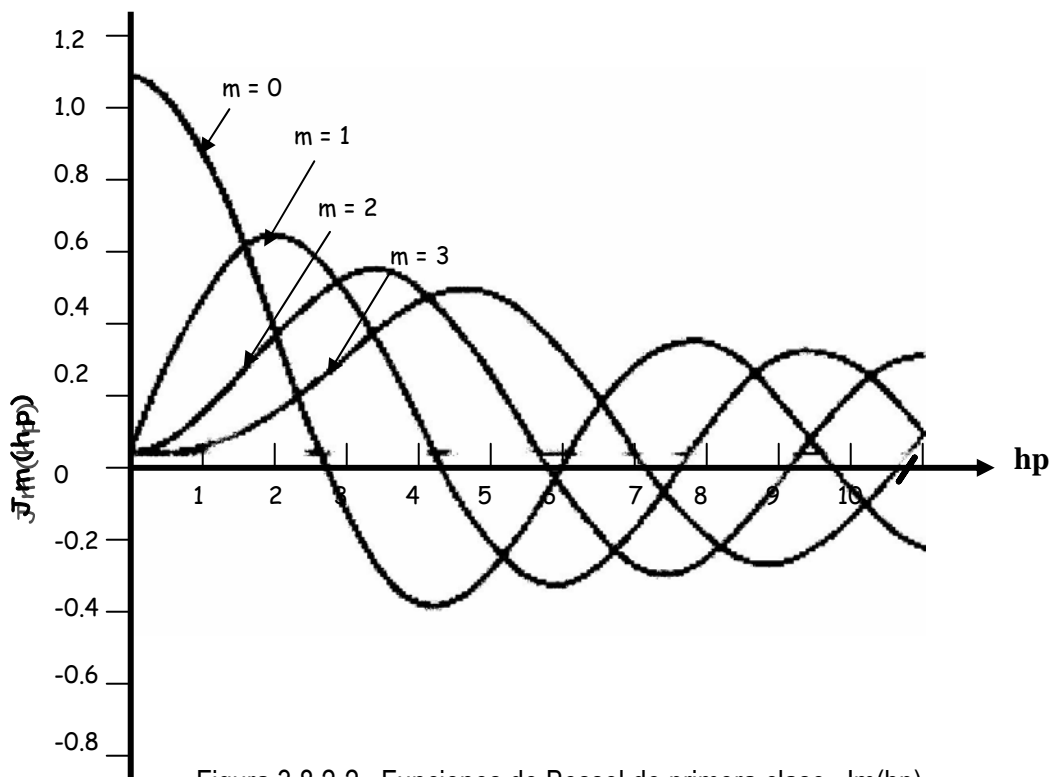


Figura 3.8.2-2. Funciones de Bessel de primera clase, $J_m(hp)$.

Como la naturaleza de estas funciones es oscilatoria, esto nos da la oportunidad de tabular los argumentos para los cuales éstas valgan cero. Un ejemplo de esto sería el siguiente, de acuerdo a la Figura 3.8.2-2 la función $J_0(h_p)$ vale cero cuando $h_p = 2.405, 5.520, 8.654$. Estas raíces ($n = 1, 2, 3, \dots$) originan la nomenclatura de los modos de propagación en la guía y nos sirven para calcular los modos TM. La tabla 3.8.2-3, nos muestra las raíces mencionadas.

$n \backslash m$	t_{mn}		
	0	1	2
1	2.405	3.832	5.136
2	5.520	7.016	8.417
3	8.654	10.173	11.620

Tabla 3.8.2-3 de raíces $(h_p)_{mn}$ para las cuales $J_m(h_p) = 0$.

Debido a que la derivada de cada función $J_m(h_p)$ vale cero en sus puntos máximos y mínimos. Así, podemos ver en el diagrama que $J'_m(h_p) = 0$ cuando $h_p = 1.841, 5.331, 8.536, \dots$ Y que cada una de estas raíces tiene asociado un modo mn determinado. Por ejemplo cuando $n = 1$, la raíz es 1.841, con $n = 2$ es 5.331 y así sucesivamente, con ayuda de estas raíces podemos obtener los modos TE, donde sus raíces se muestran en la tabla 3.8.2-4.

$n \backslash m$	s_{mn}		
	0	1	2
1	3.832	1.841	3.054
2	7.016	5.331	6.706
3	10.173	8.536	9.969

Tabla 3.8.2-4 de raíces $(h_p)_{mn}$ para las cuales $J'_m(h_p) = 0$.

Teniendo conocimiento de esto, la frecuencia de corte para una guía de onda circular y modo de propagación TE se obtiene de:

$$f_{cmn} = \frac{s_{mn}v}{2\pi a} \quad (3.8.2-5)$$

donde f_c es la frecuencia de corte y S_{mn} es la solución de una ecuación de la función de Bessel y por último a es el radio interno de la guía y v la velocidad de onda.

Para una guía circular la longitud de onda de corte se obtiene:

$$\lambda_0 = \frac{2\pi a}{s_{mn}} \quad (3.8.2-6)$$

El modo de propagación en éste tipo de guías, con la longitud de onda de corte más grande es la que tiene el valor de S_{mn} más pequeño, por lo tanto, revisado la tabla 3.8.2-4, en esta guía el modo dominante es el modo TE_{11} .

Algo importante con respecto al modo dominante de una guía rectangular y de una circular es que con el primer modo de propagación TE de la guía de onda rectangular con el de la onda circular, se logra hallar que los patrones de distribución de los campos de estos modos son similares, sobre todo en el centro de ambas guías, lo cual hace posible que el modo dominante de una guía rectangular pueda generar el modo dominante dentro de una guía circular, y viceversa. Esto se logra con una unión de transición denominada transformador de modos, donde podemos ver su aplicación en los atenuadores de rotación.

Ahora si deseamos propagar un modo TM la frecuencia de corte se obtiene de:

$$f_{cmn} = \frac{t_{mn}v}{2\pi a} \quad (3.8.2-7)$$

donde t_{mn} es la solución de una ecuación de Bessel.

Ahora ya estamos listos para poder diseñar una guía de onda, puesto que ya sabemos los parámetros necesarios; tales como: frecuencia de corte, velocidad de fase y de grupo, impedancia características, modos de propagación, entre otros; para un diseño exitoso, pero aún así necesitamos realizar el software para facilitar el cálculo de los parámetros para después implementarla. En el siguiente capítulo se explicará a detalle la realización del programa de “Diseño de una guía de onda circular”, así como el de la guía rectangular, al igual que los pasos que se siguieron para poder programar en Visual Basic 6.0 e introducir los datos en Mathcad.