

Capítulo 2: Teoría básica de antenas

Las antenas constituyen el medio más práctico y en muchas ocasiones único para poder transmitir información a largas distancias. Con el creciente desarrollo y evolución de las comunicaciones inalámbricas que generan circuitos prácticos sin necesidad de cables, las antenas ocupan un lugar primordial para lograr una transmisión eficiente de la información.

2.1 Antenas

A grandes rasgos una antena se puede definir como “un dispositivo, metálico generalmente, utilizado para radiar o recibir ondas electromagnéticas” [5]. Una antena por lo tanto puede ser considerada como un transductor capaz de convertir ondas electromagnéticas en ondas eléctricas y viceversa. El circuito equivalente para una antena se muestra en la figura 2.1:

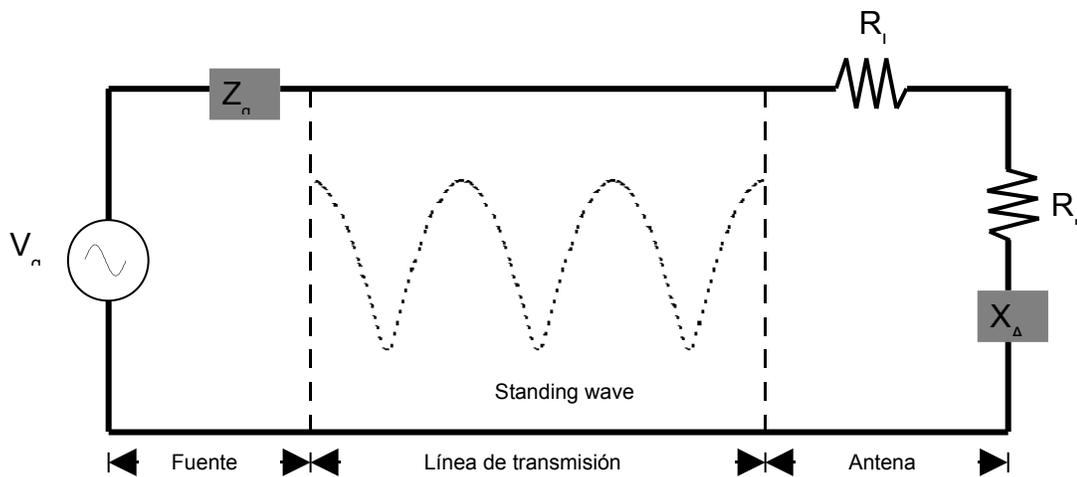


Figura 2. 1 Circuito equivalente de una antena [5]

La fuente es representada por un generador ideal, la línea es representada por una impedancia característica Z_c , la antena es representada por una impedancia Z_A compuesta de 3 impedancias en serie: R_L , R_r y X_A . La impedancia de carga R_L representa las pérdidas por conductor y por dieléctrico. R_r es la llamada “resistencia de radiación” y es una resistencia ficticia utilizada para justificar la potencia que es radiada al espacio. La reactancia X_A es utilizada para representar la parte imaginaria de la radiación (potencia reactiva) [5]. En condiciones ideales se espera que la potencia generada por la fuente sea transmitida en su totalidad a la resistencia de radiación, sin embargo esto no se logra en la práctica debido a que existen pérdidas intrínsecas por conducción y por dieléctrico así como cuestiones de acoplamiento de impedancias por lo que no toda la potencia es transmitida y se generan dos tipos de ondas viajando en direcciones opuestas: ondas transmitidas de la fuente hacia la carga y ondas reflejadas en dirección contraria. Estas ondas en direcciones opuestas generan interferencia constructiva o destructiva que deriva en las llamadas *standing waves* (se puede apreciar una típica forma de una *standing wave* en la figura 2.1) [5]. El circuito anterior se aplica tanto para la transmisión como recepción de las antenas. Para mayor información sobre conceptos de antenas consultar [5].

2.2 Tipos de antenas

Existen diversos tipos de antenas con características específicas y particulares para las aplicaciones en las cuales se requieran. Algunos tipos de antenas son:

Antenas de alambre. Es el tipo más común de antenas y pueden encontrarse prácticamente en todos lados, ya sea en edificios, en automóviles, en aviones, naves espaciales, etc. Existen varios tipos de antenas de alambre como los monopolos, dipolos, las antenas de lazo y antenas de hélice [5].

Antenas de apertura. Tienen gran aplicación en aviones y naves espaciales debido a que pueden ser montadas fácilmente en la estructura del avión o nave Su estructura consta de una guía de onda con terminación en formas piramidales, cilíndricas, corneta, etc [5].

Antenas de apertura planas. Debido a las necesidades actuales de buscar tamaños reducidos se ha buscado generar diseños de antenas de apertura con dimensiones cada vez más pequeñas, que puedan además de lograr ser más prácticas, disminuir los costos de fabricación. Un ejemplo de éste tipo de antenas son las llamadas Vivaldi, las cuales tienen la peculiaridad de utilizar dos formas de cobre cada una en un lado de un substrato dieléctrico. Una tecnología muy reciente que ha cobrado auge en los últimos años es la llamada *Substrate Integrated Waveguide* (explicada a detalle en el capítulo 4) que consiste en utilizar una guía de onda de tamaño reducido integrada en un substrato dieléctrico, la cual presenta una gran practicidad para construir circuitos de dimensiones pequeñas [6] En la figura 2.2 se muestran ejemplos de este tipo de antenas.

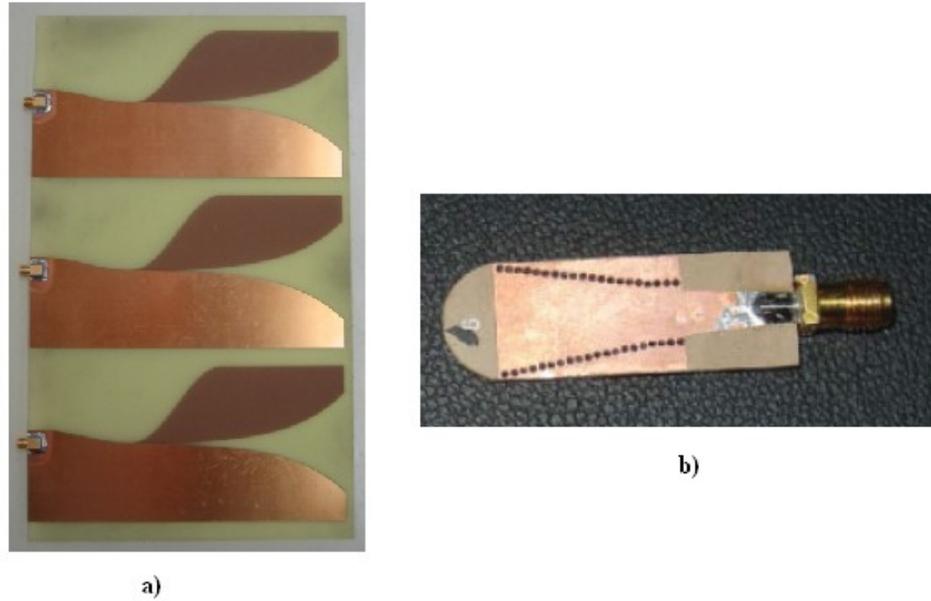


Figura 2. 2 Dos antenas de apertura planas: a) Antena Vivaldi y b) Antena de trompeta utilizando SIW [7] y [8].

Antenas de *microstrip*. Las antenas de *microstrip* desde su aparición han tenido un gran desarrollo principalmente debido a sus tamaños reducidos (conforme las frecuencias de operación han ido incrementando, los tamaños para estas antenas disminuyen considerablemente). Las antenas de *microstrip* constan de un parche conductor sobre un substrato dieléctrico aterrizado [5]. Las antenas de *microstrip* se describen a detalle en el capítulo 3. En la figura 2.3 se muestra una antena de *microstrip* característica.

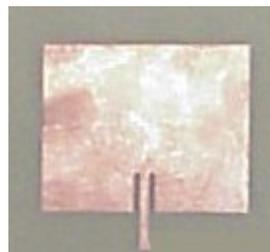


Figura 2. 3 Antena de *microstrip* rectangular con alimentación directa [9].

Antenas de reflexión. Este tipo de antenas consta de una estructura de antena de cualquier tipo mencionada anteriormente incluyendo un reflector para mejorar sus propiedades. Entre los tipos más comunes de estas antenas están la parabólica, de plano de esquina, cilíndrico y esférico [5].

Antenas de lentes. . Dependiendo de la forma de las lentes y su composición se pueden convertir varias formas de energía divergente en ondas planas. Se pueden usar en prácticamente las mismas aplicaciones que las antenas de reflector parabólico sobre todo a altas frecuencias ya que conforme la frecuencia es pequeña, los tamaños y pesos de las lentes pueden llegar a ser demasiado altos [5].

Información sobre propagación de ondas electromagnéticas puede ser encontrada en el apéndice.

2.3 Parámetros de las antenas

Cada antena tiene propiedades distintas que sirven para poder caracterizarla, éstas características son los llamados parámetros de las antenas. Estos parámetros se encuentran relacionados con la radiación que de la antena es emitida. En este capítulo se presentan y describen los parámetros primordiales para juzgar el comportamiento de una antena.

Patrón de radiación

El patrón de radiación de una antena se puede definir como la representación espacial de la energía que es radiada por una antena. Esta representación generalmente se hace en el campo lejano (más adelante se hablará de los campos de radiación de una

antena) y puede llevarse a cabo en dos o tres dimensiones. Cuando se habla de un patrón de radiación en tres dimensiones existen dos planos sobre los cuales se grafican los puntos correspondientes a la energía radiada de la antenna: el plano Azimutal y el plano de elevación. El plano Azimutal es aquel que está en función del ángulo ϕ ($f(\phi)$) y puede verse como un plano horizontal, mientras que el plano de elevación es aquel que está en función del ángulo θ ($g(\theta)$) y puede verse como un ángulo vertical [5] (figura 2.4). En dicha figura se pueden apreciar también las dimensiones para considerar el patrón de radiación de una antenna (coordenadas esféricas): el radio donde se mide la radiación (r), el diferencial del plano azimutal ($d\phi$), el diferencial del plano de elevación ($d\theta$), el diferencial de área esférica (dA) así como los vectores unitarios de las coordenadas esféricas (\hat{a}_r , \hat{a}_ϕ y \hat{a}_θ).

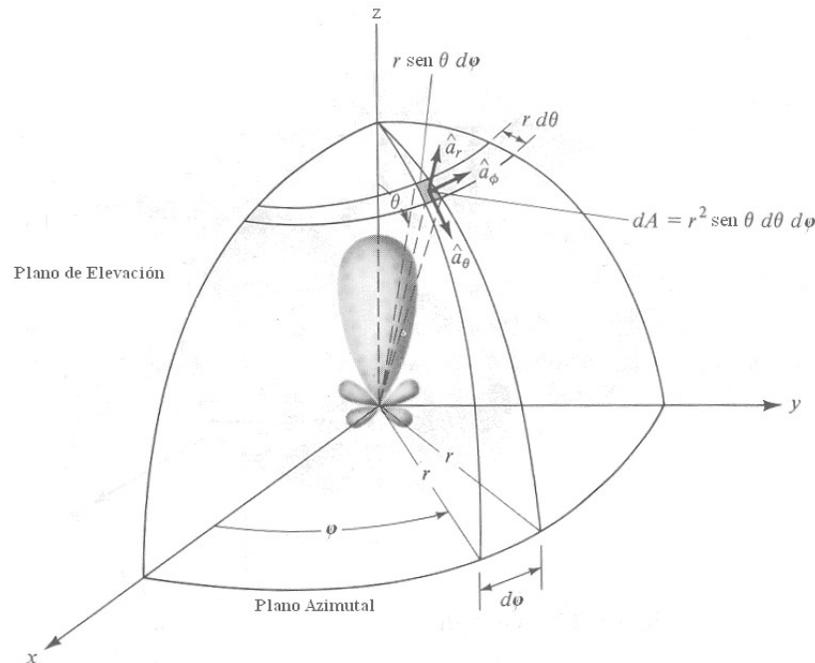


Figura 2. 4 Patrón de radiación tridimensional [5].

En el estudio de los patrones de radiación de las antenas se presentan 3 casos, los cuales se definen a continuación: patrón isotrópico (aquel en el cual una antena hipotéticamente sin pérdidas irradia igual energía hacia todas las direcciones), patrón direccional (la energía puede depender de la dirección angular en el plano Azimutal ($f(\varphi)$), en el plano de elevación ($g(\theta)$) o ambos) y patrón omnidireccional (presenta un patrón no direccional en un plano y un patrón direccional en otro) [5]. En la figura 2.5 se muestran los 3 tipos de patrones mencionados.

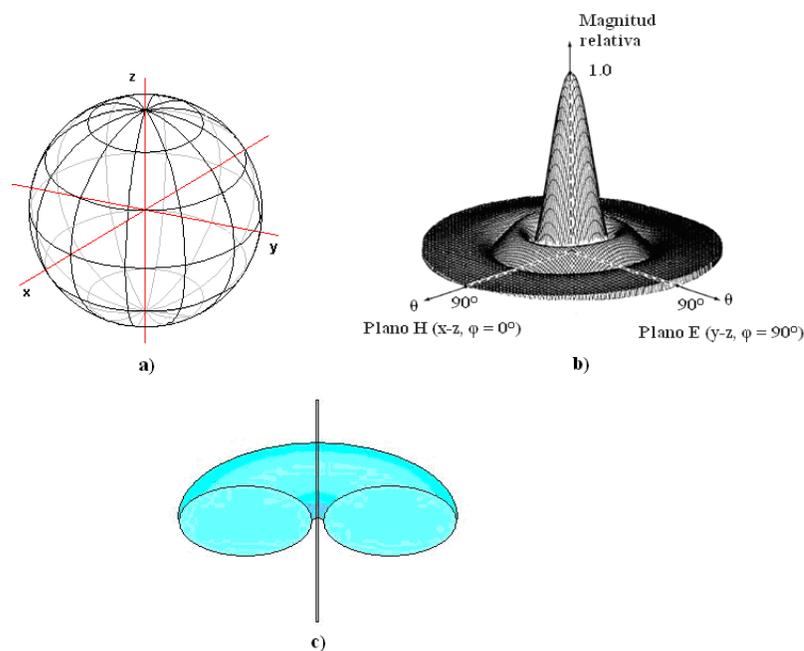


Figura 2. 5 Patrones de radiación: a) Patrón isotrópico, b) patrón direccional y c) patrón omnidireccional [5] y [10]

Lóbulos de radiación

En el patrón de radiación de cualquier antena se pueden apreciar los llamados lóbulos de radiación, los cuales se definen como “el área del patrón de radiación rodeada por regiones de relativamente baja intensidad de radiación” [5]. Los lóbulos de radiación de las antenas se pueden clasificar en dos tipos: lóbulos principales (*main lobes*) y lóbulos

secundarios (*minor lobes*). A su vez los lóbulos secundarios pueden subdividirse en lóbulos laterales (*side lobes*) y lóbulos posteriores (*back lobes*). En la figura 2.6 se muestra un patrón de radiación direccional conteniendo su lóbulo principal, lóbulos secundarios, lóbulos laterales y lóbulo posterior.

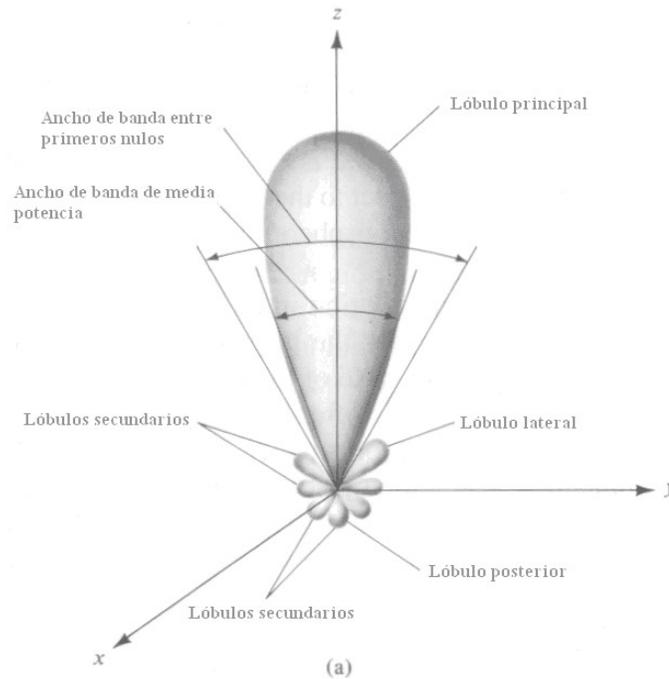


Figura 2. 6 Lóbulos de un patrón de radiación direccional [5].

Regiones de campo

En una antena la potencia radiada está compuesta por una parte real y una parte imaginaria. La parte real es la llamada potencia radiativa, la cual puede ser transferida a un medio y por lo tanto es la que se puede utilizar. La potencia reactiva es la parte imaginaria de la potencia radiada y ésta no puede ser transferida a los medios, simplemente permanece oscilando entre los campos. La potencia radiativa y reactiva se presentan en diferentes proporciones dependiendo de la distancia donde se midan a partir de la antena, es por ello que se han definido las llamadas regiones de campo [10].

El espacio que rodea a una antena se puede dividir en 3 regiones de forma esférica: la región de campo cercano reactivo, región de campo cercano radiante también conocida como región de *Fresnel* y la región del campo lejano también conocida como *Fraunhofer* [5]. La región del campo cercano reactivo es aquella inmediatamente cercana a la antena donde la potencia radiada está constituida en su mayoría por potencia reactiva. Para la mayoría de las antenas ésta región se ha definido en el rango $R < 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$. R es el radio alrededor de la antena, λ es la longitud de onda y D es la dimensión mayor de la antena. Para dipolos muy cortos o antenas similares esta región queda delimitada por

$R < \frac{\lambda}{2\pi}$ [5]. En esta región la potencia reactiva es aproximadamente igual a la potencia

radiativa.. La región de campo cercano radiante se encuentra limitada en los rangos

$R \geq 0.62\sqrt{D^3/\lambda}$ y $R < 2D^2/\lambda$ [5]. Para antenas cortas se puede considerar a esta

región para el rango $R \geq \lambda/2\pi$ [5], [7]. La región de campo lejano o de *Fraunhofer* es

aquella que en la que la potencia radiada está constituida en su mayoría por potencia

radiativa.. La región de campo lejano se extiende en el rango $R > 2D^2/\lambda$ [5]. Para

antenas de cortas dimensiones el rango para este campo se puede considerar como

$R \gg \lambda/2\pi$ [5], [7]. La figura 2.7 se muestran las 3 regiones en que se divide el espacio

que rodea a una antena.

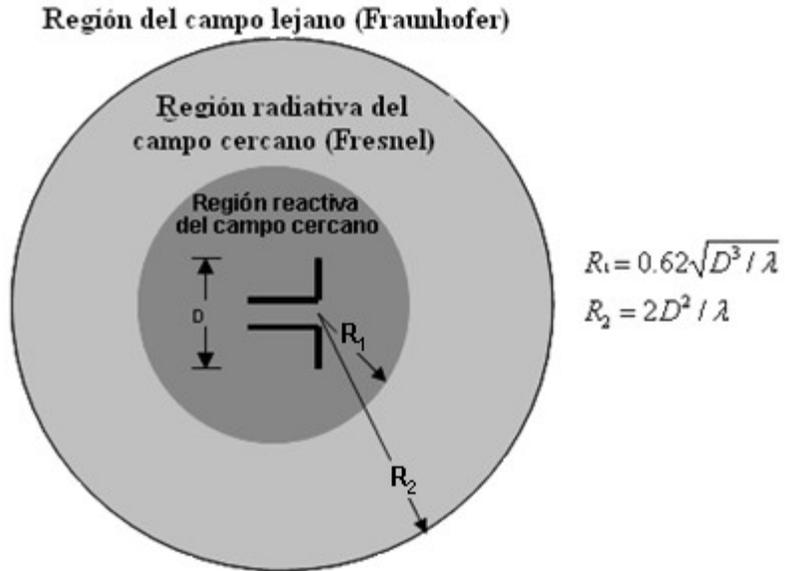


Figura 2. 7 Regiones de campo [5].

Densidad de potencia radiada

La potencia de una onda electromagnética cualquiera puede definirse mediante el vector de Poynting, el cual apunta hacia la dirección de propagación de la onda. La potencia contenida en un área se debe realizar la integral cerrada del vector de Poynting [5], como se muestra a continuación:

$$P = \oint_S \mathbf{W} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathbf{W} \cdot \hat{n} da \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

P es la potencia total instantánea en W.

W es el vector de Poynting puntual.

\hat{n} es vector unitario normal a la superficie.
n

da es el área infinitesimal de la superficie cerrada en m².

La densidad de potencia promedio queda expresada como:

$$\mathbf{W}_{av}(x, y, z) = \mathbf{W}(x, y, z; t)_{av} = \frac{1}{2} \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

La potencia radiada promedio de una antena entonces puede encontrarse integrando en el área deseada, por lo tanto se tiene:

$$P_{rad} = P_{av} = \oint_S \mathbf{W}_{rad} \cdot d\mathbf{s} = \oint_S \mathbf{W}_{zy} \cdot \hat{n} da = \frac{1}{2} \oint_S \text{Re}[\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*] \cdot d\mathbf{s} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Intensidad de radiación

La intensidad de radiación se define como “la potencia radiada por una antena por unidad de ángulo sólido” [5]. La intensidad de potencia se mide en el campo lejano donde la potencia que se radia es en su mayoría radiativa y se expresa como:

$$U = r^2 W_{rad} \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

Donde:

U es la intensidad de radiación (W/unidad de ángulo sólido).

r es el radio.

W_{rad} es la densidad de radiación (W/m²).

Directividad

La directividad constituye probablemente el parámetro de mayor importancia a la hora de juzgar el patrón de radiación de una antena. La directividad se define como “la razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación promedio en

todas las direcciones” [5]. En otras palabras la directividad se puede considerar como la razón de la intensidad radiada en una dirección a la intensidad de radiación de una antena con patrón isotrópico. Entre más alta sea la directividad, el haz de radiación será más afilado. La directividad entonces está dada por:

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

Ganancia

Las antenas son elementos pasivos y por lo tanto no pueden realizar una amplificación, es por ello que el término “ganancia” cuando se habla de antenas varía de su definición convencional utilizada para circuitos electrónicos. La ganancia es un parámetro de las antenas similar a la directividad. La diferencia reside en que la directividad solamente toma en cuenta las propiedades direccionales de la antena y por lo tanto ésta depende únicamente del patrón de radiación. Por el contrario la ganancia de una antena toma en cuenta tanto las propiedades direccionales de ésta como la eficiencia. La definición de ganancia dice que “es la razón de la intensidad de radiación en cualquier dirección a la radiación de intensidad que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada de manera isotrópica” [5]. La ganancia de una antena se expresa como sigue:

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidad de radiación}}{\text{potencia total de entrada (aceptada)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \varphi)}{P_{in}}$$

Ecuación (2.6)

Eficiencia de una antena

La eficiencia de una antena sirve como un parámetro para determinar las pérdidas presentes en la entrada de un circuito cualquiera. Para una antena la eficiencia total está dada por [5]:

$$e_0 = e_r e_c e_d \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

Donde:

e_r es la eficiencia de reflexión de una antena debida a desacoplamientos de impedancia entre la antena y la guía de transmisión. Esta eficiencia está ampliamente ligada al coeficiente de reflexión mediante $e_r = 1 - |\Gamma|^2$. A su vez el coeficiente de reflexión tiene un valor: $\Gamma = (Z_{in} - Z_0) / (Z_{in} + Z_0)$, donde Z_{in} es la impedancia de entrada de la antena y Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión.

e_c es la eficiencia de conductor asociada con las pérdidas por efecto Joule, es decir con potencia que es transferida al medio.

e_d es la eficiencia del dieléctrico asociada con las pérdidas del dieléctrico con el cual se esté trabajando [5].

Ancho de banda

El ancho de banda de una antena es un valor subjetivo dependiendo de las características buscadas en el funcionamiento de una antena. El ancho de banda se describe como “el rango de frecuencias dentro del cual el desempeño de la antena, con respecto a alguna característica se ajusta a un estándar especificado” [5]. En otras palabras el ancho de banda se refiere al rango de frecuencias que cumplan las

características deseadas, las cuales pueden ser intensidad de potencia, potencia radiada, coeficiente de reflexión, coeficiente de transmisión, directividad, etc.

Parámetros S

Las antenas como muchos circuitos electrónicos existentes pueden caracterizarse como una red de dos puertos y se analice de esta forma la respuesta general del sistema. En la figura 2.8 se muestra una representación de una red de dos puertos. Los parámetros existentes para redes de dos puertos son: Parámetros de impedancia o parámetros Z, parámetros de admitancia o parámetros Y, parámetros híbridos o parámetros H, parámetros de transmisión o parámetros T, parámetros de transmisión inversa o parámetros ABCD y parámetros de dispersión o parámetros S. Una vez conociendo los parámetros de una red de dos puertos, ésta se puede caracterizar en su totalidad [5].

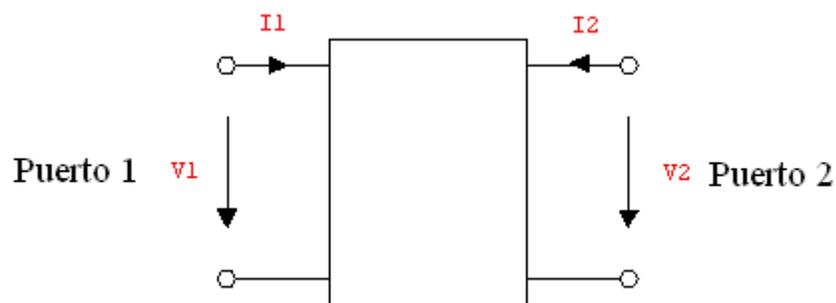


Figura 2. 8 Red de dos puertos [10]

Los parámetros mencionados anteriormente con excepción de los parámetros S obtienen sus valores considerando circuitos abiertos o cortos circuitos dependiendo del caso, sin embargo, cuando se trabaja con frecuencias altas todos ellos pierden validez debido a que no se puede lograr ni un corto circuito ni un circuito abierto por capacitancias e

inductancias parásitas. Los parámetros S pueden ser utilizados para cualquier frecuencia debido a que no hacen consideraciones de ningún circuito abierto ni corto circuito, simplemente se basan en los niveles de potencia que se perciben en las terminales de la red de dos puertos [5].

Los parámetros S son 4:

S_{11} . Este parámetro mide la cantidad de potencia que es reflejada en comparación con la cantidad de potencia que se está aplicando en el puerto 1. El parámetro S_{11} también es conocido como “el coeficiente de reflexión de puerto de entrada” (Γ) [10].

S_{12} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 1 en comparación con la enviada por el puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de transmisión inversa” [10].

S_{21} . Este parámetro mide la potencia recibida en el puerto 2 en comparación con la enviada por el puerto 1. A este parámetro se le conoce como “coeficiente de transmisión directa” [10].

S_{22} . Este parámetro mide la potencia reflejada en el puerto 2 en comparación con la cantidad de potencia que se envía del puerto 2. A este parámetro también se le conoce como “coeficiente de reflexión del puerto de salida” [10].

Los parámetros S se definen como:

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

$$S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \text{Ecuación (2.10)}$$

$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad \text{Ecuación (2.11)}$$

Donde:

$$a_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(v_1 + Z_0 i_1) \quad \text{Ecuación (2.12)}$$

$$a_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(v_2 + Z_0 i_2) \quad \text{Ecuación (2.13)}$$

$$b_1 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(v_1 - Z_0 i_1) \quad \text{Ecuación (2.14)}$$

$$b_2 = \frac{1}{2\sqrt{Z_0}}(v_2 - Z_0 i_2) \quad \text{Ecuación (2.15)}$$

Los parámetros S son muy útiles para juzgar la operación de una antena, lo cual se realizará en este proyecto de tesis mediante el analizador vectorial de red WILTRON 360B.