

## Diseño de Circuitos en Microondas

# Líneas de Transmisión Acopladas

2023 – Laboratorio de Comunicaciones  
Facultad de Ingeniería  
UNMDP

---

# Acopladores. Diseño en microstrip

En este capítulo consideramos el diseño detallado de estructuras microstrip acopladas en paralelo.

Para eso comenzamos con el diseño de un acoplador direccional.

Se introducen las técnicas utilizadas en el diseño de circuitos con líneas de transmisión acopladas, en cuanto a los valores requeridos para las impedancias de modo par e impar asociadas a un determinado nivel de acoplamiento deseado, para luego determinar las características de implementación física de dicho acoplador.

# Acopladores Direccionales

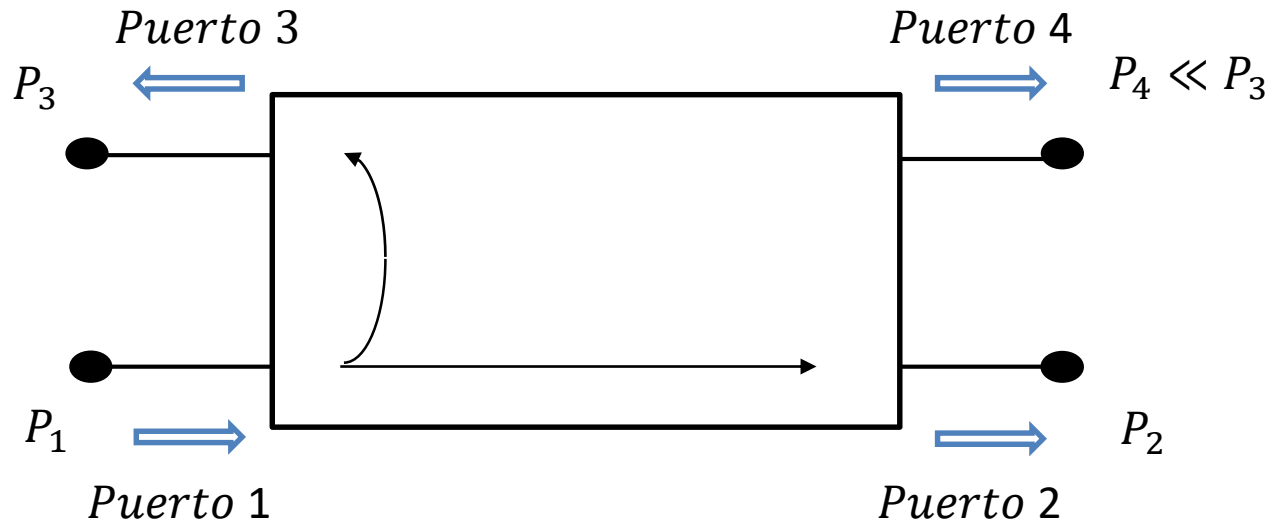
Las líneas acopladas son el componente básico en muchos circuitos de microondas. Serán considerados nuevamente en el de diseño de filtros, donde se vuelven a utilizar muchas de las técnicas de diseño presentadas en este capítulo.

En el diseño de circuitos analógicos y de Radiofrecuencia (RF), se busca eludir los acoplamientos indeseados entre partes del sistema.

El fenómeno del acoplamiento, sin embargo, puede aprovecharse para realizar un nuevo tipo de elemento, llamado acoplador direccional, que presenta la posibilidad de diseñar partes muy útiles en los circuitos de RF y microondas.

# Acopladores Direccionales

El esquema de un acoplador direccional se muestra en la siguiente figura, típica configuración de un cuadripolo.



# Acopladores Direccionales

La vista superior de una implementación en microstrip por ejemplo de un acoplador direccional se muestra en la siguiente figura.



Esta implementación es típica de la mayoría de los acopladores direccionales en el sentido de que comprende dos líneas acopladas donde el campo eléctrico y el magnético en una de las líneas inducen corrientes y tensiones en la otra.

# Acopladores Direccionales

En la configuración mas típica el generador de señales se conecta al puerto 1, y la carga al puerto 2.

La propiedad mas importante de los acopladores direccionales es la ausencia de señal que tiene el sistema cuando se lo alimenta desde el puerto 1, en el puerto 4.

Este punto puede ser utilizado para medir la onda reflejada que produce una carga conectada al puerto 2, que está aislada de la incidente.

De la misma manera la onda reflejada desde el dispositivo conectado al puerto 2, tendrá un cero, por simetría, en el puerto 3, punto en el que puede medirse la onda incidente, porque la onda reflejada desde la carga tiene en ese punto un cero de potencia.

# Acopladores Direccionales

Los acopladores direccionales se utilizan para medir cada una de las señales, las dos típicamente existentes, las ondas incidente y reflejada, de manera separada.

En general obtenemos una muestra en el puerto acoplado correspondiente, con un cierto nivel de acoplamiento, por ejemplo un acoplador de 20 dB, (con un factor de acoplamiento  $C_{dB} = -20 \text{ dB}$ ) es un acoplador microstrip en el que un 1% de la entrada de potencia en el puerto 1 se mide en el puerto 3, punto en el que la onda reflejada tiene un cero.

Sucedará también por simetría que un 1% de la entrada de potencia en el puerto 2 en sentido inverso, como onda reflejada, se mide en el puerto 4, punto en el que la onda incidente tiene un cero.

# Acopladores Direccionales

Las impedancias características del modo par e impar  $Z_{0e}$  y  $Z_{0o}$  son los principales parámetros de diseño para cualquier configuración de línea de transmisión acoplada en paralelo.

Estas impedancias son funciones del grado de acoplamiento ( $C$ ) y la característica de terminación de una sola línea impedancias ( $Z_{0s}$ ). Las relaciones entre  $Z_{0e}$  y  $Z_{0o}$  y las dimensiones físicas de la estructura acoplada (incluida la permitividad del sustrato) son datos para realizar el diseño del acoplador.

Para el diseño del acoplador, los parámetros importantes son el factor de acoplamiento  $C$ , el factor de transmisión  $T$ , la directividad  $D$  y aislamiento  $I$ .



# Acopladores Direccionales

Los acopladores en microstrip son de simplicidad de estructura, pero para un buen funcionamiento necesitan ser compensados.

Esto se debe a las diferentes velocidades de fase asociadas con los modos par e impar, cuyo principal efecto es degradar la directividad. La especificación inicial para dicho acoplador tiene en cuenta:

incluirá:

- factor de acoplamiento  $C_{dB}$  en la frecuencia central  $f_0$
- permitividad y espesor del sustrato,  $\epsilon_r$  y  $h$
- impedancia característica de terminación  $Z_0$  (normalmente 50  $\Omega$ )

# Acopladores Direccionales

- ancho de banda y frecuencia central
- tolerancia del factor de acoplamiento sobre la banda (a veces)
- Directividad  $D_{dB}$  más baja aceptable en decibelios (dB).

A partir de esta información, el diseño debe determinar los parámetros geométricos del acoplador microstrip, ancho de las tiras, la separación entre ellas y la longitud de la región acoplada.

# Acopladores Direccionales

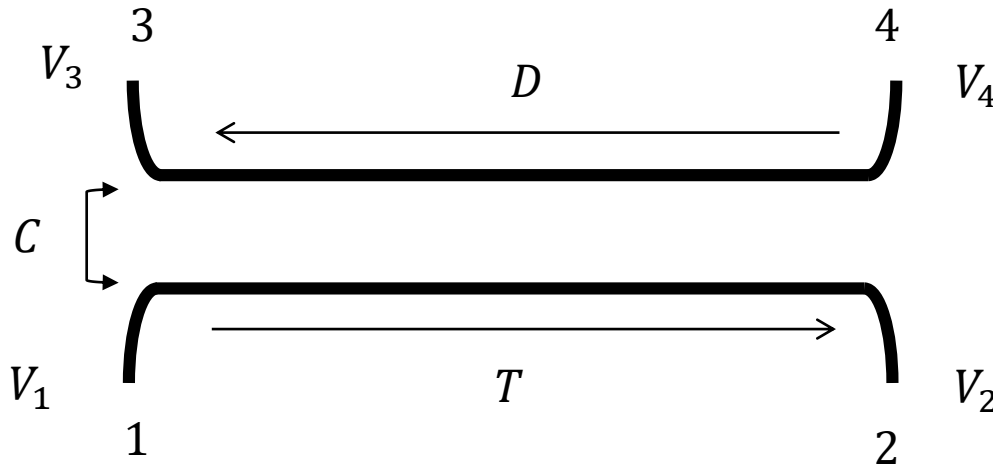
Es importante tener en cuenta que todos los acopladores, sean onda TEM o cuasi-TEM, se caracterizan con el modelo diseñado con las impedancias modo par e impar  $Z_{0e}$  y  $Z_{0o}$ .

Los acopladores TEM de modo puro producen velocidades de fase iguales para cada modo, mientras que los acopladores microstrip (cuasi-TEM) producen diferentes velocidades de fase en modo impar y modo par,  $v_{po}$  y  $v_{pe}$ .

Esto produce una leve degradación del funcionamiento del acoplador, que resiente un poco la calidad de la aislación entre ondas incidente y reflejada. De todas manera los acopladores microstrip son de gran uso.

# Acopladores Direccionales. Parámetros.

El esquema simplificado de la figura nos permite definir los parámetros que caracterizan el funcionamiento del acoplador direccional.



Los parámetros importantes para el diseño son el factor de acoplamiento  $C$ , el factor de transmisión,  $T$ , la directividad  $D$  y aislamiento  $I$ , que se definen como:

# Acopladores Direccionales. Parámetros.

Podemos definir los parámetros de interés de la siguiente manera:

$C = \frac{V_3}{V_1}$  Acoplamiento, fracción de voltaje "transferida" (acoplada) a través del brazo opuesto cercano

$T = \frac{V_2}{V_1}$ , factor de transmisión, transmisión directa a través del brazo "primario" de la estructura

$D = \frac{V_4}{V_3}$  Directividad, medida del acoplamiento indeseable que puede ocurrir al puerto 4

$I = \frac{V_4}{V_1}$  Aislación, grado de aislamiento entre el puerto 4 y el puerto 1.

# Acopladores Direccionales. Parámetros.

Es habitual expresar todas estas cantidades en decibelios, por lo que hablamos en términos de un acoplador de 10 dB por ejemplo, lo cual significa que la potencia en el puerto 3 es -10 dB, o sea 10 dB menor que la que hay en el puerto 1. En acopladores ideales  $D = 0$ , y la potencia se divide proporcionalmente entre los puertos 2 y 3.

Con acopladores coaxiales y del tipo stripline que operan en modos TEM, se puede obtener una directividad muy buena, pero no siempre sucede con los acopladores en microstrip, cuya ventaja es la simplicidad de construcción, debido a la degradación en directividad que resulta de la estructura con dieléctricos mixtos.

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Ejemplo: Diseño de un acoplador direccional en microstrip con un acoplamiento de 20 dB, ( $C_{dB} = -20 \text{ dB}$ ), a la frecuencia de  $f = 500 \text{ MHz}$ .

Asumiendo que se opera sobre un sistema de referencia de  $Z_0 = 50 \Omega$ :

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + 10^{C_{dB}/20}}{1 - 10^{C_{dB}/20}}} = 50 \sqrt{\frac{1 + 10^{-20/20}}{1 - 10^{-20/20}}} \Omega = 55.27 \Omega$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1 - 10^{C_{dB}/20}}{1 + 10^{C_{dB}/20}}} = 50 \sqrt{\frac{1 - 10^{-20/20}}{1 + 10^{-20/20}}} \Omega = 45.22 \Omega$$

Verificándose que  $Z_0^2 = Z_{0e}Z_{0o}$

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Aplicando el método aproximado de síntesis determinamos las impedancias de las líneas solas:

$$Z_{0se} = \frac{Z_{0e}}{2} = 27.635 \, \Omega$$

$$Z_{0so} = \frac{Z_{0o}}{2} = 22.61 \, \Omega$$

Con estos valores de impedancia recurrimos a las formulas de síntesis clásicas para microstrip, interpretando cada tira del acoplador como una línea de transmisión microstrip aislada. De esta manera determinamos:



# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Aplicando el método aproximado de síntesis determinamos las impedancias de las líneas solas:

$$\left(\frac{W}{h}\right)_{se} = 4.54$$
$$\left(\frac{W}{h}\right)_{so} = 5.672$$

Estas cantidades fueron calculadas anteriormente en función de  $\frac{W}{h}$  y  $\frac{s}{h}$ , que son las cantidades a determinar.

Un cálculo paramétrico o bien gráfico permite determinar  $\frac{W}{h}$  y  $\frac{s}{h}$  en función de  $\left(\frac{W}{h}\right)_{se}$  y  $\left(\frac{W}{h}\right)_{so}$  que resultan ser:

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

$$\frac{W}{h} = 1.936$$

$$\frac{s}{h} = 1.18$$

Y siendo  $h = 1.6 \text{ mm}$  en el caso del material epoxy doble faz:

$$W = 3.097 \text{ mm}$$

$$s = 1.888 \text{ mm}$$

Con este cálculo inicial, aproximado, se necesita implementar un cálculo iterativo para refinar el valor de las dimensiones calculadas. Para esto, debemos conocer los valores resultantes de  $C_{0e}$  y  $C_{0o}$  (con dieléctrico) y de  $C_{01e}$  y  $C_{01o}$  (sin dieléctrico), con los cuales podemos volver a determinar los valores de  $Z_{0e}$  y  $Z_{0o}$  que permiten un recalcu del nivel de acoplamiento  $C_{dB}$ .

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Con los valores de dimensiones estimados se pueden calcular los valores de las capacidades de la estructura acoplada  $C_p$ ,  $C_{ga}$ ,  $C_{gd}$ ,  $C_{ff1}$  y  $C_{ff2}$ .

Aproximando:

$$\frac{W}{h} = 1.9$$

$$\frac{s}{h} = 1.2$$

Adoptando para el epoxy doble faz  $\epsilon_r = 4.45$

$$\frac{C_p}{\epsilon_0} = 2.51 \quad \frac{C_{ga}}{\epsilon_0} = 0.53 \quad \frac{C_{gd}}{\epsilon_0} = 0.63 \quad \frac{C_{ff1}}{\epsilon_0} = 0.79 \quad \frac{C_{ff2}}{\epsilon_0} = 0.5$$
$$\epsilon_{re} = 3.36$$

Para la misma estructura rellena de vacío,  $\epsilon_r = 1$

$$\frac{C_p}{\epsilon_0} = 2.51 \quad \frac{C_{ga}}{\epsilon_0} = 0.53 \quad \frac{C_{gd}}{\epsilon_0} = 0.63 \quad \frac{C_{ff1}}{\epsilon_0} = 0.79 \quad \frac{C_{ff2}}{\epsilon_0} = 0.5$$

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Para la misma estructura rellena de vacío,  $\epsilon_r = 1$

$$\frac{C_p}{\epsilon_0} = 1.8 \quad \frac{C_{ga}}{\epsilon_0} = 1.78 \quad \frac{C_{gd}}{\epsilon_0} = 0.11 \quad \frac{C_{ff1}}{\epsilon_0} = 1.10 \quad \frac{C_{f2}}{\epsilon_0} = 0.10$$
$$\epsilon_{re} = 1$$

Con los valores de las capacidades de la estructura pueden calcularse también:

$$\frac{C_{0e}}{\epsilon_0} = 3.8 \quad \frac{C_{0o}}{\epsilon_0} = 4.46$$

$$\frac{C_{01e}}{\epsilon_0} = 3.60 \quad \frac{C_{01o}}{\epsilon_0} = 4.89$$

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

$$C_{0e} = 1.129 \times 10^{-10} \text{ F/m} \quad C_{0o} = 1.328 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

$$C_{01e} = 3.186 \times 10^{-11} \text{ F/m} \quad C_{01o} = 4.327 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

Los nuevos valores de las impedancias par e impar son:

$$Z_{0e} = 55.40 \, \Omega$$

$$Z_{0o} = 48.387 \, \Omega$$

El valor del acoplamiento resulta ser entonces:

$$C_{dB} = -18.7 \text{ dB}$$

Este nivel de acoplamiento es mayor al deseado.

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Intuitivamente incrementamos la separación entre tiras a un valor de  $s = 1.4$ , resultando en:

$$\frac{C_{0e}}{\epsilon_0} = 3.83 \quad \frac{C_{0o}}{\epsilon_0} = 4.41$$

$$\frac{C_{01e}}{\epsilon_0} = 3.64 \quad \frac{C_{01o}}{\epsilon_0} = 4.79$$

$$Z_{0e} = 54.87 \, \Omega$$

$$Z_{0o} = 44.57 \, \Omega$$

El valor del acoplamiento resulta ahora ser entonces:

$$C_{dB} = -19.7 \, dB$$

# Acopladores Direccionales. Diseño en microstrip.

Para conocer la longitud del acoplador se necesita determinar los valores de

$$Z_{01e} = 103.475 \, \Omega$$

$$Z_{01o} = 78.632 \, \Omega$$

$$\lambda_{go} = \frac{c}{f} \frac{Z_{0o}}{Z_{01o}} = 34.009 \, cm$$

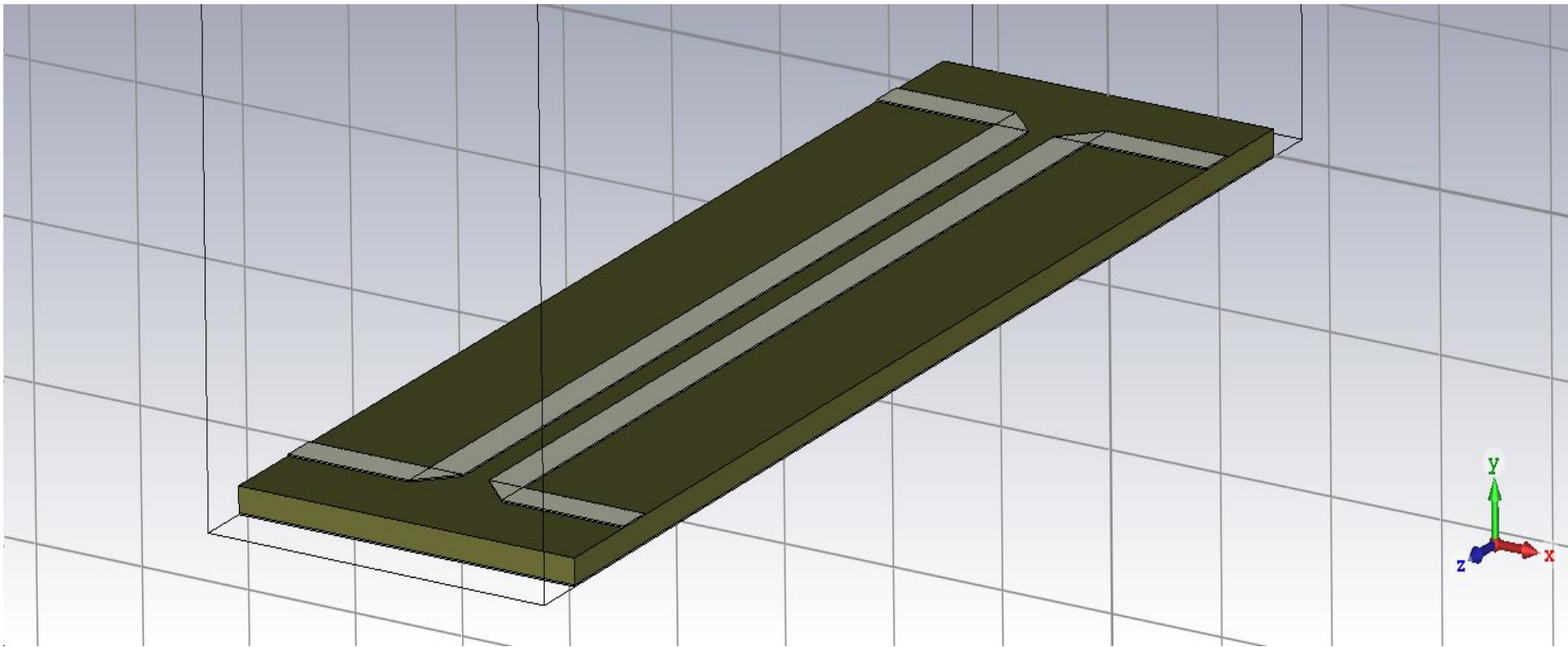
$$\lambda_{ge} = \frac{c}{f} \frac{Z_{0e}}{Z_{01e}} = 31.816 \, cm$$

La longitud del acopladores:

$$\frac{\lambda_{gm}}{4} = \frac{\lambda_{go} + \lambda_{ge}}{8} = \frac{1}{8} (34.009 + 31.816) \, cm = 8.228 \, cm$$

# Implementación en CST Studio.

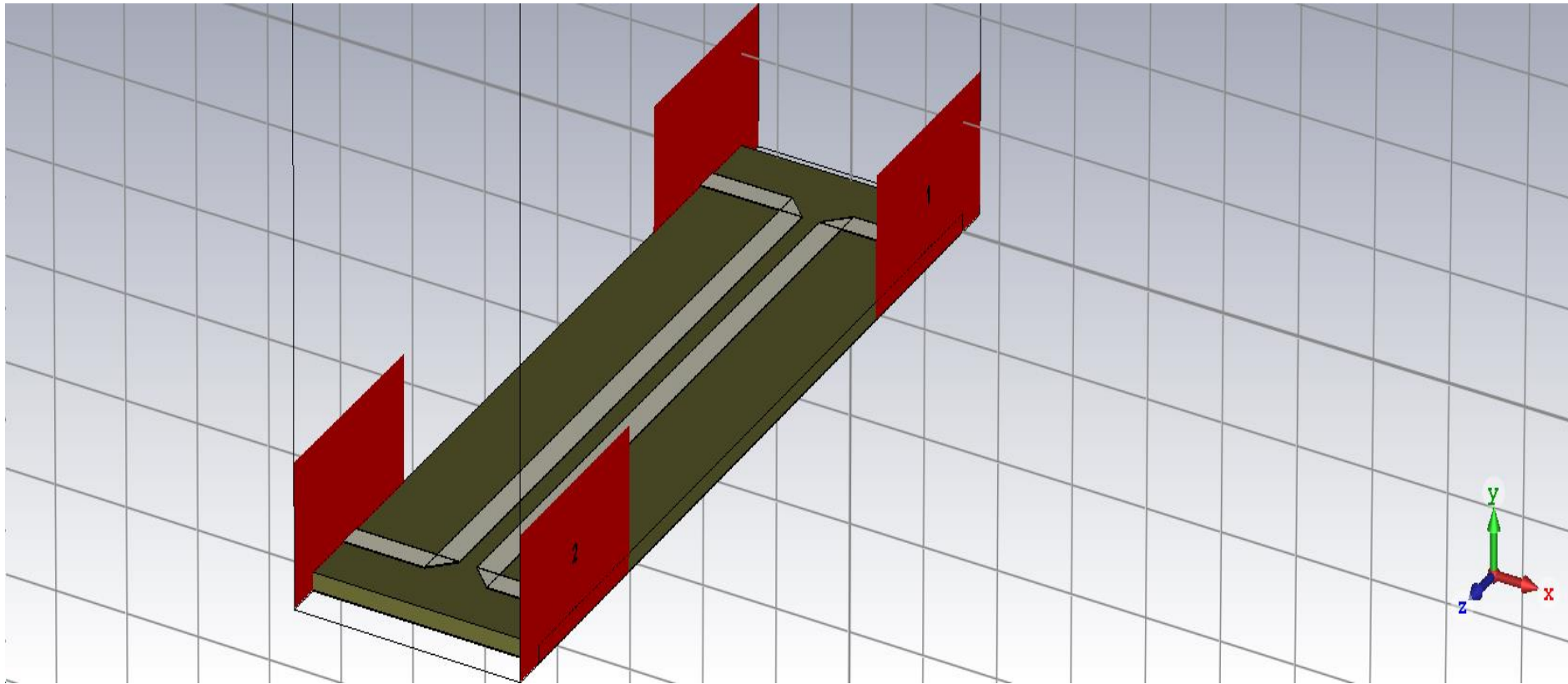
El acoplador direccional calculado es simulado en CST. Se muestra el esquema 3D del mismo.





# Implementación en CST Studio.

Se muestra, en el esquema 3D del acoplador direccional, los puertos de guías de onda de alimentación y medición.



# Implementación en CST Studio.

Se muestra la respuesta del acoplamiento entre puertos 1 y 3, parámetro  $S_{13}$ , del acoplador direccional, de 20 dB a la frecuencia calculada de  $f = 500 \text{ MHz}$ .

