



Trabajo Práctico Final

Diseño y elaboración de un acoplador direccional

Materia: Medidas II

Grupo: 1

Alumnos:

Aldana Pocai

Nahuel Fulco Menéndez

Iván Plis

Gabriel Bacigaluppi

Micaela Gareis

Alan Maldonado Perdomo

28/06/2023

Objetivo

El objetivo de este trabajo es diseñar y elaborar un acoplador direccional a partir de dos condiciones que tienen que cumplirse para $Z_0 = 50\Omega$:

- Frecuencia = 915 MHz
- Acoplamiento = -20 dB

Introducción

En el ámbito de la radio tecnología, existen dispositivos esenciales conocidos como divisores de potencia y acopladores direccionales. Estos componentes pasivos desempeñan un papel fundamental en la transmisión de señales de alta frecuencia, permitiendo el acoplamiento y la distribución precisa de potencia entre diferentes puertos. Estos dispositivos acoplan parte de la potencia transmitida a través de una línea de transmisión hacia otro puerto, a menudo usando dos líneas de transmisión dispuestas lo suficientemente cerca para que la energía que circula por una de las líneas se acople a la otra.

Configuración de puertos y líneas de transmisión del acoplador direccional

Como se puede observar en la figura X, el acoplador consta de 4 puertos: entrada, salida, acoplado y aislado. La línea que conecta los puertos 1 y 2 se denomina "línea principal". En algunos acopladores direccionales, se diseña la línea principal para operar a alta potencia, utilizando conectores de mayor tamaño, mientras que el puerto acoplado puede emplear un conector SMA de menor tamaño. El puerto aislado generalmente se conecta a una carga adaptada, interna o externa, típicamente de 50 ohmios. Es importante destacar que, dado que el acoplador direccional es un dispositivo lineal, la notación de la figura X es arbitraria. Cualquier puerto puede actuar como la entrada, lo que significa que la salida sería el puerto directamente conectado a la entrada, el puerto acoplado sería el puerto adyacente a la entrada, y el aislado sería el puerto en diagonal.

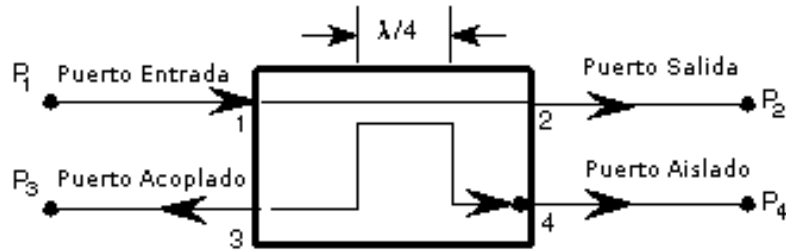


Figura 1. Acoplador Direccional

El puerto acoplado se utiliza para obtener información, como la frecuencia y el nivel de potencia de la señal, sin interrumpir el flujo principal en el sistema. Cuando la potencia en el puerto 3 es la mitad de la potencia de entrada (por ejemplo, 3 dB inferior a la entrada), la potencia en la línea principal también se reduce en 3 dB con respecto a la entrada y es igual a la potencia acoplada. Estos acopladores se conocen como acopladores híbridos de 90 grados, híbridos o acopladores de 3 dB.

Las propiedades deseables comunes para todos los acopladores direccionales incluyen un ancho de banda amplio, alta directividad y una buena adaptación de impedancia en todos los puertos cuando los otros puertos están conectados a cargas adaptadas. A continuación, se discutirán otras características generales.

Factor de acoplamiento

El factor de acoplamiento en un acoplador direccional se define mediante la siguiente fórmula:

$$C_{3,1} = -10 \log(P_3/P_1) \text{ dB}$$

Donde P_1 es la potencia de entrada en el puerto 1 y P_3 es la potencia de salida en el puerto acoplado.

El factor de acoplamiento representa la propiedad principal de un acoplador direccional. Sin embargo, este acoplamiento no es constante y varía con la frecuencia. Aunque se pueden aplicar varios diseños para reducir esta variación, es imposible construir un acoplador perfecto sin ninguna variación en la frecuencia. Por lo tanto, los acopladores direccionales se especifican en términos de su precisión en la frecuencia central de la banda de operación.

Pérdidas o atenuación

En un acoplador direccional, las pérdidas en la línea principal desde el puerto 1 al puerto 2 se conocen como pérdidas por inserción. Estas pérdidas se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$Li_{2,1} = -10 \log(P_2/P_1) \text{ dB}$$

Gran parte de estas pérdidas se deben a la potencia desviada hacia el puerto 3, lo cual se conoce como pérdidas por acoplamiento. Estas pérdidas se calculan mediante la siguiente fórmula:

$$Lc_{2,1} = -10 \log(1 - P_3/P_1) \text{ dB}$$

En un acoplador direccional ideal, las pérdidas por inserción y las pérdidas por acoplamiento serían iguales. Sin embargo, en la práctica, las pérdidas por inserción son una combinación de pérdidas de acoplamiento, pérdidas dieléctricas, pérdidas del conductor y pérdidas por ROE. Dependiendo del rango de frecuencias, las pérdidas por acoplamiento son menos significativas cuando el acoplamiento es superior a 15 dB. En este caso, las otras pérdidas constituyen la mayor parte del total de pérdidas.

Aislamiento

El aislamiento de un acoplador direccional se refiere a la diferencia de niveles de señal, en dB, entre el puerto de entrada y el puerto aislado, con los otros puertos conectados a cargas adaptadas. Se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Aislamiento (puerto 4, puerto 1)} = -10 \log(P_4/P_1) \text{ dB}$$

También se puede definir el aislamiento entre los dos puertos de salida. En este caso, uno de los puertos de salida se utiliza como entrada, mientras que el otro se considera como el puerto de salida. Los otros dos puertos (entrada y aislado) están conectados a cargas adaptadas. La fórmula correspondiente es:

$$\text{Aislamiento (puerto 3, puerto 2)} = -10 \log(P_3/P_2) \text{ dB}$$

Debe destacarse que el aislamiento entre los puertos de entrada y aislado puede ser diferente del aislamiento entre los dos puertos de salida. Si ambas medidas de aislamiento no están disponibles, se puede asumir que son iguales. En caso de que ninguna de las dos medidas esté disponible, se puede estimar el aislamiento mediante la suma del factor de acoplamiento y las pérdidas de retorno (ROE).

El aislamiento debería ser lo más alto posible. En los acopladores direccionales actuales, el puerto aislado nunca está completamente aislado y siempre estará presente alguna señal de RF. Sin embargo, los acopladores direccionales de guía de onda son los que ofrecen el mejor aislamiento.

Un alto aislamiento en un acoplador direccional es ideal para combinar señales y alimentar una sola línea hacia un receptor para realizar pruebas de recepción de dos tonos.

Directividad

La directividad de un acoplador direccional está relacionada directamente con el aislamiento y se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Directividad (puerto 3, puerto 4)} = -10 \log(P4/P3) = -10 \log(P4/P1) + 10 \log(P3/P1) \text{ dB}$$

Donde P3 es la potencia de salida del puerto acoplado y P4 es la potencia de salida del puerto aislado.

La directividad debe ser lo más alta posible. Es especialmente alta en la frecuencia de diseño y es más sensible a la frecuencia debido a la cancelación de los componentes de la oscilación. Los acopladores direccionales de guía de onda son conocidos por tener una alta directividad. La directividad no se mide directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre las medidas de aislamiento y acoplamiento:

$$\text{Directividad (puerto 3, puerto 4)} = \text{Aislamiento (puerto 4, puerto 1)} - \text{Factor de acoplamiento (puerto 3, puerto 1)} \text{ dB}$$

Parámetros S

Los parámetros S son una forma común de describir las características de los componentes de radiofrecuencia, como los acopladores direccionales. Estos parámetros, también

conocidos como parámetros de dispersión o parámetros de scattering, proporcionan información sobre cómo se comporta un dispositivo en términos de la transmisión y reflexión de señales en diferentes puertos.

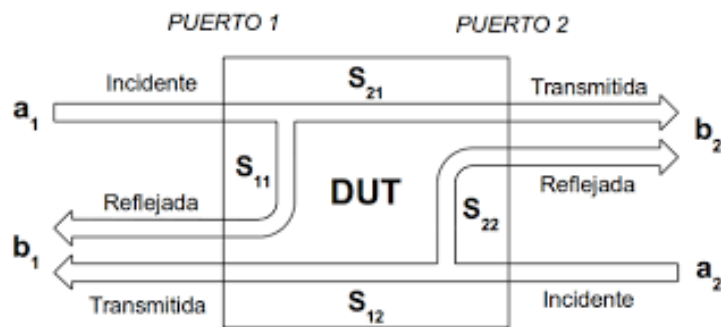
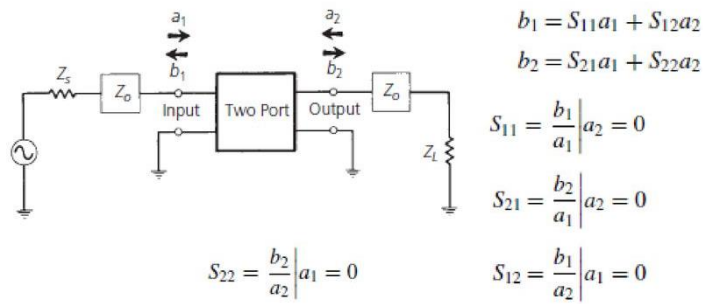


Figura 2: Diagrama del acoplador

En el caso de un acoplador direccional con dos puertos, los parámetros S más relevantes son S_{11} , S_{21} , S_{12} y S_{22} . Estos parámetros representan la reflexión y transmisión de señales en los diferentes puertos del acoplador. Veamos cada uno de ellos:

- S_{11} : Este parámetro representa la reflexión de señal en el puerto 1 cuando se aplica una señal al puerto 1. En un acoplador direccional ideal, se espera que S_{11} sea muy bajo, lo que indica una buena adaptación de impedancia entre el generador de señal y el acoplador.
- S_{21} : Este parámetro describe la transmisión de señal desde el puerto 1 al puerto 2. Es una medida de la pérdida de inserción en el acoplador direccional. En un acoplador ideal, se espera que S_{21} sea cercano a cero, lo que significa que la mayor parte de la potencia se dirige hacia el puerto acoplado (puerto 2) y no se refleja hacia el puerto 1.
- S_{12} : Representa la transmisión de señal desde el puerto 2 al puerto 1, es decir, la cantidad de potencia que se acopla y se dirige al puerto acoplado. En un acoplador ideal, se espera que S_{12} sea alto, indicando un acoplamiento eficiente entre el puerto 2 y el puerto acoplado.
- S_{22} : Este parámetro muestra la reflexión de señal en el puerto 2 cuando se aplica una señal al puerto 2. En un acoplador ideal, se espera que S_{22} sea muy bajo, lo que indica una buena adaptación de impedancia entre el puerto aislado (puerto 2) y el acoplador.



S_{11} = Coeficiente de reflexión de entrada
 S_{12} = Coeficiente de reflexión de transmisión inversa
 S_{21} = Coeficiente de reflexión de transmisión directa
 S_{22} = Coeficiente de reflexión de salida

Figura 3: Parámetros S del acoplador

Estos parámetros S se pueden medir utilizando equipos de prueba especializados, como un analizador de redes, que aplica señales a los puertos del acoplador y mide las señales reflejadas y transmitidas. Con los valores de los parámetros S , se puede evaluar el rendimiento del acoplador direccional en términos de adaptación de impedancia, pérdidas de inserción, acoplamiento y aislamiento.

Cálculos de diseño

Se utilizó el software QucsStudio para realizar la simulación de las líneas del acoplador y poder elaborarla posteriormente, los cuales se basaron en el desarrollo teórico del material proporcionado por la cátedra.

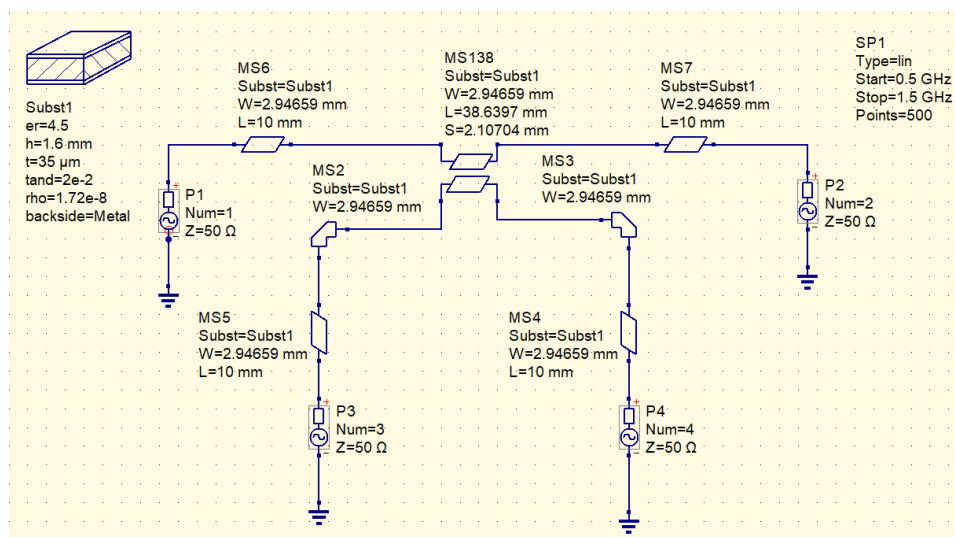


Figura 4: Simulación del acoplador direccional en QucsStudio.

Para obtener los parámetros W (ancho de la línea) y S (separación entre líneas), se utilizó la opción “line calculation” y se seleccionó “coupled microstrip line”:

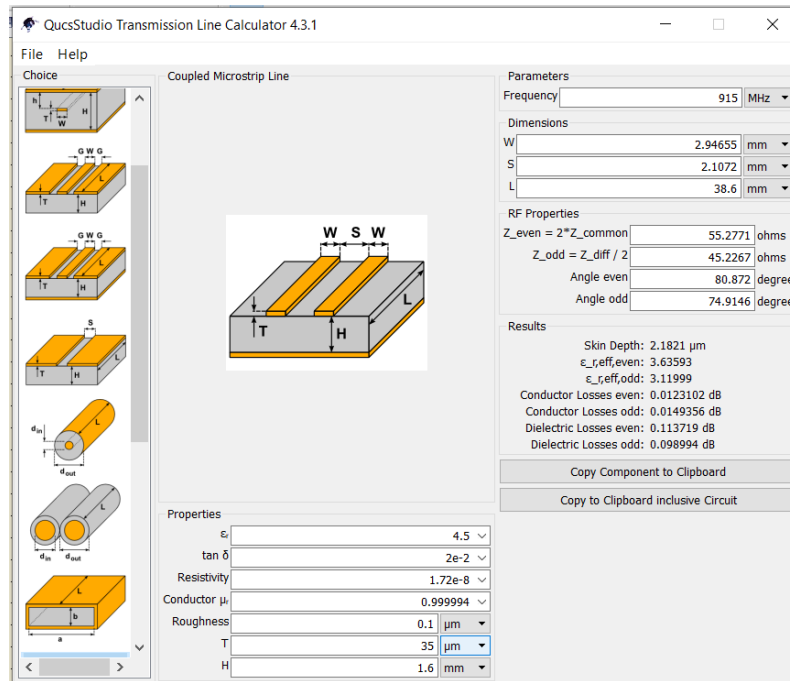


Figura 5: Ventana de la opción “line calculation”.

En primer lugar, se seleccionó la frecuencia de trabajo que fue de 915 MHz según lo requirió la consigna del trabajo. Luego, fue necesario calcular los parámetros Z_{even} y Z_{odd} correspondientes a la sección de RF Properties, mediante las expresiones que se muestran a continuación:

$$Z_{0\text{even}} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (1)$$

$$k = 10^{-\frac{c}{20}} \quad (2)$$

$$Z_{0\text{odd}} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (3)$$

En el cálculo del factor de acoplamiento k , c es el acoplamiento de -20 dB que debía tener nuestra línea, también requerido por consigna. Z_0 se tomó igual a 50Ω .

La necesidad del uso de dos impedancias, una par y la otra impar, se explica a partir del mecanismo de acoplamiento; las líneas acopladas soportan estos dos modos de excitación, par e impar, tal como se muestra en la figura x:

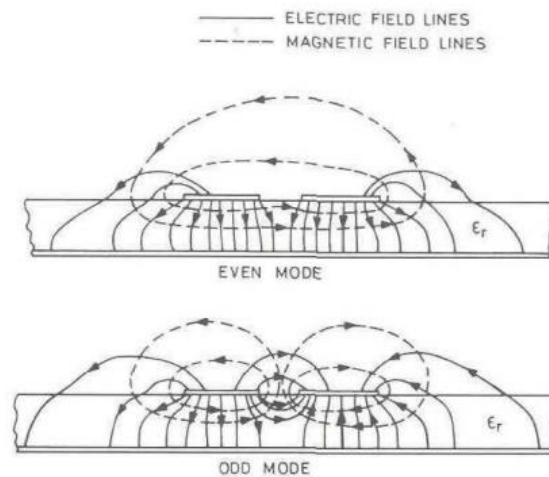


Figura 6: Modo de excitación par e impar.

En el modo par, ambas líneas están al mismo potencial mientras que en el modo impar están al mismo potencial pero con signo contrario. Los modos par e impar tienen distintas impedancias características y para el caso en el que los conductores están muy separados (sin acoplamiento) ambas impedancias son iguales.

- La impedancia característica par Z_{0even} es la impedancia entre una línea y tierra cuando ambos conductores están excitados en fase con iguales impedancias y voltajes.
- La impedancia característica impar Z_{0odd} es la impedancia entre una línea y tierra cuando ambos conductores están excitados en contrafase con iguales impedancias y voltajes.

Por último se configuraron las características de la placa donde se realizaría el acoplador direccional, que fueron determinadas por el fabricante o por el tipo de material:

- $\epsilon_r \rightarrow$ Permitividad relativa $\rightarrow 4.5$ (FR4)
- $\tan(\delta) \rightarrow$ Factor de disipación $\rightarrow 2e-2$ (FR4 @ 1 GHz)
- Resistividad $\rightarrow 1.72e-8$ (cobre)
- Conductor $\mu_r \rightarrow 0.999994$ (cobre)
- Roughness $\rightarrow 0.1 \mu m$
- T \rightarrow Espesor del cobre $\rightarrow 35 \mu m$

- H → Espesor del sustrato → 1.6 mm

Por último, para calcular el largo de la línea L se utilizó la siguiente expresión:

$$l = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{\lambda_g}{4} \quad (4)$$

La Ecuación 4 viene de plantear la condición máxima de acoplamiento (se cumple para dicha condición), donde β es la constante de propagación.

A su vez,

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (6)$$

siendo c la velocidad de la luz y f la frecuencia de trabajo de 915 MHz. De esta forma,

$$\lambda_0 = \frac{3E8 \text{ m/s}}{9.15E8 \text{ 1/s}} = 0.328 \text{ m} \quad (7)$$

$$\lambda_g = \frac{0.328 \text{ m}}{\sqrt{4.5}} = 0.155 \text{ m} \quad (8)$$

Finalmente, con estos datos es posible calcular la longitud de la línea a partir de la Ecuación 4:

$$l = \frac{0.155 \text{ m}}{4} = 38.6 \text{ mm} \quad (9)$$

De esta forma, al colocar todos los parámetros mencionados en esta sección en la ventana “line calculation” de QucsStudio, el mismo arroja automáticamente los valores para W y S del acoplador; una vez obtenidos estos valores, se utilizaron para crear el layout para la elaboración del mismo.

Elaboración del acoplador direccional

Una vez realizada la simulación, se procedió a crear el layout para el acoplador a partir de los parámetros arrojados en la simulación con AutoCAD, como se muestra a continuación:

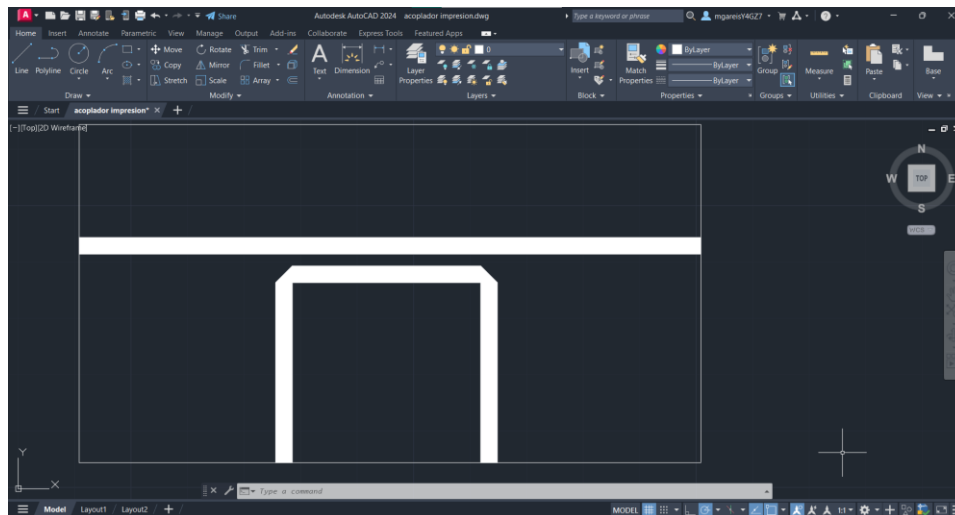


Figura 7: Diseño del layout del acoplador en AutoCAD.

Luego, se imprimió el modelo en papel de revista para su posterior planchado en la placa. Tal como se llevó a cabo con la línea de transmisión en un trabajo previo, con una plancha tradicional se adhirió la tinta a la placa y con un marcador se pintó el otro lado de la misma para luego ser sumergida en ácido.

Una vez realizada la impresión, se soldaron las cargas (dos resistencias SMD de 100Ω en paralelo) y los conectores SMA a los puertos correspondientes:



Figura 8: Acoplador direccional con conectores SMA y resistencias SMD soldados.

Simulación

El software QucsStudio permite hacer una simulación del acoplador final, tal como se muestra a continuación:

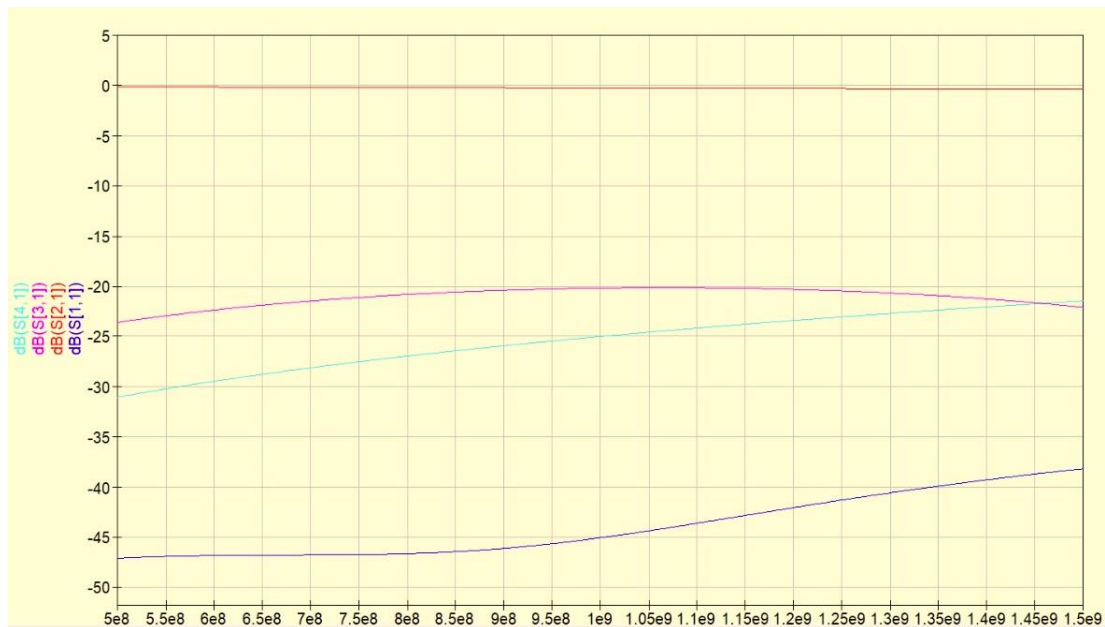


Figura 9: Simulación del acoplador en QucsStudio.

En primera instancia, se observó que la línea color rosa no se acercaba lo suficiente a -20, que es valor de acoplamiento para el que se diseñó el acoplador direccional; luego de encontrar un error en la simulación, se obtuvo el gráfico de la figura 9, en el que sí se observa que la línea pasa por -20 tal como se esperaba.

Medicion y verificacion de diseño

Se exhibirán las fotos de lo obtenido en el display y posteriormente se explicará lo obtenido.

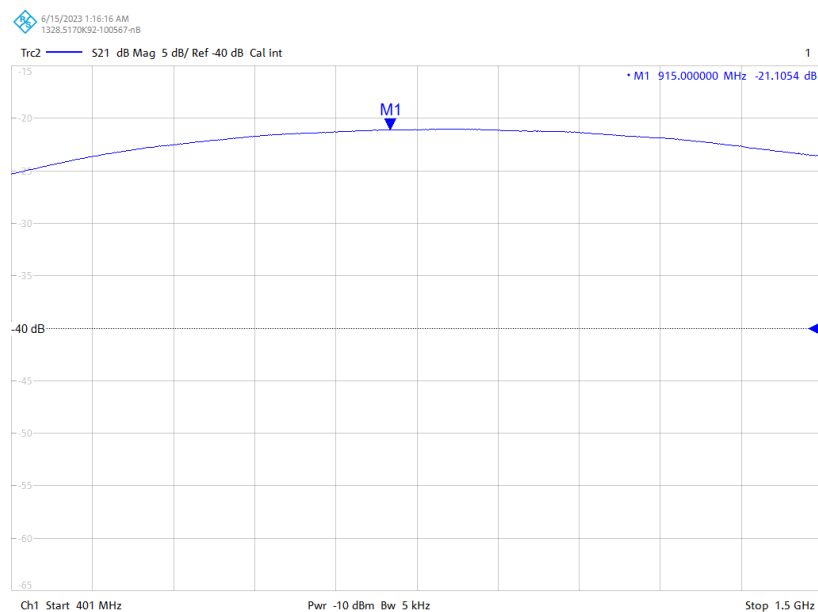


Figura 10: Factor de acoplamiento

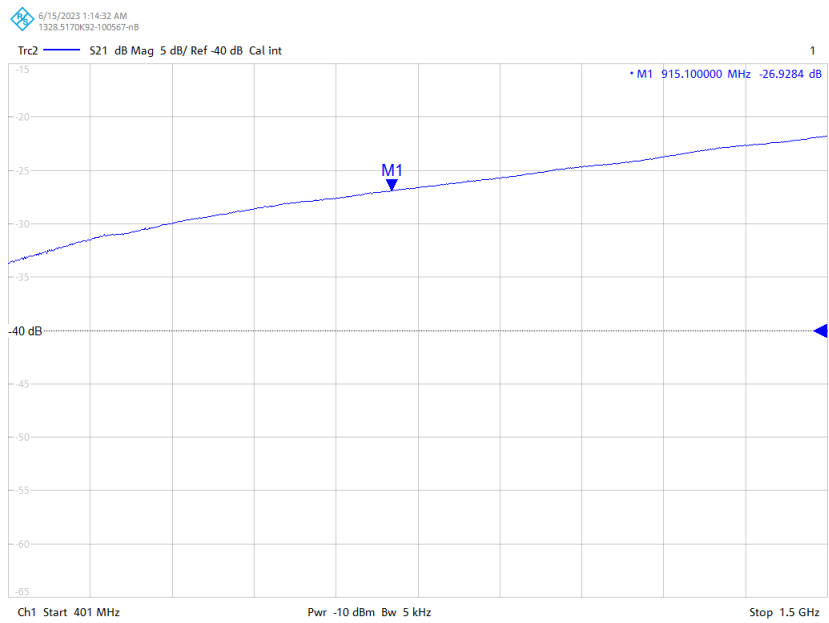


Figura 11: Factor de aislamiento

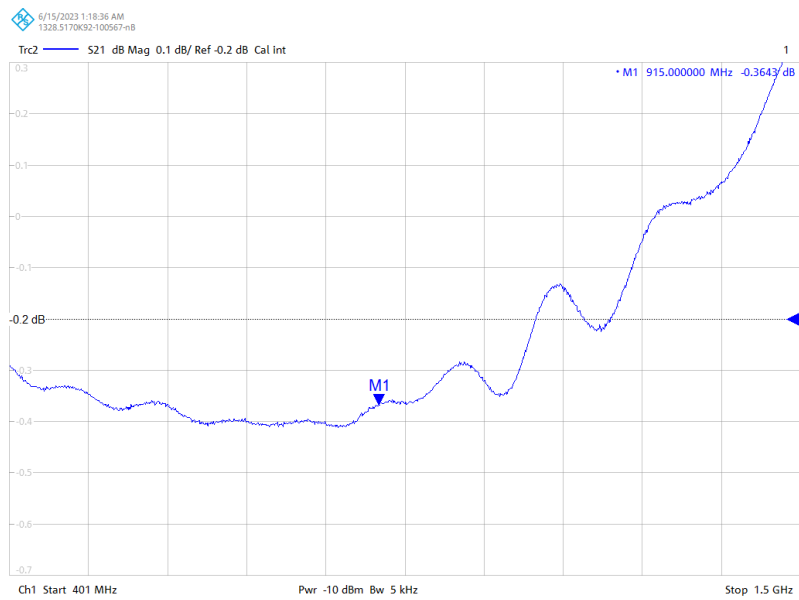


Figura 12: Factor de atenuación

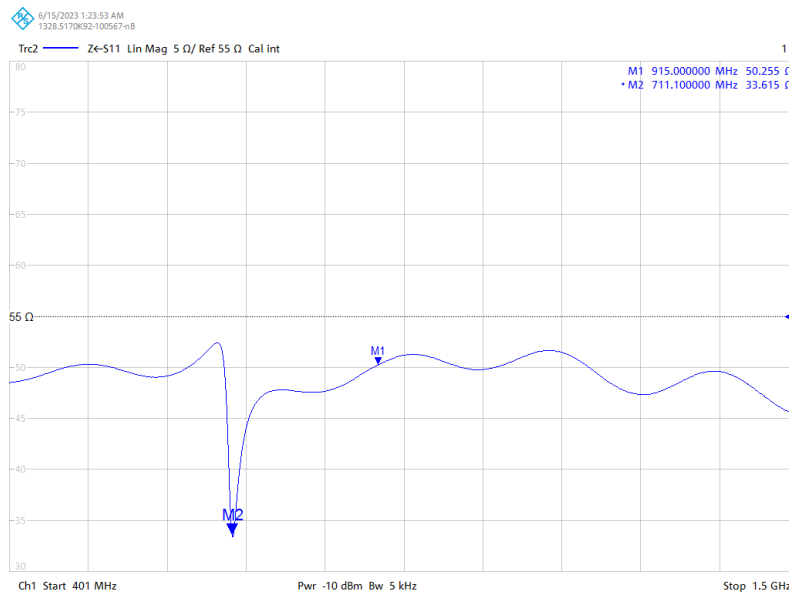


Figura 13: Impedancia de entrada vista desde el puerto 3 del acoplador

Para realizar las mediciones se utilizó el analizador vectorial de redes Rohde & Schwarz ZND, el mismo fue calibrado para operar en el rango de frecuencias de 401 MHz hasta 1500 MHz con un total de 1001 puntos.

Se comenzó midiendo el factor de acoplamiento, para ello se cargó el puerto 2 con 50Ω y se conectaron los puertos 1 y 3 al VNA. El equipo se configuró para medir S₂₁ y se obtuvo que en la frecuencia de paso el factor de acoplamiento fue de -21,1054 dB.

Luego, se calculó el aislamiento del acoplador direccional. Se conectaron la puerta 2 y la puerta 3 del acoplador direccional al puerto 1, y puerto 2 del analizador de red vectorial respectivamente, y se configuró al equipo para medir S₂₁ nuevamente (entrada puerta 3 y salida puerta 4 del AC). Se esperaba un valor de -60 dB y se obtuvieron -26,9284 dB, en esta ocasión se cargó el puerto 1 con 50Ω.

A continuación, se midió la atenuación de acoplador direccional para ello se conectó el VNA a los puertos 1 y 2, nuevamente se configuró para medir S₂₁ y se obtuvo que el factor de atenuación fue de -0,3643 dB cuando se esperaba que fuera de 0 dB.

Por último, se quiso verificar que la puerta 4 tuviese realmente una impedancia de 50Ω, para ello se conectó únicamente la puerta 3 del AC al equipo, y utilizando el menú *Measure, Impedance*, se obtuvo que Z₁ era de 50,255Ω.

Conclusiones

Una vez realizadas las mediciones puede observarse que el factor de acoplamiento y el factor de pérdidas es acorde a lo calculado mientras que el factor de aislamiento terminó siendo 30 dB mayor a lo esperado.

Por otro lado, la frecuencia fundamental de acoplamiento medida coincidió con la calculada, la verificación de la carga conectada también fue satisfactoria y por ende se puede concluir que la elaboración del acoplador fue relativamente exitosa. Que el factor de aislamiento esté solo 6 dB por debajo de los 20 dB de acoplamiento significa que el crosstalk será considerable y lo que se “vea” en el puerto 3 tendrá una componente relevante de lo que se acople desde el puerto 2.

Bibliografía

- Material provisto por la cátedra (2023). *Analizadores de redes*.
- Giuffrida, Pérez, Di Vruno, De Césare (2008) (UTN). *Acopladores direccionales - Teoría, diseño, simulación*.