



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

Informe Trabajo Práctico Obligatorio

Medidas Electrónicas II

Docentes:

- Juan Alfredo Cecconi
- Damián Hidalgo

Alumno:

- Federico Castellaró

Fecha de entrega:

- 24 de Noviembre de 2020

Introducción	3
Descripción del proyecto	3
Antenas en PCB	3
Parámetros de las antenas	4
Frecuencia y Longitud de onda	4
Impedancia de entrada de la antena	5
Máxima transferencia de potencia (VSWR)	5
Coeficiente de reflexión	5
Ancho de banda de operación	6
Porcentaje de Ancho de Banda	6
Eficiencia de Radiación	7
Intensidad de la radiación	7
Simulación	9
Meandered Inverted F Antenna (MIFA)	9
Diseño de la antena	10
Implementación en CST STUDIO	11
Primer diseño	11
Resultados de la primera simulación	12
Pérdida de retorno (S11dB)	12
Diseño final	15
Mejoras hechas	15
Radiación	17
Diagrama de Smith	18
Recomendaciones básicas para futuros diseños	18
Conclusiones	21
Referencias	21

Introducción

Descripción del proyecto

En este proyecto se tendrá como objetivo poner a prueba mediante herramientas de simulación una de las antenas más utilizadas en el desarrollo de circuitos impresos (PCBs). Se tomarán como punto de comparación entre ellas los parámetros más relevantes que presentan en general las antenas, con el fin de lograr obtener todos los datos más característicos posibles de esta.

El trabajo está enfocado únicamente en las antenas diseñadas para operar en la frecuencia de los 2,4GHz, ampliamente utilizada para aplicaciones de Bluetooth, Wifi y Zigbee, entre las más relevantes.

Antenas en PCB

Consisten principalmente de pistas de un material conductor, generalmente cobre, trazadas sobre un dieléctrico y las cuales respetan una forma y tamaño particular, los cuales se adaptan según las características del circuito de RF que se necesite. En un PCB la antena se convierte en una estructura bidimensional (2D) en el mismo plano del PCB.

El diseño y uso de antenas trazadas en el mismo cobre de una placa cuyo circuito trabaja en RF tiene varias ventajas: buen rendimiento, bajo costo, tamaño pequeño para frecuencias >900 MHz, y un relativo buen alcance.

Los tipos de antena más utilizadas en este rubro son:

- Bended Monopolar
- Dipolar,
- Meander Antenna
- IFA (Inverted F-type Antenna)
- MIFA (Meandered Inverted F-type Antenna)

La aplicación o no de cada una de estas antenas dependerá desde luego de las características del circuito que desee implementar el diseñador.

Parámetros de las antenas

Empezaremos definiendo lo que consideramos los parámetros más relevantes para definir el comportamiento de una antena:

- Frecuencia
- Longitud de onda
- Impedancia característica
- VSWR
- Ancho de banda de operación
- Porcentaje de ancho de banda
- Eficiencia de radiación
- Intensidad de la radiación
- Directividad
- Ganancia
- Patron de Radiacion

Todos estos parámetros, son los que pondremos en comparación a lo largo de este trabajo.

Frecuencia y Longitud de onda

Como hemos definido previamente, la frecuencia de operación de trabajo de las antenas será de **2,4 GHz**.

Con esto en mente, es posible entonces calcular la longitud de onda de la señal portadora con mediante la siguiente expresión:

$$\lambda \text{ meters} = \frac{2.99792458E8 \text{ m/sec}}{f \text{ (GHz)}}$$

Frecuencia	$\lambda/4$ (mm)	$\lambda/4$ (inch)	λ (mm)	λ (inch)
2.4 GHz	31.2	1.29	124.9	4.92

La antena debe estar construida de elementos conductores cuya longitud combinada es aproximadamente un cuarto de la longitud de onda, que como se ve, depende de la frecuencia de funcionamiento prevista.

Impedancia de entrada de la antena

La impedancia de una antena en un punto particular está dada por la relación entre el voltaje y la corriente en ese punto. Esta impedancia constituye la carga ofrecida por la antena a la línea de alimentación del transmisor y puede ser resistiva pura o de impedancia compleja.

Máxima transferencia de potencia (VSWR)

La relación eléctrica más deseada entre el transmisor y una antena es que la potencia generada en el transmisor sea transferida totalmente a la antena. Para que esto suceda, la entrada de la antena debe estar adaptada a la impedancia característica de la línea de transmisión, la que a su vez se supone que está adaptada a la impedancia de salida del transmisor. En caso de que esto último no se cumpla, lo más recomendado por los fabricantes - y lo que se hace habitualmente en la industria- es utilizar redes de adaptación de impedancia, siendo la más típica la de tipo π .

$$Z_{GENERADOR} = Z_{ANTENA} = Z_0$$

Coefficiente de reflexión

En la práctica, el parámetro más citado en relación con las antenas es el S11. Este parámetro representa cuánta potencia se refleja de la antena, y por lo tanto se conoce como el **coeficiente de reflexión** (también conocido como gamma o **pérdida de retorno**).

En otras palabras, indica cuánta cantidad de decibeles la potencia de la onda reflejada está por debajo de la onda incidente.

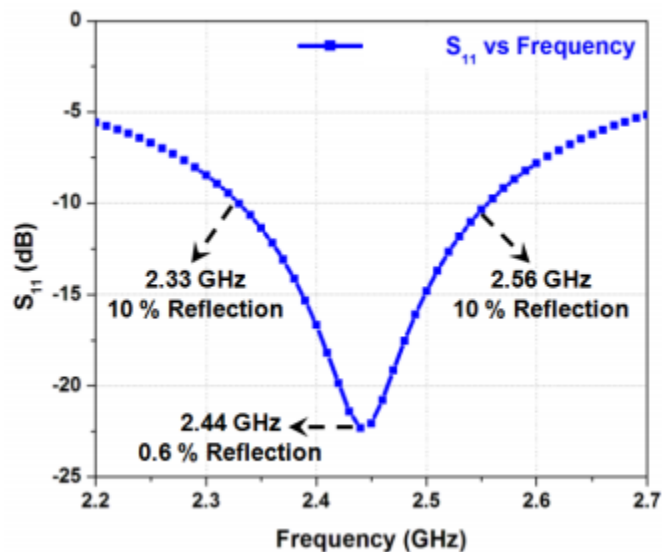
Su expresión matemática en función de la VSWR está dada por

$$S_{11_{dB}} = 20 \log(\Gamma) = 20 \log\left(\frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}\right)$$

Ancho de banda de operación

En una antena el ancho de banda se refiere a la respuesta en frecuencia. Indica la adaptación de dicha antena a la línea de transmisión sobre toda la banda de interés. En el caso de la antena en la que se basa este trabajo la banda de interés es de 2.3 GHz a 2.6 GHz.

En el siguiente gráfico del S_{11} de una antena con respecto a la frecuencia como la reflexión se reduce a un mínimo en el centro de la banda de interés. De dicho gráfico se puede obtener el ancho de banda de la antena.



Porcentaje de Ancho de Banda

Se define como la relación entre el ancho de banda y la frecuencia central de operación.

Da una idea de que tan ancha es la banda de transmisión con respecto a la ubicación de la frecuencia central

Eficiencia de Radiación

En una antena una porción de la energía entrante (que no fue reflejada) es disipada en forma de calor como pérdida térmica de la antena. Esta pérdida térmica ocurre por pérdidas en el dieléctrico y en la pérdida en el conductor de la traza. Para una antena como la de este trabajo siendo un PCB de pequeño tamaño la pérdida por calor es mínima.

$$\eta_e = \frac{Prad}{Pin}$$

Intensidad de la radiación

Se define como intensidad de radiación, al máximo de radiación posible en una cierta dirección que emite cierta antena.

Directividad

En una antena que no es isotrópica la intensidad de radiación está concentrada en una cierta dirección. Por eso se define como la relación entre la intensidad de radiación de la antena en una cierta dirección contra la intensidad de una antena isotrópica que irradia la misma potencia total. La directividad puede calcularse para cualquier dirección siendo lo usual calcularse en la dirección del lóbulo principal.

$$D = \frac{\text{Máxima potencia Irradiada en cierta dirección}}{\text{Intensidad de Radiación antena Isotrópica}}$$

Ganancia

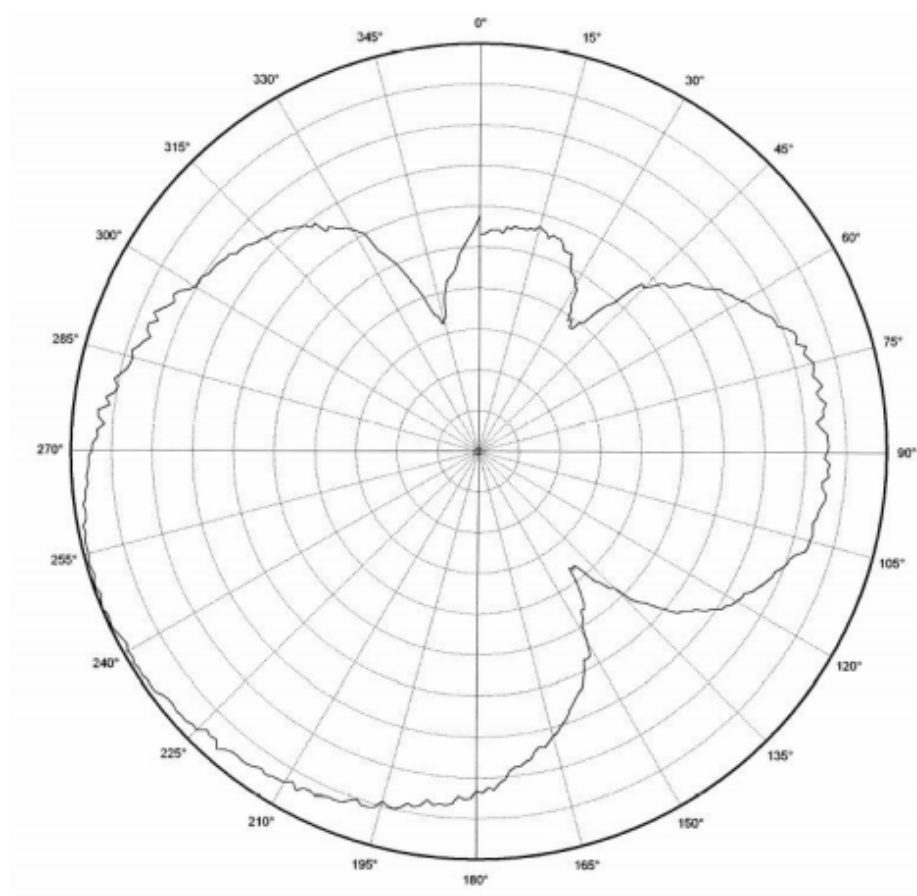
Es la relación entre la intensidad de radiación de la antena en una cierta dirección contra la intensidad de una antena isotrópica que a la que le ingresa la misma potencia.

Se diferencia de la directividad en que tiene en cuenta las pérdidas que ocurren en la antena. Por lo tanto es dependiente de la eficiencia.

$$G = \eta_e D$$

Patrón de Radiación

La energía irradiada por una antena se representa en un Diagrama de radiación que representa la distribución de energía en el espacio en función de la dirección.

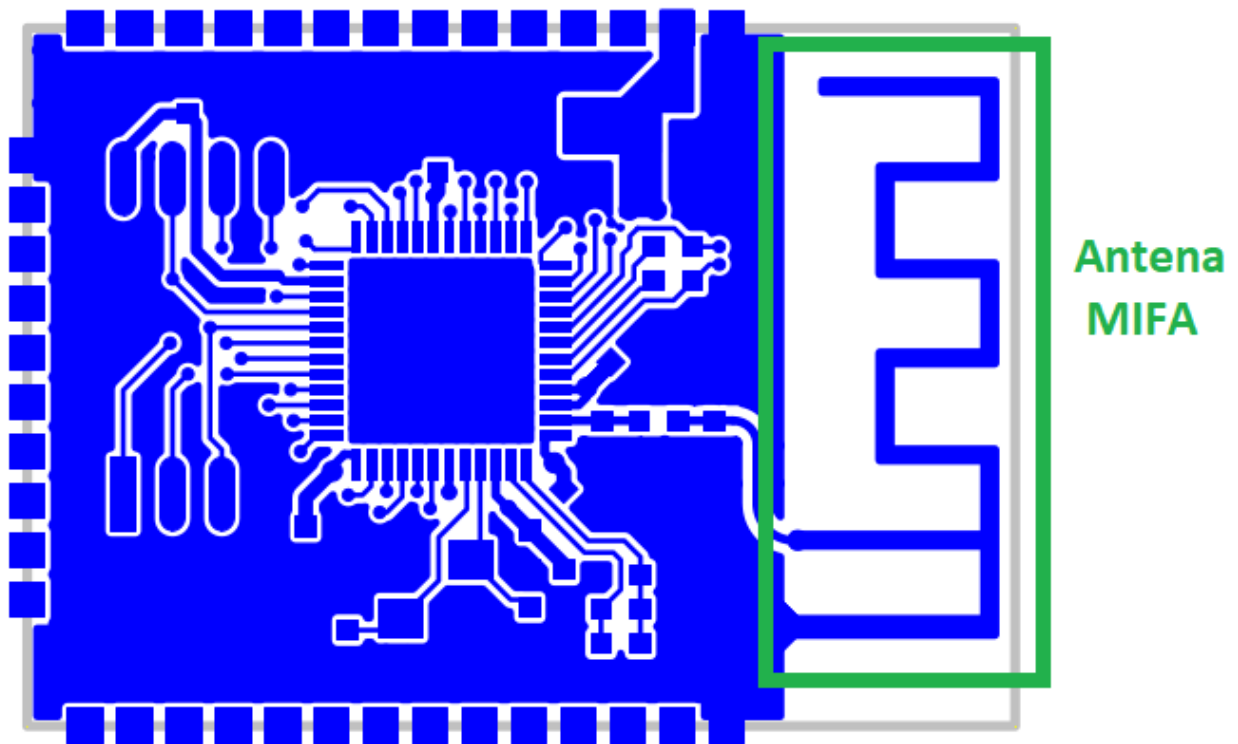


Simulación

A continuación presentaremos los resultados obtenidos de las distintas simulaciones que hemos llevado a cabo.

Meandered Inverted F Antenna (MIFA)

Las “Meandered Inverted F Antenna” se utilizan ampliamente en dispositivos inalámbricos compactos donde el espacio es escaso. Esto incluye teléfonos móviles, tablets y cualquier otro dispositivo similar que use transmisiones inalámbricas como GSM, Bluetooth y Wi-Fi. Su implementación también pueden verse en la placa de desarrollo del microcontrolador ESP32, funcionando como antena para la portadora de 2,4GHz necesaria para la comunicación WIFI.



Ejemplo de implementación de la antena MIFA

Diseño de la antena

Basamos todo el diseño de esta antena en la siguiente [hoja de datos de Texas Instrument](#).

En esta, el fabricante asegura distintas propiedades con las que ya cuenta la antena, como por ejemplo que por su forma la antena ya cuenta con una impedancia de 50Ω a 2,4GHz, y por lo tanto, no haría falta ninguna red de adaptación extra necesaria. Veremos más adelante que esto no es tan así.

El diseño en cuestión que seguimos de la placa es el siguiente:

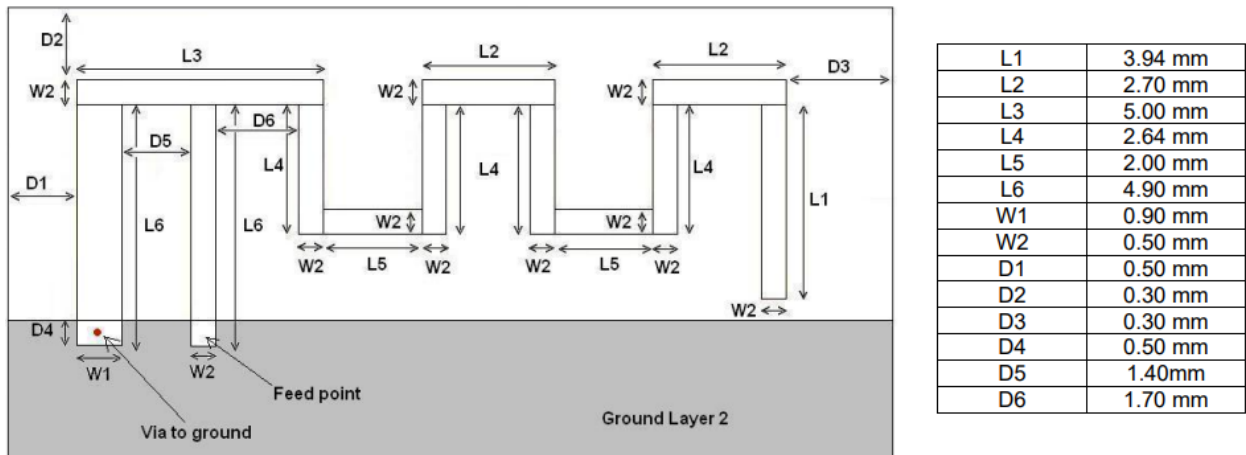


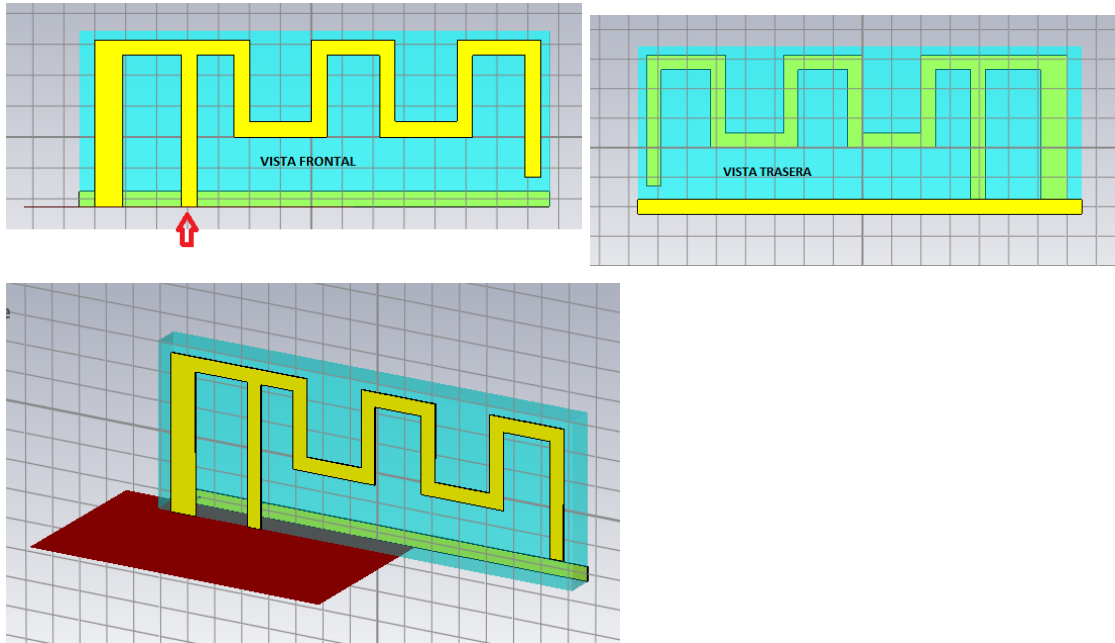
Figura A - Dimensiones de la antena

Es importante tener en cuenta que pequeños cambios en las dimensiones de la antena pueden tener un gran impacto en el rendimiento. Por lo tanto, el fabricante recomienda hacer una copia exacta del diseño de referencia para lograr un rendimiento óptimo a la hora de implementarlo en cualquier PCB. El grosor y el tipo de material de las pistas, el del material dieléctrico que se usó como sustrato, su permitividad eléctrica, y otros detalles como estos son factores que también se deben respetar en orden de que la antena funcione correctamente.

Implementación en CST STUDIO

A continuación empezaremos mostrando el primer diseño de la antena sobre un sustrato de FR-4, acompañado lógicamente del resultado de su simulación.

Primer diseño



Como se puede observar en la imagen anterior, se implementó la antena con todas sus dimensiones tal cual lo especificado por el fabricante.

El punto de entrada de la señal es el marcado por la flecha roja en la imagen anterior, siendo este entonces, el puerto de la antena.

Se implementó en un sustrato FR4 con un ϵ_r de 4.6 y un espesor de 1mm.

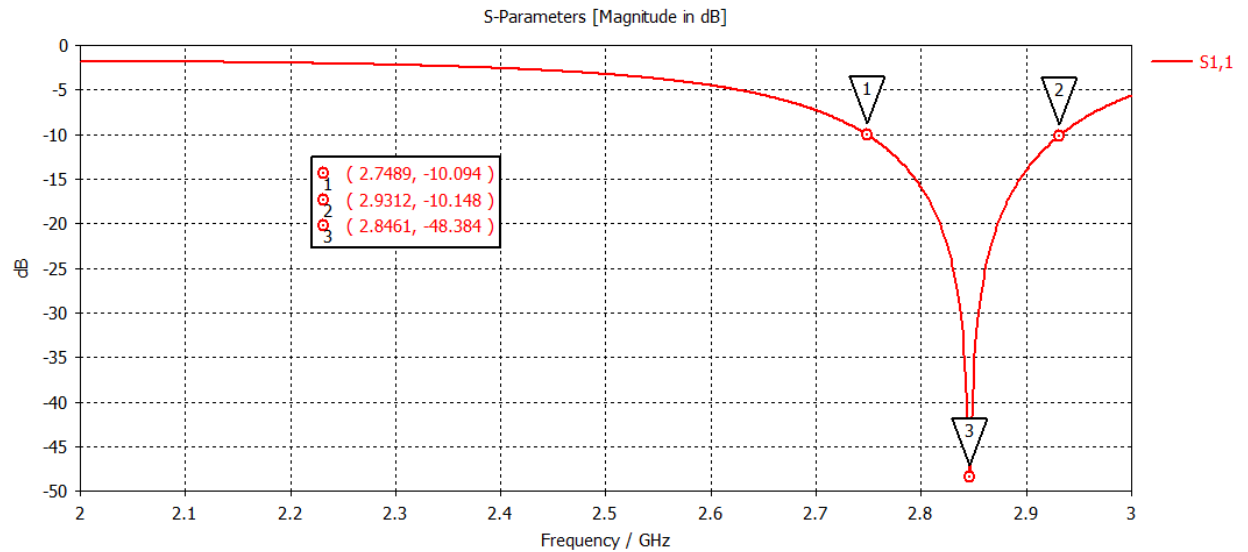
Como material conductor se utilizó Cobre con pérdidas con un espesor de 35 μ m.

Por el modo de funcionamiento del Simulador, se debió implementar un puerto de entrada de Guia de Onda con un tamaño más grande que la sección de cobre que forma la línea de transmisión planar por donde debe entrar la señal. El tamaño de este puerto se calcula con un macro provisto por el simulador el cual provee una constante con la que se debe escalar el puerto. Con esto se reduce al 1% el error en la simulación de impedancia.

Resultados de la primera simulación

Pérdida de retorno (S_{11} _{dB})

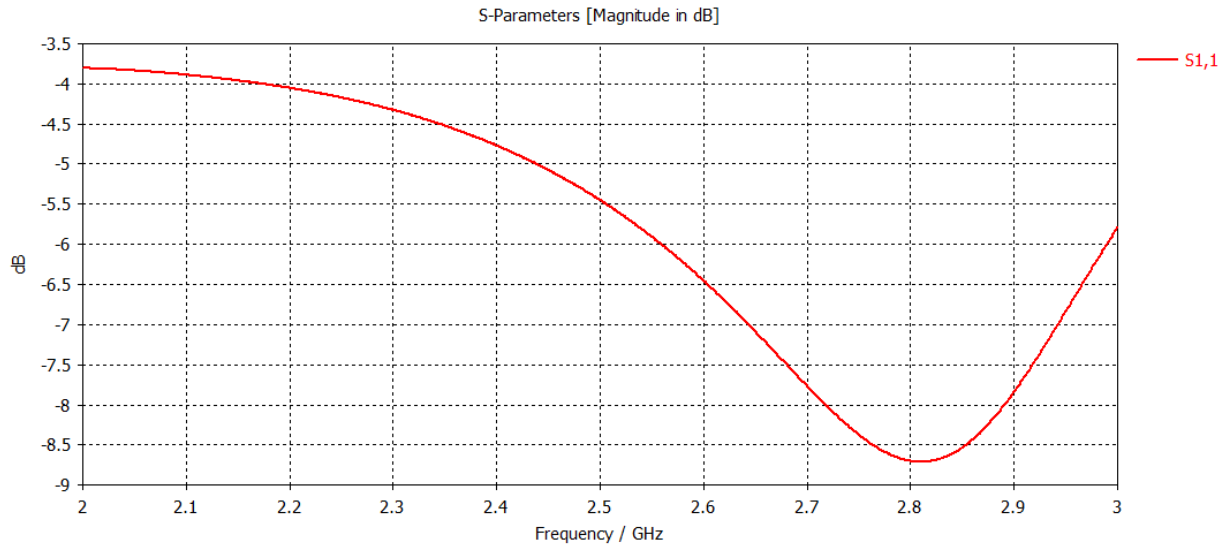
Los resultados de la pérdida de retorno simulada y medida se muestran en la figura a continuación.



Se puede observar que hay una notable caída en la pérdida de retorno teniendo en el mínimo (-48db) la frecuencia de 2.84Ghz (esta frecuencia está un poco lejos de lo que el fabricante asegura (2.4Ghz)).

Así mismo se debe mencionar que este gráfico de S_{11} está normalizado para una impedancia de 23 Ω dado que en esta impedancia es la que se obtuvo la mejor respuesta desde el punto de vista de pérdida de retorno.

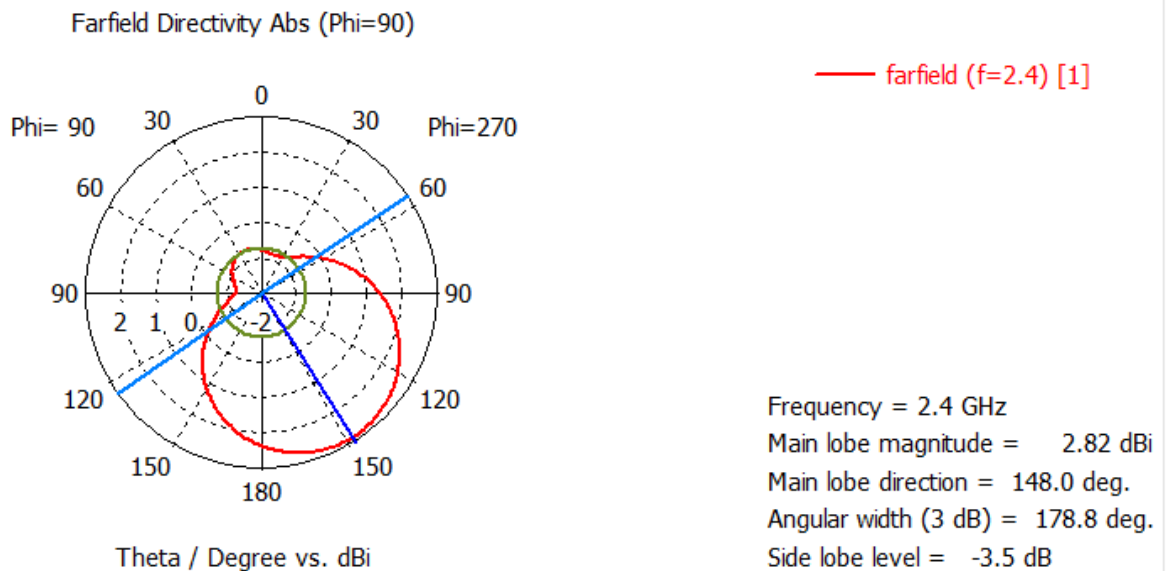
Para una normalización de 50 Ω se puede apreciar en el siguiente gráfico cómo se degrada la respuesta.



De esta diferencia se concluye que la impedancia característica de la antena no es 50Ω como indica el fabricante.

Patrón de radiación

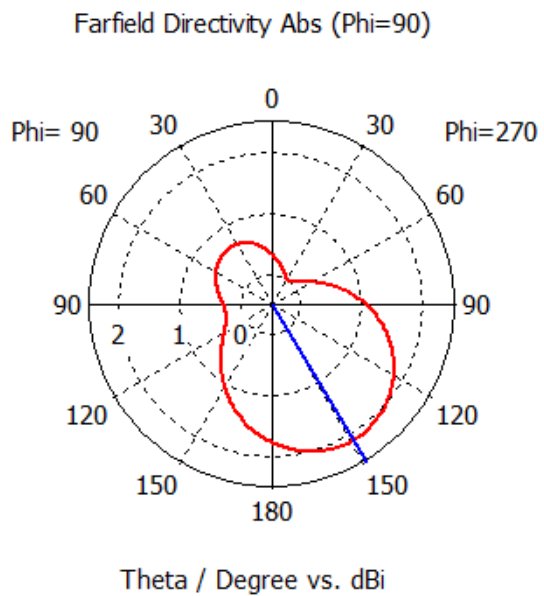
La simulación de la antena arrojó como resultado los siguientes diagramas de radiación para 2.4Ghz:



Se verifica que para esta frecuencia tiene un lóbulo principal con 2.82dbi de ganancia y un lóbulo trasero de -3.5dB.

El ancho del lóbulo principal es de $178,8^\circ$.

Para 2.85Ghz



— farfield (f=2.85) [1]

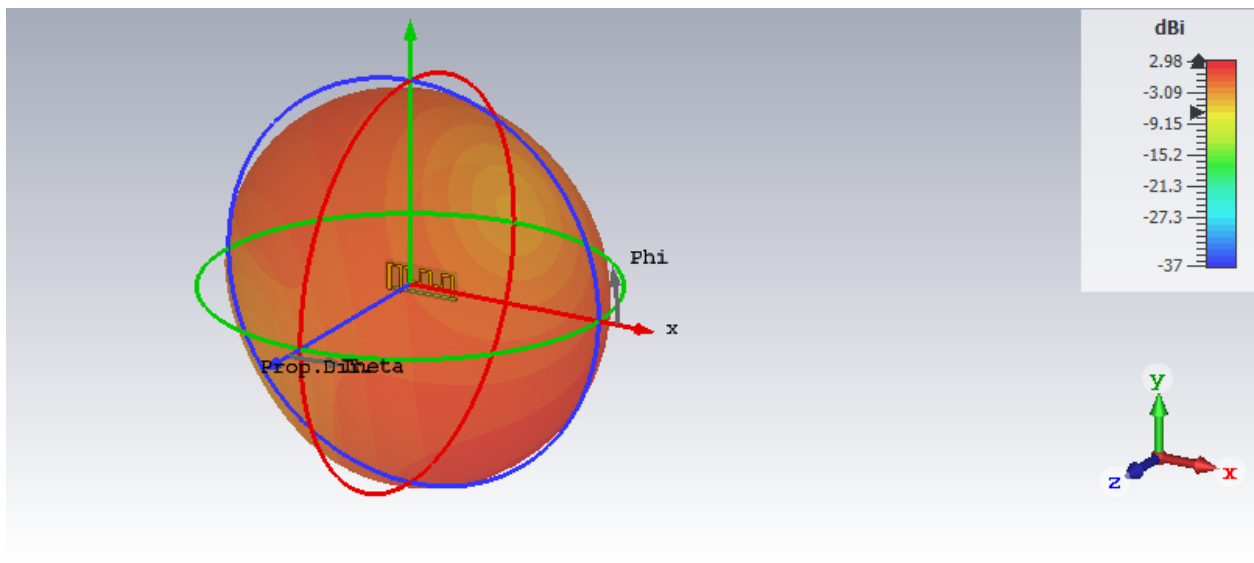
Frequency = 2.85 GHz

Main lobe magnitude = 2.08 dBi

Main lobe direction = 149.0 deg.

Se verifica que si bien la respuesta en pérdida de retorno es mucho mejor para 2.85, la directividad es mejor a 2.4Ghz.

Visto en 3D el patrón de radiación tiene la siguiente forma:



Diseño final

Como hemos mencionado anteriormente, en estos tipos de diseños todos los detalles son importantes dado que un pequeño cambio en alguno de los tamaños de la antena pueden ocasionar comportamientos completamente diferentes a los esperados. Esto mismo es lo que nos estaba pasando en el diseño anterior, y a continuación, pasaremos a explicar los cambios hemos llevado a cabo en la antena con el fin de poder obtener la respuesta esperada.

Mejoras hechas

Se tomó como base lo hecho hasta el momento y nos dispusimos a cambiar algunos de los parámetros más relevantes, como el ancho del dieléctrico, su permitividad eléctrica, e incluso el largo de la antena.

Para empezar, si se mide la longitud total de la antena con los valores propuestos en la Application note de Texas, dicho valor es distinto al que se esperarí en una antena de 2,4 GHz - El largo es de 30.0264mm -> 2.5Ghz-.

Por eso, partimos desde lo que se propone desde la teoría, y rediseñamos el largo total de para que cumpla con un largo total igual al $\lambda/4$. Es decir, 31.2mm -> 2.4GHz. Los demás parámetros mencionados para este caso se dejaron intactos.

El resultado de la simulación, como se puede ver, presentó una mejora en la respuesta:

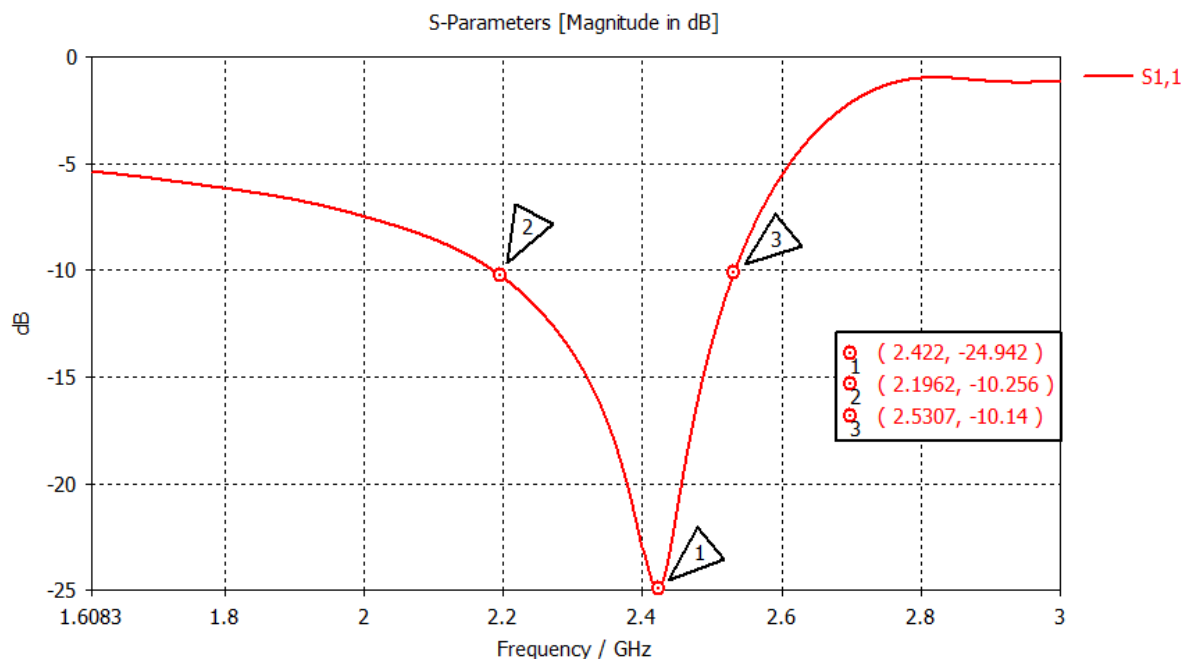


Figura B - S11 antena cuya longitud es igual a $\lambda/4$.

En la figura B se puede observar la respuesta en frecuencia de la antenna rediseñada. Cabe aclarar, que a diferencia de las simulaciones anteriores, en esta se normaliza todo a 50Ω , tal como era de suponerse.

Para este caso se ve que hay una caída en el coeficiente de reflexión en la frecuencia de 2.422GHz, cuyo valor se corresponde a un mínimo de casi -25dB.

Si bien de por sí este ya es un resultado satisfactorio para los fines de este trabajo, nos propusimos modificar ahora los demás parámetros de la antenna que antes había quedado intactos, con el fin de poder observar cómo este variaba y, en el mejor de los casos, conseguir también una mejor respuesta.

Variando el ancho del material FR4-TG, de 0.5 a 0.6 -ancho standard mínimo en pcbway.com, en dónde se garantiza que el precio seguirá siendo el mínimo- y pasando a una permitividad eléctrica de 4.6 a 4.4 -valor del ϵ_r del FR4-TG 130-, se obtuvieron estos resultados:

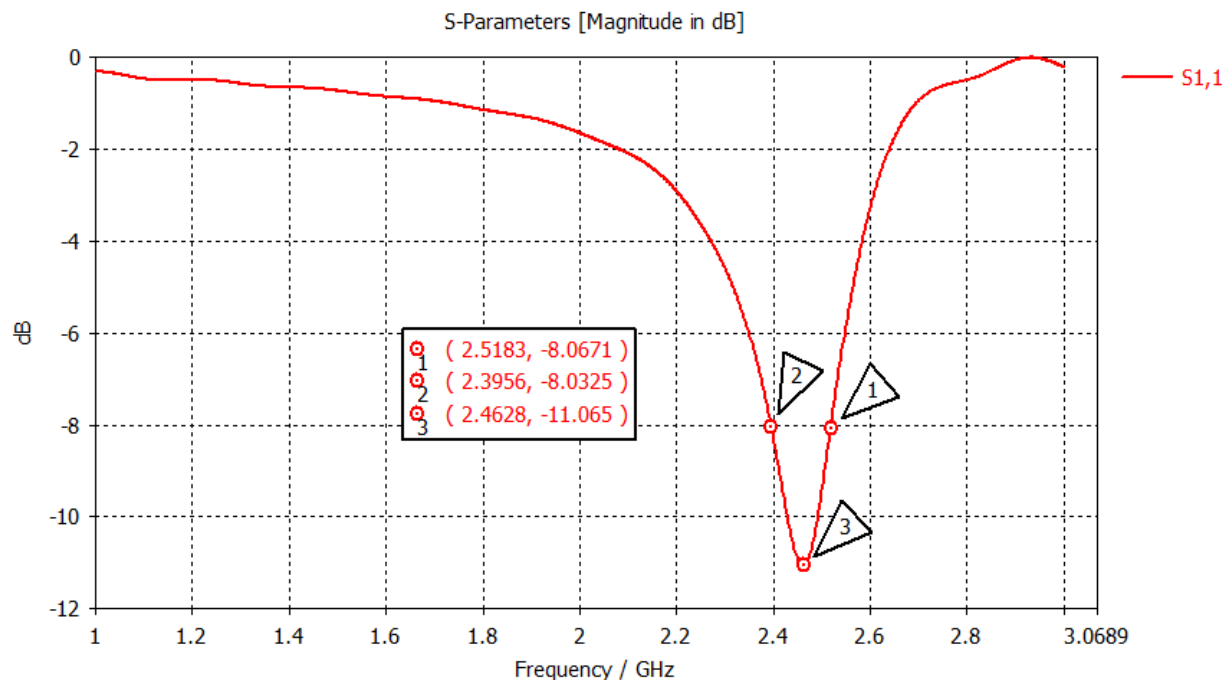


Figura C - S11 de la antenna con parámetros “reales”

Para el caso de la Figura C, se ve que hay un mínimo en la caída del coeficiente de reflexión en la frecuencia de 2.46GHz, cuyo valor se corresponde a -11dB.

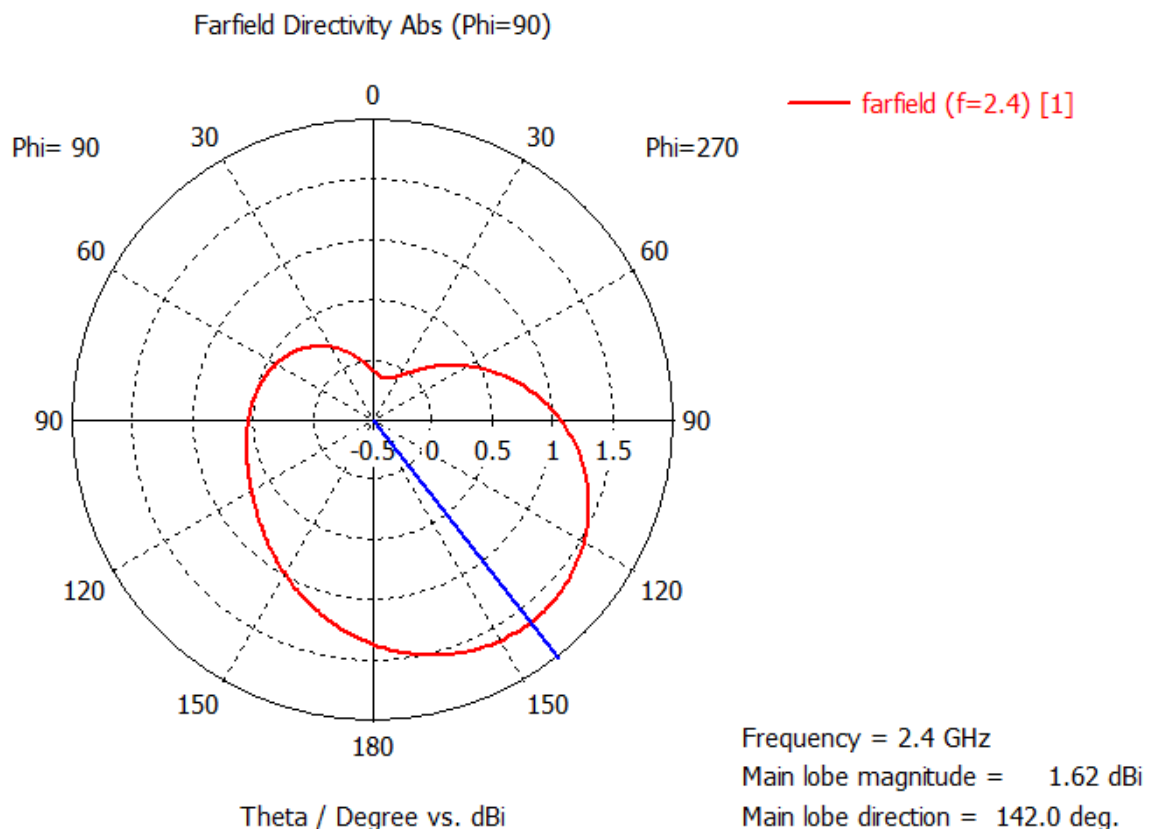
Se pueden ver varias diferencias entre los resultados obtenidos acá con los de la figura B, siendo dos los más destacables:

- Se tiene un S11 más plano fuera del ancho de banda, lo que se traduce en un mejor rechazo de todas esas frecuencias respecto de la sintonía.

- La frecuencia donde se da el mínimo del S11 está más cerca de los 2.45GHz respecto al de la figura B, aunque con una pérdida en dB considerable. Para este caso, el S11 llega a un mínimo de -11db en comparación con los casi -25dB de la simulación anterior. Este valor de la figura C, sin embargo, se asemeja a lo obtenido en distintas Application notes ([AN Texas - página 3](#), [AN NXP - página 10](#), entre otros que se pueden citar).

Radiación

La simulación de la antena arrojó como resultado los siguientes diagramas de radiación para 2.4Ghz:



Se verifica que para esta frecuencia tiene un lóbulo principal con 1.62dbi de ganancia y un lóbulo trasero de -3.5dB.

La dirección del lóbulo principal se encuentra a 142°.

Curiosamente, se puede ver que la mínima radiación se encuentra ubicada a 0° de la antena.

Diagrama de Smith

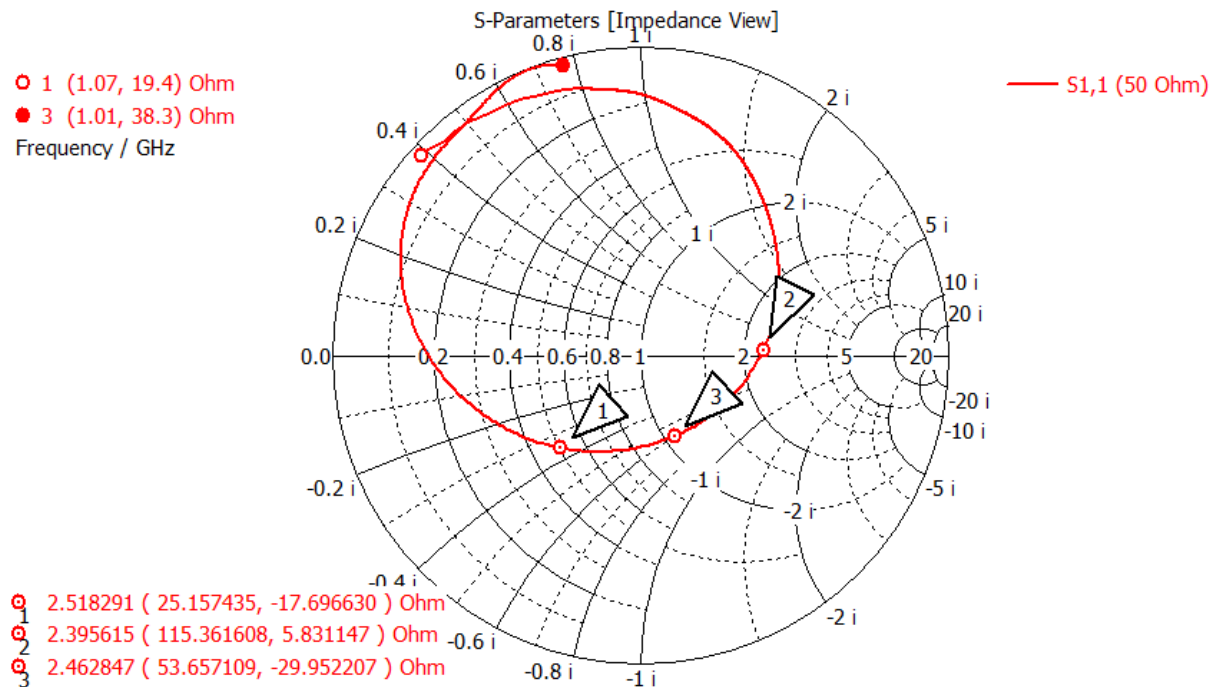


Figura D - Diagrama de Smith de la antena de la figura C

Se puede observar mediante el diagrama de Smith que la impedancia que presenta la antena en la frecuencia deseada es de $Z_{in} = 53.66 - 29.95i$. Esto es importante a tener en cuenta cuando se esté diseñando la red de adaptación conectada a la entrada de esta.

Recomendaciones básicas para futuros diseños

En base a todo lo aprendido durante el desarrollo de este trabajo y de los resultados que fuimos obteniendo, estamos en condiciones de poder dejarle al lector algunas recomendaciones y pasos a seguir antes de incursionar en la simulación e implementación de cualquier tipo de antena en PCB:

- **Todo afecta al comportamiento final.**

Ancho del dieléctrico, permitividad eléctrica, tamaños de las vías, plano de GND bien ubicado, forma en la que se conecta el puerto, etc.

Es por eso que recomendamos primero definir los parámetros más básicos desde el comienzo, como el tipo de dieléctrico que se va a utilizar de sustrato y el ancho

posible de este que ofrece el fabricante, el tamaño del pcb y de las vías que se van a usar,

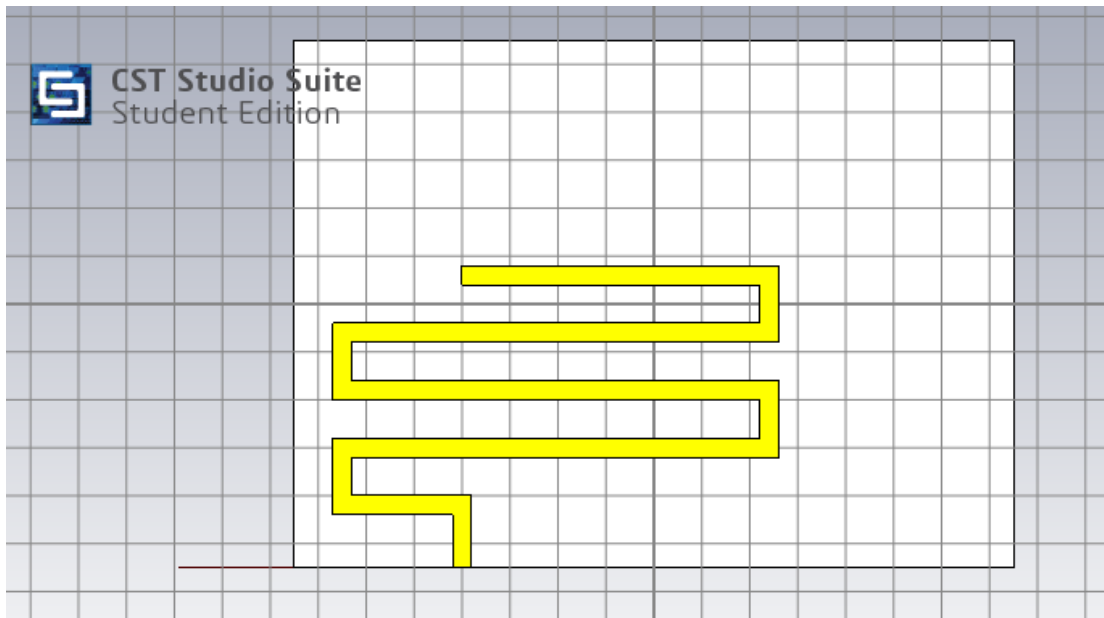
- **Usar las medidas que los fabricantes dan como un punto de partida, pero sabiendo que estas no son definitivas.**

Como se pudo ver anteriormente en este trabajo, los resultados que nosotros obtuvimos fueron diferentes a los dados por la nota de aplicación, siendo el diseño exactamente el mismo. Esto también viene de la mano de que los parámetros que uno maneja (y que, como aclaramos en el punto anterior, definió al comienzo del diseño) es casi seguro que van a ser diferentes a los que el fabricante probó. Es por esto que recomendamos tener los valores que da el fabricante como referencia, y en caso de que no tenga el comportamiento deseado, modificarlos con algún criterio que considere conveniente.

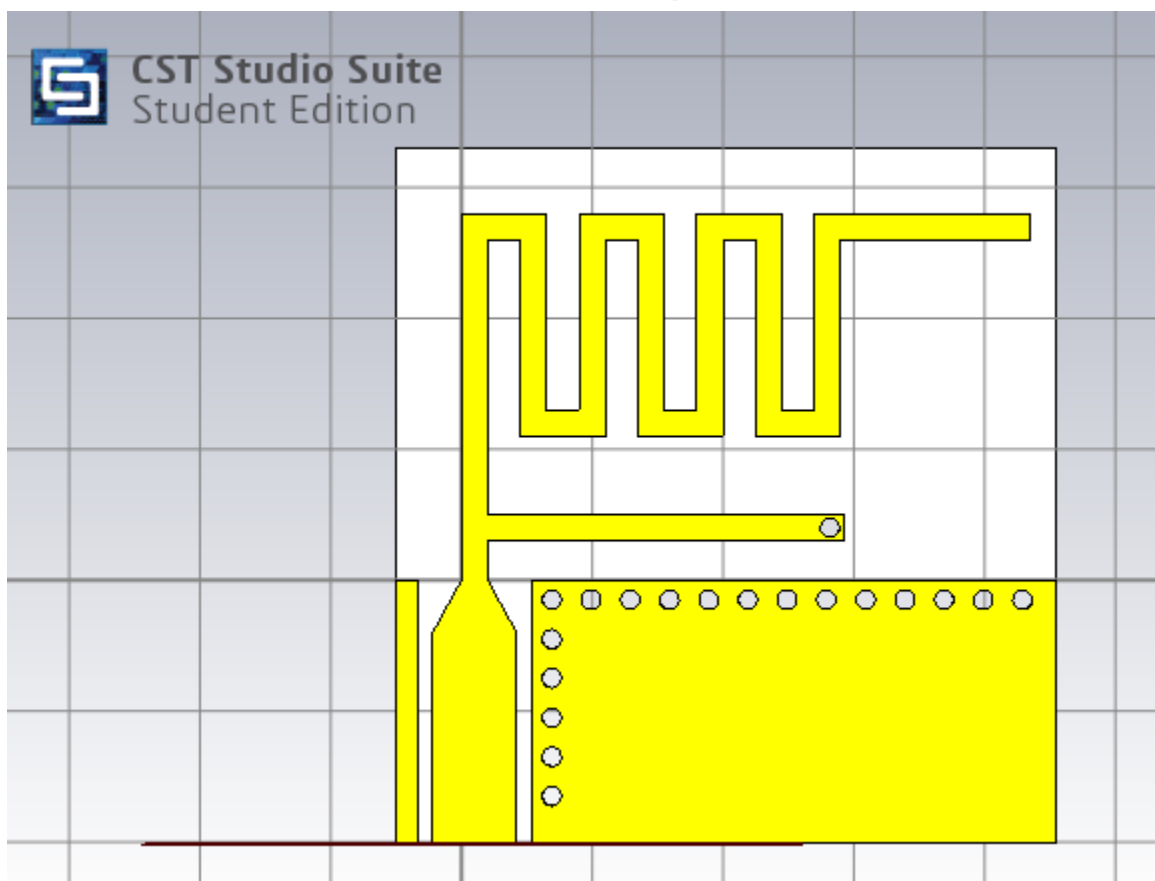
- **No quedarse con un solo diseño.**

En este trabajo sólo analizamos un tipo de antena en particular, la MIFA, pero se podría conseguir el mismo resultado o mejor con otros tipos de antena. Les dejamos a continuación imágenes de algunos de los diseños que estuvimos probando y que no llegamos a agregar al informe:

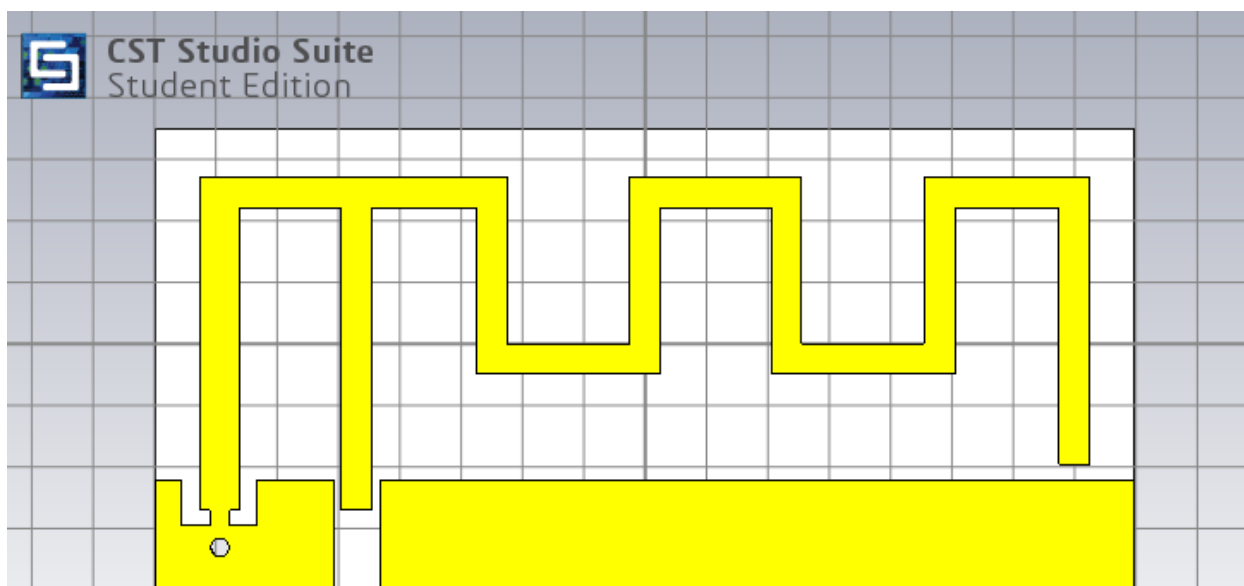
Meandered Antenna



MIFA ANTENNA - Usada en la placa del ESP8266



MIFA ANTENNA - Valores recomendados en la web



Esta última antena fue diseñada según las medidas de una página que asegura que son las mismas que las del ESP32. [Página GITHUB con el diseño.](#)

Es importante para nosotros aclarar que luego de ver que los resultados que arrojaba la simulación de este diseño estaban lejos de ser lo que se aseguraba, desistimos en su posterior investigación y nos enfocamos directamente en el diseño dado por Texas Instrument.

Conclusiones

En este proyecto, se llevó a cabo el análisis de la antena tipo MIFA implementada para la placa del ESP32. Uno de los principales problemas al nos enfrentamos fueron la falta de información al respecto del diseño de esta antena, particularmente de sus dimensiones y del tipo del sustrato en el que se encontraba -es decir, el tipo y grosor del dieléctrico, los cuales son factores claves para su correcto funcionamiento. Esto nos llevó a buscar diseños similares y adaptarlos a los requerimientos que nosotros necesitábamos. Con los conceptos básicos de funcionamiento de antenas y con las limitaciones que dan los fabricantes de placas, hemos podido llegar a un resultado de una antena funcional.

Referencias

- [Small Size 2.4 GHz PCB antenna](#)
- [QN908x BLE Antenna Design Guide](#)
- [Antenna Design and RF Layout Guidelines](#)
- [The study and implementation of meander-line antenna for an integrated transceiver design.](#)