

Capítulo 6: Resultados experimentales

En este capítulo se reportan los resultados experimentales obtenidos para las antenas diseñadas y construidas utilizando el analizador vectorial de red WILTRON 360B cuyo uso fue facilitado por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE). Los resultados experimentales se presentan junto con los simulados con guía de onda ideal así como con la estructura SIW a manera de comparación. En la figura 6.1 se muestra el analizador vectorial de red.



Figura 6. 1 Analizador vectorial de red WILTRON 360B

6.1 Antena a 2.4 GHz

En esta sección se muestran las estructuras diseñadas para la construcción de la antena de 2.4 GHz así como los resultados obtenidos.

Guía de onda

En la figura 6.2 se presenta la guía de onda construida con una frecuencia de corte $f_c = 1.5$ GHz. Se creó la estructura de la guía de onda y para la transición en forma de *taper* se utilizó *copper tape* que (cintas de cobre con pegamento conductor). Se utilizó *copper tape* para optimizar la transición reduciendo el tamaño al irse cortando para obtener unas dimensiones óptimas y compararla con la simulación. En la figura 6.2 se pueden observar las dos transiciones realizadas para obtener la respuesta de la estructura así como las medidas del largo del *taper* (L_t) y el ancho del *taper* (W_t).

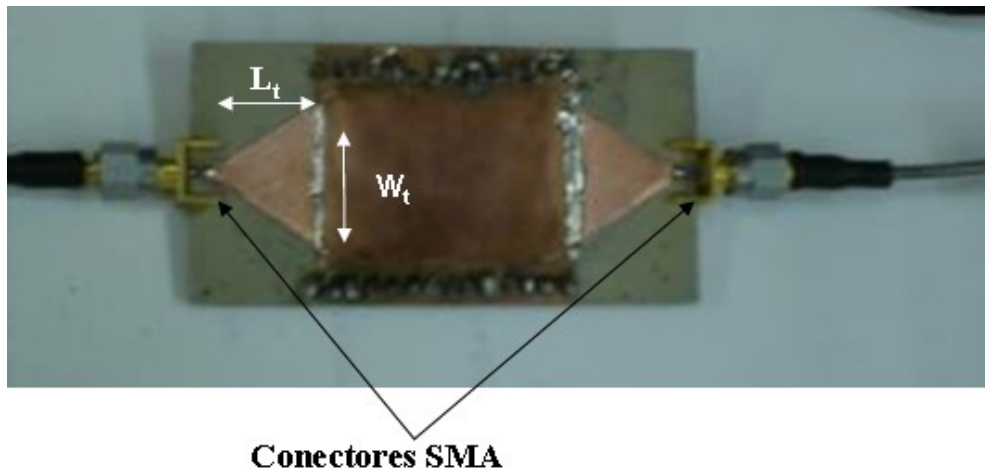


Figura 6. 2 Guía de onda con *copper tape*.

En las figuras 6.3 y 6.4 se muestran los resultados para la guía de onda con el tamaño antes de la optimización (de extremo a extremo de la estructura) obtenidos experimentalmente así como en simulación de los parámetros S_{11} y S_{21} de la guía de onda respectivamente. La línea continua (azul) corresponde a los valores encontrados

experimentalmente mientras que la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación. Las dimensiones del *taper* en este caso son $L_t = 1.55$ cm y $W_t = 3$ cm (figura 6.2).

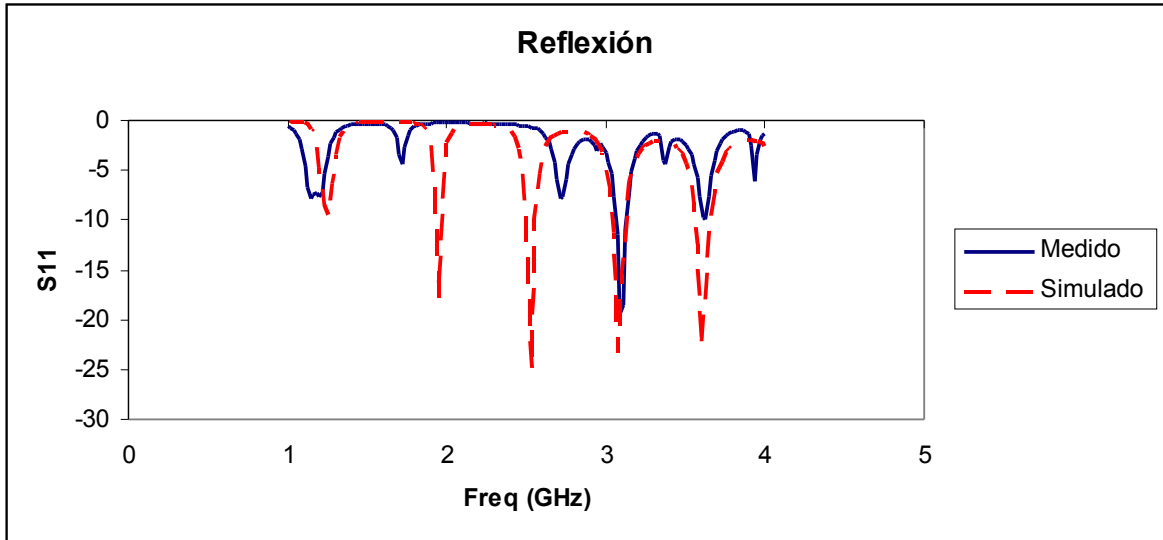


Figura 6. 3 Parámetro S_{11} de la guía de onda.

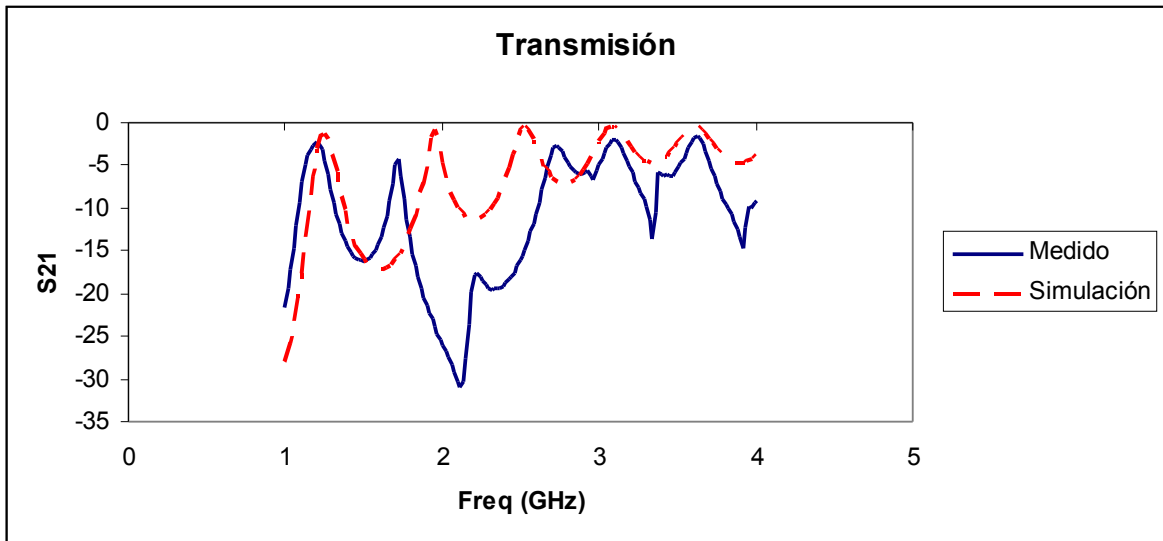


Figura 6. 4 Parámetro S_{21} de la guía de onda.

De los resultados anteriores se puede apreciar que el acoplamiento a la frecuencia de 2.4 GHz no es bueno pues el valor del parámetro S_{11} obtenido experimentalmente fue de

-0.376dB en el valor medido. En el caso del parámetro S_{21} se encontró un valor de -18.673 dB en el resultado experimental.

En las figuras 6.5 y 6.6 se muestran los resultados de simulaciones así como experimentales de los parámetros S_{11} y S_{21} de la misma guía de onda con las dimensiones del *taper* óptimas para la frecuencia de resonancia de 2.4 GHz respectivamente. En dichas figuras la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente mientras que la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación. Las dimensiones optimizadas tuvieron un valor de $L_t = 1.55$ cm y $W_t = 6$ mm (figura 6.2).

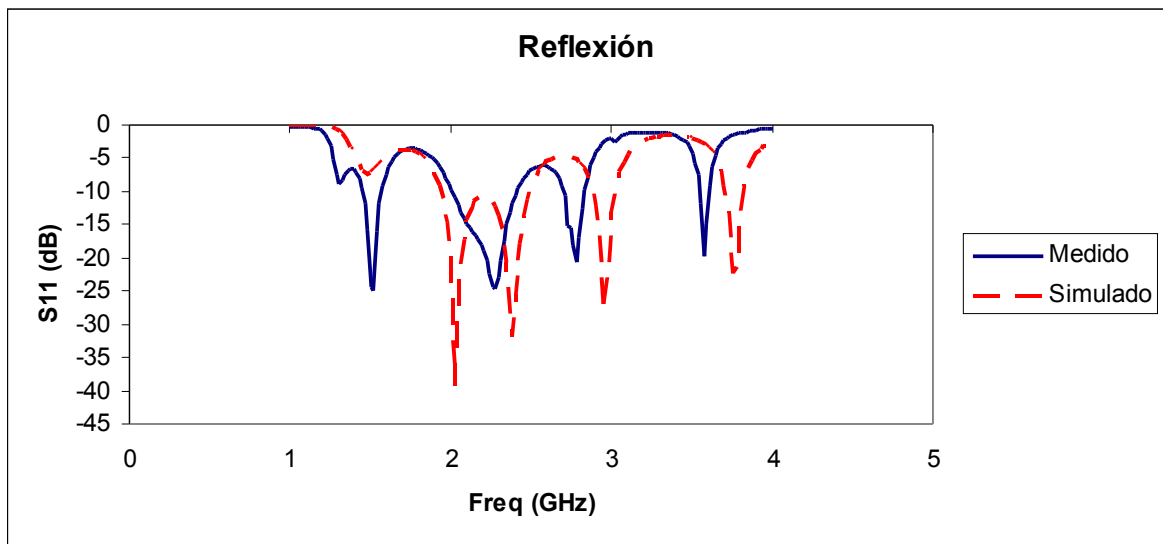


Figura 6. 5 Parámetro S_{11} para la SIW construida.

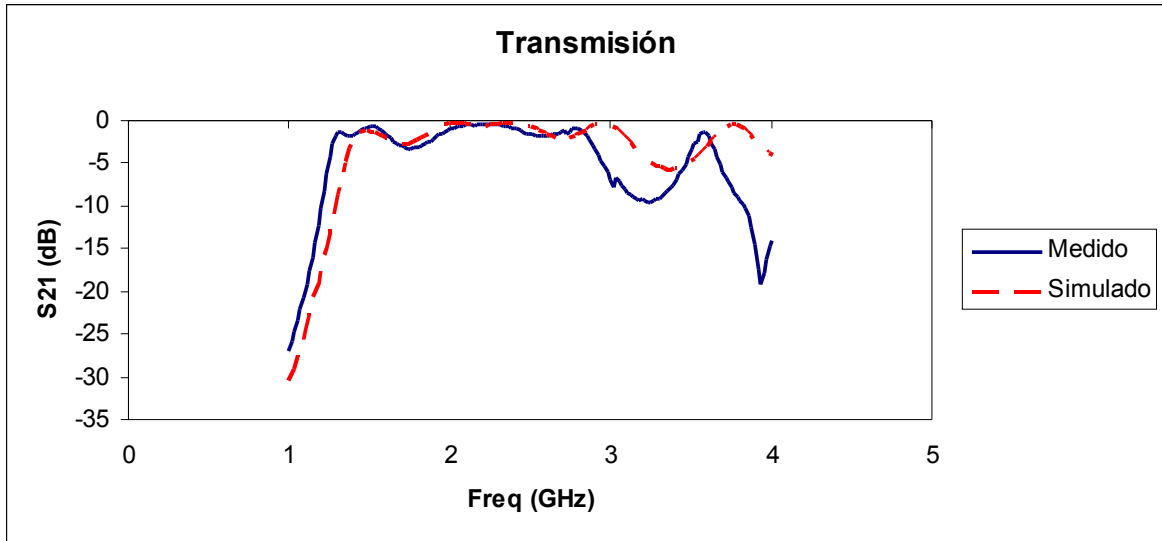


Figura 6. 6 Parámetro S_{21} para la SIW onda construida.

Se puede apreciar que los resultados experimentales son muy parecidos a los encontrados en las simulaciones y se observa que se tiene un muy buen acoplamiento para la frecuencia de resonancia buscada de 2.4 GHz, ya que para dicha frecuencia, el valor del parámetro S_{11} es de -25.57 dB simulado y de -20.211 en el medido aunque ligeramente desplazado hacia una frecuencia inferior aproximadamente a 2.314 GHz (una variación de 0.086 GHz). Por su parte, el parámetro S_{21} tiene un valor de -0.2 dB simulado y -0.498 dB medido. El desplazamiento hacia una frecuencia inferior se debe principalmente a las imperfecciones en el proceso de fabricación así como a la utilización de *copper tape* para la transición en forma de *taper* que genera imperfecciones al no se una capa de cobre contenida en el substrato.

Radiación en el *slot*

En las figuras 6.7 y 6.8 presentan la estructura SIW únicamente con apertura así como los resultados obtenidos para la radiación del *slot* de forma experimental y se comparan los

resultados con las frecuencias de resonancia encontradas en la simulación. En la figura 6.8 la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente mientras que la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación.

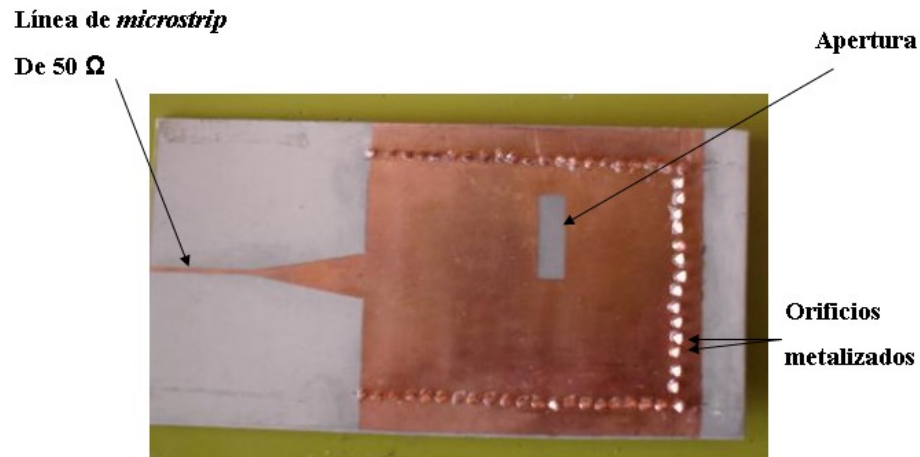


Figura 6. 7 Estructura SIW medida para observar la radiación en el *slot*

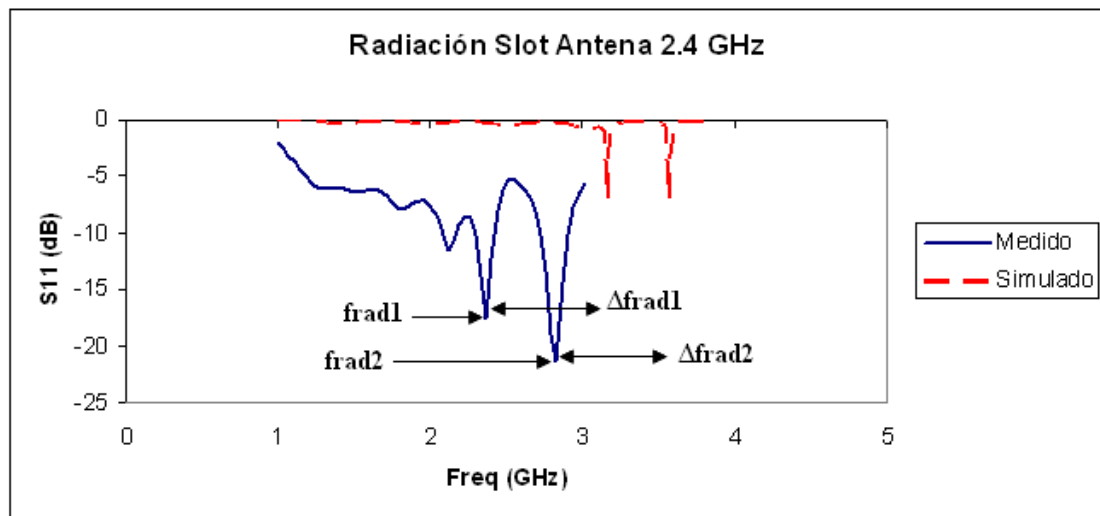


Figura 6. 8 Parámetro S_{11} medido y simulado para la estructura con *slot*.

En la figura 6.8 se muestra la primera frecuencia de radiación del *slot* (f_{rad1}), la segunda frecuencia de radiación del *slot* (f_{rad2}) y la variación de dichas frecuencias con respecto a las frecuencias de radiación obtenidas en las simulaciones (Δf_{rad1} y Δf_{rad2} , respectivamente). Se puede apreciar que el parámetro S_{11} obtenido en los resultados experimentales tiene la

misma forma que la respuesta obtenida en la simulación aunque desplazada hacia frecuencias inferiores. En los resultados de la simulación obtenidos en el capítulo 5 se tuvieron las dos frecuencias de radiación del *slot* a 3.16 GHz y 3.57 GHz. En los resultados experimentales se encontró que la primera frecuencia de resonancia radiada por el *slot* (f_{rad1}) se encontraba en 2.368 GHz, lo que genera una diferencia (Δf_{rad1}) en relación con la frecuencia de simulación a 3.16 GHz de 0.792 GHz. De manera experimental se encontró un valor para la segunda frecuencia de resonancia radiada por el *slot* de 2.836 GHz que en comparación con la encontrada en la simulación de 3.57 GHz genera una diferencia (Δf_{rad2}) de 0.734 GHz. A su vez se aprecia que se tienen menos pérdidas de reflexión para dichas frecuencias de manera experimental ya que para la frecuencia de resonancia 1 se obtuvo un valor mínimo del parámetro S_{11} de -17.495 dB mientras que en el caso de la simulación se obtuvo un valor de -7.04 dB. En el caso de la segunda frecuencia de resonancia, en los valores experimentales se obtuvo un valor de -21.34 dB mientras que en los resultados de la simulación se obtuvo -6.97 dB. Las variaciones entre los parámetros experimentales y simulados se deben a las tolerancias de manufactura, tolerancias en la permitividad eléctrica y altura del substrato utilizado, efectos por los conectores y soldadura que no se consideraron en las simulaciones.

Antena de 2.4 GHz

En las figuras 6.9, 6.10 y 6.11 se muestran la estructura completa de la antena y el posicionamiento óptimo sobre la guía de onda así como su respuesta experimental en comparación con los resultados hallados en las simulaciones respectivamente. En la figura 6.11 la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente,

la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación con guía de onda ideal y la línea entrecortada con puntos (verde) corresponde a los valores de la simulación con SIW.

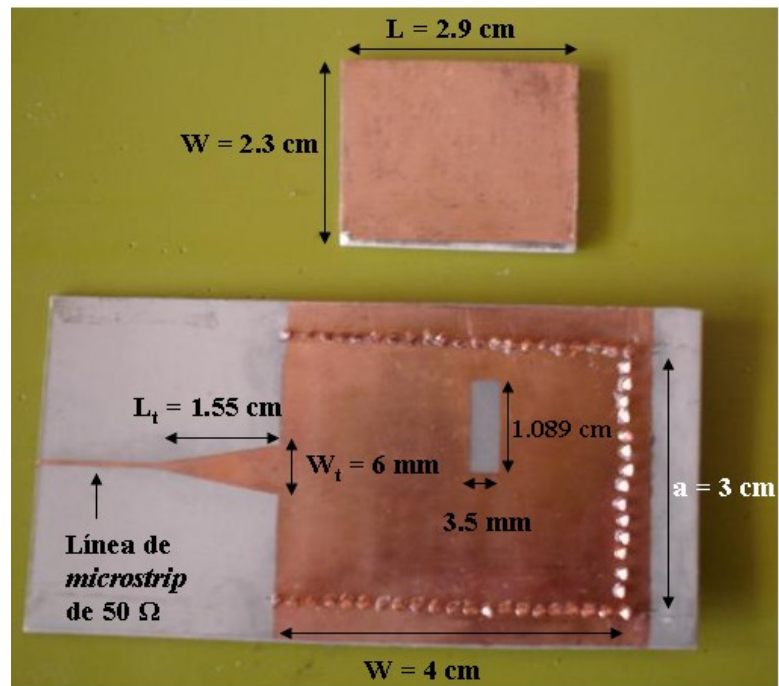


Figura 6. 9 Estructura completa de la antena de 2.4 GHz con SIW.

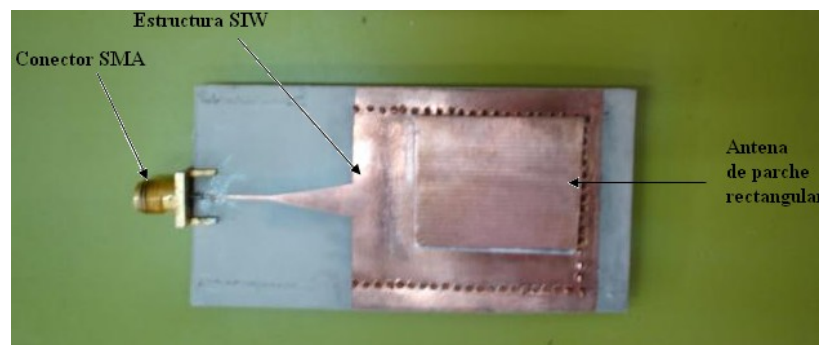


Figura 6. 10 Estructura final con posición óptima de la antena para 2.4 GHz.

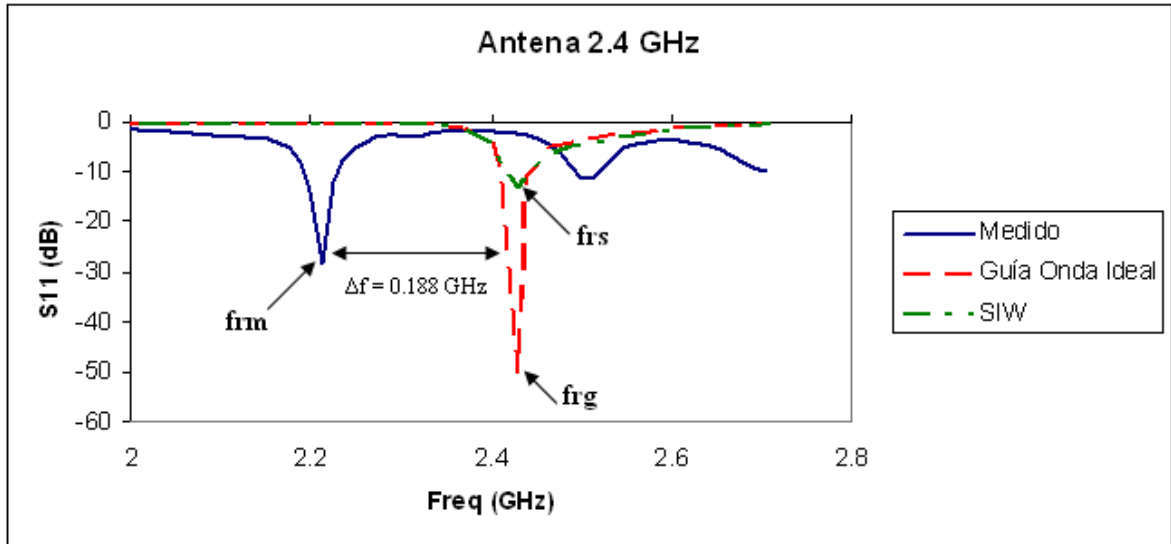


Figura 6. 11 Parámetro S_{11} para la antena construida de 2.4 GHz.

En la figura 6.11 se muestran la frecuencia de resonancia medida (f_{rm}), la frecuencia de resonancia simulada con guía de onda ideal (f_{rg}) y la frecuencia de resonancia simulada usando SIW (f_{rs}). A su vez se muestra también la variación de la frecuencia de resonancia medida con respecto a la frecuencia de resonancia hallada en las simulaciones (Δf). Se pueden apreciar las frecuencias de resonancia encontradas: frecuencia de resonancia medida (f_{rm}), frecuencia de resonancia con guía de onda ideal (f_{rg}) y frecuencia de resonancia con SIW (f_{rs}). Se puede apreciar que la frecuencia de resonancia encontrada experimentalmente se desplazó hacia abajo hacia una frecuencia de aproximadamente 2.212 GHz. Con dicho desplazamiento se tiene una diferencia de aproximadamente $\Delta f = 0.188 \text{ GHz}$ con respecto a la frecuencia de resonancia deseada de 2.4 GHz. Esta imprecisión se debe a imperfecciones en el proceso de fabricación así como al uso del substrato de fibra de vidrio que tiene muchas pérdidas por dieléctrico así como burbujas de aire en su estructura lo que genera que su permitividad eléctrica tenga ciertos niveles de tolerancia por lo que varía de la considerada de 4.4 para este proyecto de tesis.

Se puede apreciar que las pérdidas por reflexión (parámetro S_{11}) tuvieron muy buenos niveles experimentales (aproximadamente -28 dB) y que es más parecido a los resultados de la simulación cuando se utilizó una guía de onda convencional (aproximadamente -50 dB) que cuando se utilizó SIW (aproximadamente -13 dB).

También en la figura 6.11 se pueden observar los resultados encontrados para un ancho de banda a -10 dB en el coeficiente de reflexión: En los resultados prácticos se encontró un ancho de banda de aproximadamente 1.0849 % (rango de frecuencias de 2.2 GHz - 2.224 GHz), en el caso de la simulación de guía de onda ideal se tuvo un ancho de banda de 1.2345 % (rango de frecuencias de 2.41 GHz – 2.44 GHz) y en el caso de la simulación usando SIW se tuvo 0.823 % (rango de frecuencias de 2.42 GHz a 2.44 GHz). Se aprecia que los resultados obtenidos experimentalmente son más parecidos a los obtenidos en la simulación de la guía de onda que a la simulación utilizando SIW.

6.2 Antena a 5.8 GHz

Radiación en el *slot*

En las figuras 6.12 y 6.13 se muestra la estructura SIW con apertura para la antena de 5.8 GHz así como los resultados experimentales de la radiación del *slot* comparados con los resultados de la simulación respectivamente. En la figura 6.13 la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente mientras que la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación.

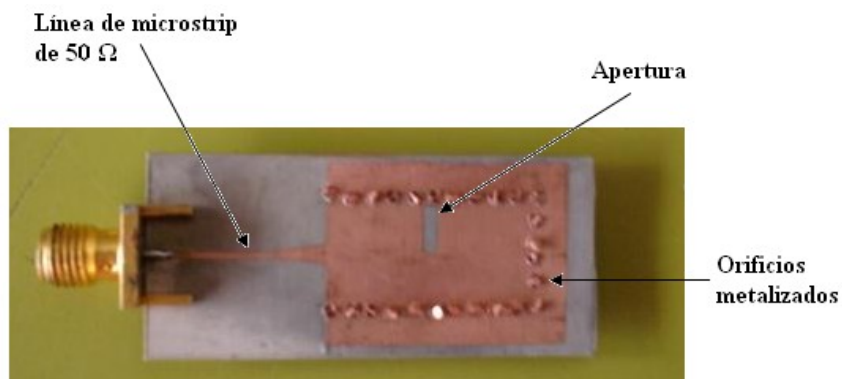


Figura 6. 12 Estructura SIW medida para observar la radiación en el *slot*

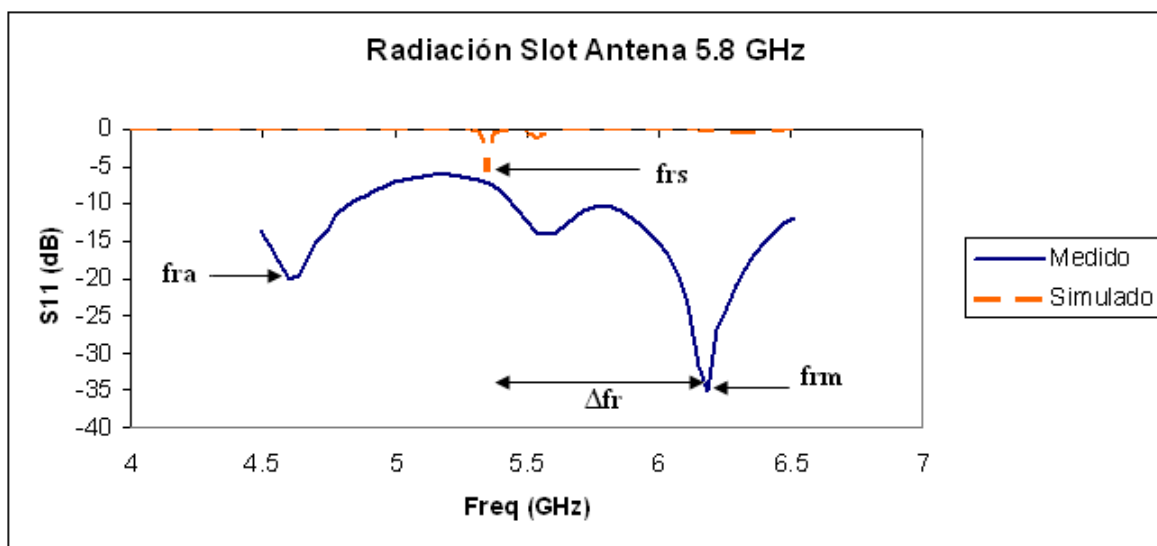


Figura 6. 13 Parámetro S_{11} medido y simulado para la estructura SIW con *slot*.

Se puede apreciar de los resultados anteriores que la frecuencia radiada por el *slot* de manera experimental (f_{rm}) fue a 6.184 GHz mientras que la frecuencia de radiación del *slot* simulada (f_{rs}) fue de 5.35 GHz, lo que generó una diferencia entre frecuencias de resonancia (Δf_r) de 0.835 GHz. Al igual que en el caso de la estructura SIW utilizada para alimentar la antena de 2.4 GHz, las pérdidas en este caso fueron menores para la frecuencia de resonancia del *slot* en los resultados obtenidos experimentalmente ya que se encontró un valor del parámetro S_{11} de -35 dB, mientras que en el caso de la simulación

se obtuvo un valor de -5.92 dB. A su vez, en este caso se presentó una segunda frecuencia de resonancia alterna (f_{ra}) a 4.6 GHz con un valor del parámetro S_{11} de -20.24 dB, mientras que en la simulación no aparecía alguna otra frecuencia de resonancia con niveles considerables para ser tomada en cuenta.

Antena de 5.8 GHz

En las figuras 6.14, 6.15 y 6.16 se muestran la estructura de la antena para 5.8 GHz así como los resultados obtenidos experimentalmente comparados con los obtenidos de las simulaciones para una guía de onda ideal y para SIW respectivamente. Cabe mencionar que en el diseño de esta antena se planteó una compensación de frecuencia superior esperando tener resultados como los de la antena de 2.4 GHz en los cuales la frecuencia de operación disminuyó en comparación con la frecuencia deseada. En la figura 6.16 la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente, la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación con guía de onda ideal y la línea entrecortada con puntos (verde) corresponde a los valores de la simulación con SIW.

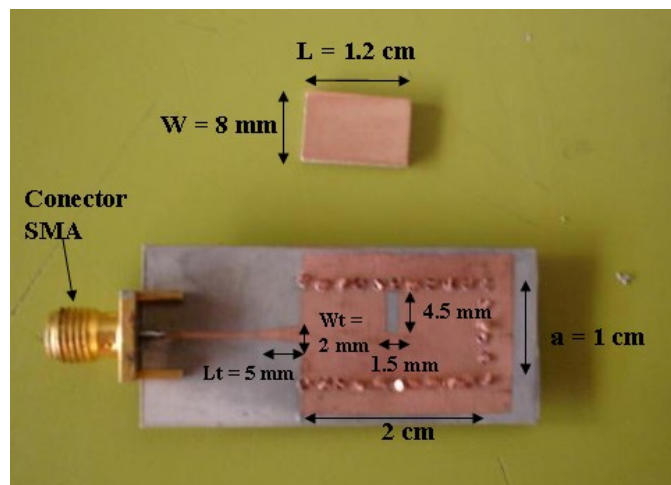


Figura 6. 14 Estructura completa de la antena de 5.8 GHz con SIW

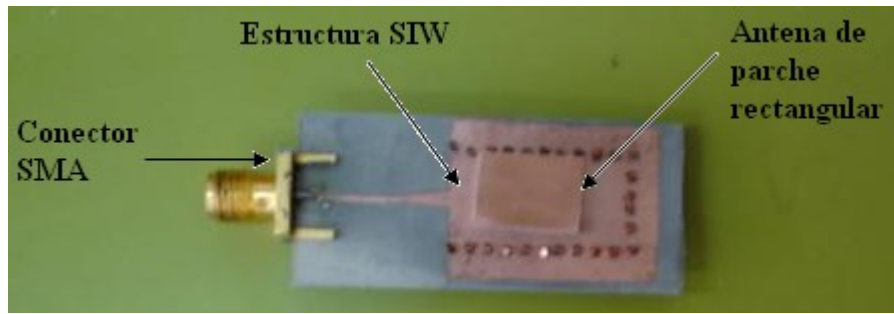


Figura 6. 15 Estructura final con posición óptima de la antena para 5.8 GHz

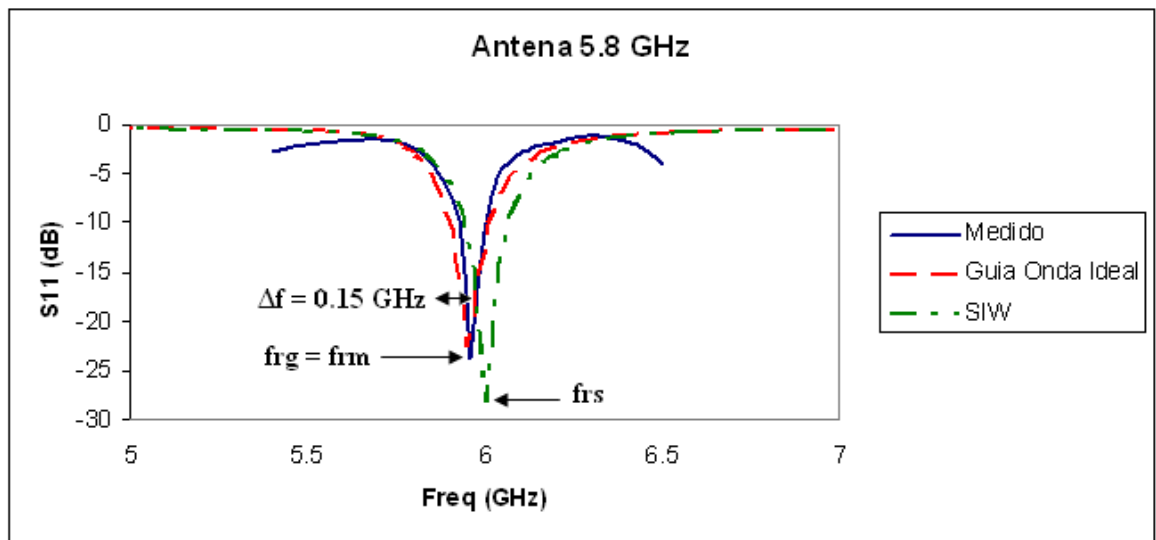


Figura 6. 16 Parámetro S_{11} para la antena construida de 5.8 GHz.

En la figura 6.16 se muestran la frecuencia de resonancia medida (f_m), la frecuencia de resonancia simulada con guía de onda ideal (f_{rg}) y la frecuencia de resonancia simulada usando SIW (f_{rs}). A su vez se muestra también la variación de la frecuencia de resonancia medida con respecto a la frecuencia de resonancia hallada en las simulaciones (Δf). Se pueden apreciar los 3 resultados encontrados: la frecuencia de resonancia medida (f_m), la frecuencia de resonancia con guía de onda ideal (f_{rg}) y la frecuencia de resonancia con SIW (f_{rs}). Se observa que para este caso los resultados experimentales son muy similares a

los obtenidos en la simulación tanto para la guía de onda ideal como con el uso de SIW. Principalmente en el caso de los resultados experimentales con los resultados de la simulación utilizando una guía de onda ideal se tiene un gran parecido tanto en la frecuencia de resonancia como en el valor del parámetro S_{11} . Los resultados experimentales de acoplamiento generaron un valor del parámetro S_{11} mínimo de aproximadamente -24 dB a una frecuencia de 5.95 GHz, mientras que las simulaciones con guía de onda ideal fueron de aproximadamente -22 dB a la misma frecuencia y para SIW de aproximadamente -27 dB para una frecuencia de 6 GHz. En este caso se observa que la frecuencia no se desplazó hacia abajo como se esperaba de los resultados anteriores, sin embargo se generó una diferencia de la frecuencia de resonancia medida (5.95 GHz) a la frecuencia de resonancia buscada (5.8 GHz) de solo $\Delta f = 0.15$ GHz. Lo anterior nuevamente se debe a imperfecciones en el proceso de fabricación así como la imprecisión en la permitividad eléctrica del substrato de fibra de vidrio, la cual varía un poco.

En el caso del ancho de banda se encontró lo siguiente: para los resultados experimentales se obtuvo un ancho de banda de 1.2076 % (rango de frecuencias de 5.926 GHz – 5.998 GHz), en el caso de las simulaciones con la guía de onda convencional se encontró un ancho de banda de 1.6806 % (rango de frecuencias de 5.91 GHz – 6.01 GHz) mientras que en el caso de los resultados de simulaciones utilizando SIW se encontró un ancho de banda de 1.8333 % (rango de frecuencias de 5.95 GHz – 6.06 GHz). De lo anterior se puede concluir que nuevamente los resultados experimentales tienen mayor similitud con las simulaciones utilizando una guía de onda ideal que con las simulaciones utilizando SIW. Lo anterior se debe a que en teoría deberían de tenerse más pérdidas en la estructura

SIW debido a ondas de fuga que se presentan debido a que no se tienen paredes perfectas en los bordes de la guía de onda y a través de los espacios entre orificios metalizados es que se escapa parte de la onda, sin embargo debido a que se mantuvieron dimensiones de diámetro de los orificios metalizados así como la distancia entre ellos reducidas, éstas fugas fueron mínimas.

6.3 Antena dual

En las figuras 6.17, 6.18 y 6.19 se muestran la estructura de la antena dual para frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz así como los resultados obtenidos experimentalmente en comparación con los obtenidos en las simulaciones para guía de onda ideal así como con SIW respectivamente. En la figura 6.19 la línea continua (azul) corresponde a los valores hallados experimentalmente mientras que la línea entrecortada (roja) corresponde a los valores de la simulación. Para la antena en este caso se removió en su totalidad el cobre del substrato dieléctrico para después utilizar nuevamente *copper tape* en una cara para poder realizar la incisión en una esquina de la antena.

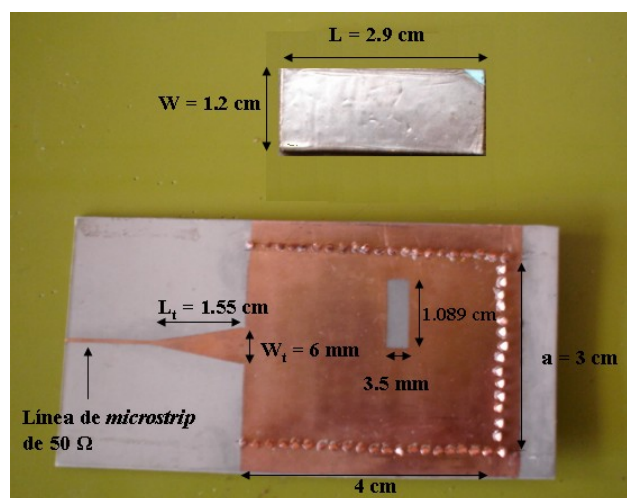


Figura 6. 17 Estructura completa de la antena dual con SIW

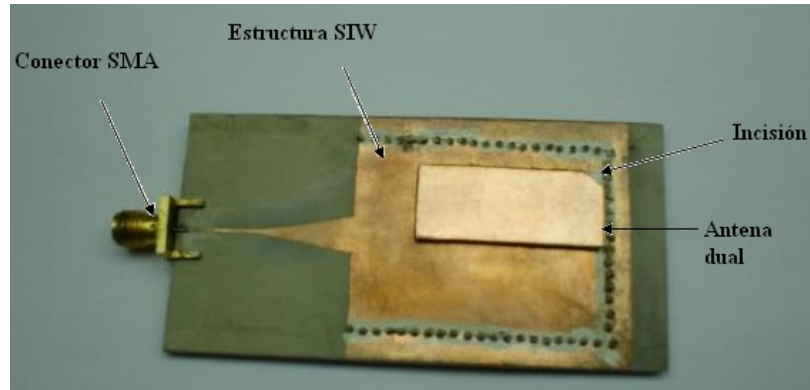


Figura 6. 18 Estructura final con posición óptima para la antena dual

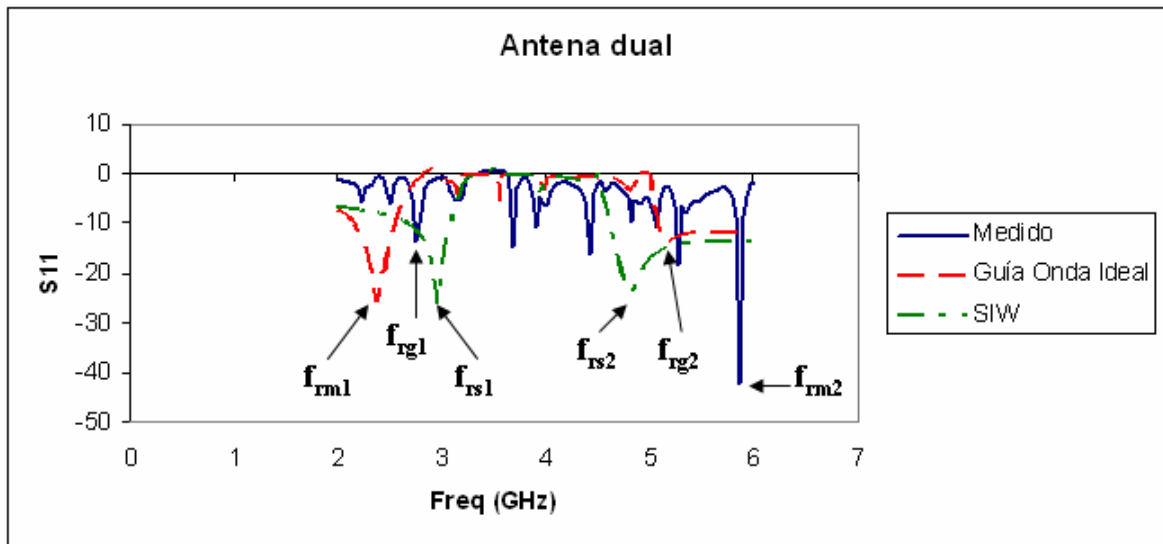


Figura 6. 19 Parámetro S_{11} para la antena dual construida.

Se observan los resultados para la frecuencia de resonancia 1 (2.4 GHz) medidos (f_{rm1}), simulados con guía de onda ideal (f_{rg1}) y simulados con SIW (f_{rs1}). En la misma gráfica se presentan los resultados para la frecuencia de resonancia 2 (5.8 GHz) medidos (f_{rm2}), simulados con guía de onda ideal (f_{rg2}) y simulados con SIW (f_{rs2}). Se aprecia de la figura 6.19 que en el caso del acoplamiento para la frecuencia de resonancia 1 (2.4 GHz deseada) se obtuvo un valor del parámetro S_{11} experimental de -13.844 dB a 2.76 GHz, mientras que en el caso de la simulación con guía de onda ideal se obtuvo -24.78 a 2.4

GHz y en el caso de la estructura con SIW se obtuvo -26.26 dB a 2.96 GHz. Se puede apreciar entonces que para la frecuencia obtenida experimental en comparación con la simulación con guía de onda ideal se tuvo una variación en la frecuencia de resonancia $\Delta f_{g1} = 0.36$ GHz, mientras que en comparación con la frecuencia de resonancia hallada con la estructura SIW hubo una variación de $\Delta f_{s1} = 0.2$ GHz.

El ancho de banda a -10 dB para la primera frecuencia de resonancia medida fue de 1.0853 % (rango de frecuencias de 2.73 GHz a 2.78 GHz) mientras que el ancho de banda simulado con guía de onda ideal fue de 15.8333 % (rango de frecuencias de 2.16 GHz a 2.54 GHz) y en el caso de la simulación utilizando SIW de 13.5135 % (rango de frecuencias de 2.68 GHz a 3.08 GHz).

Para la frecuencia de resonancia 2 (5.8 GHz deseada) se puede apreciar que se tiene un gran acoplamiento puesto que se obtuvo un valor del parámetro S_{11} experimental de -42.46 dB a una frecuencia de 5.86, en el caso de la simulación con guía de onda ideal se obtuvo un valor de parámetro mínimo de S_{11} de -13.73 dB a 5.16 GHz (aunque se aprecia que a partir de dicha frecuencia permanece un ancho de banda grande que incluye la frecuencia de 5.8 GHz dentro del rango de los -10 dB) y en el caso de la simulación utilizando SIW se obtuvo un valor de -24 dB cerca de 4.8 GHz (aunque con comportamiento similar a la estructura con guía de onda ideal en el caso del ancho de banda que incluye 5.8 GHz).

El ancho de banda a -10 dB para la segunda frecuencia de resonancia encontrada de manera experimental fue de 0.8532 % (rango de frecuencias de 5.83 a 5.88 GHz),

mientras que para la simulación usando guía de onda ideal se tuvo un gran ancho de banda para frecuencias desde 4.96 hasta 6 GHz con alrededor de -11 dB para el parámetro S_{11} , mientras que en el caso de la estructura con SIW se obtuvo un ancho de banda similar desde 4.62 GHz hasta 6 GHz con alrededor de -13 dB para el parámetro S_{11} .

6.4 Alimentación de la antena tipo “H”

En las figuras 6.20, 6.21 y 6.22 se muestran la alimentación de la antena tipo “H” mediante la estructura SIW utilizada para la antena de 2.4 GHz y la antena de banda dual así como los resultados obtenidos para esta antena respectivamente. Cabe mencionar que la estructura, al ser optimizada para 2.4 GHz no presenta el mejor acoplamiento para la antena que trabaja a 2 GHz, aunque se encontraron buenos resultados.

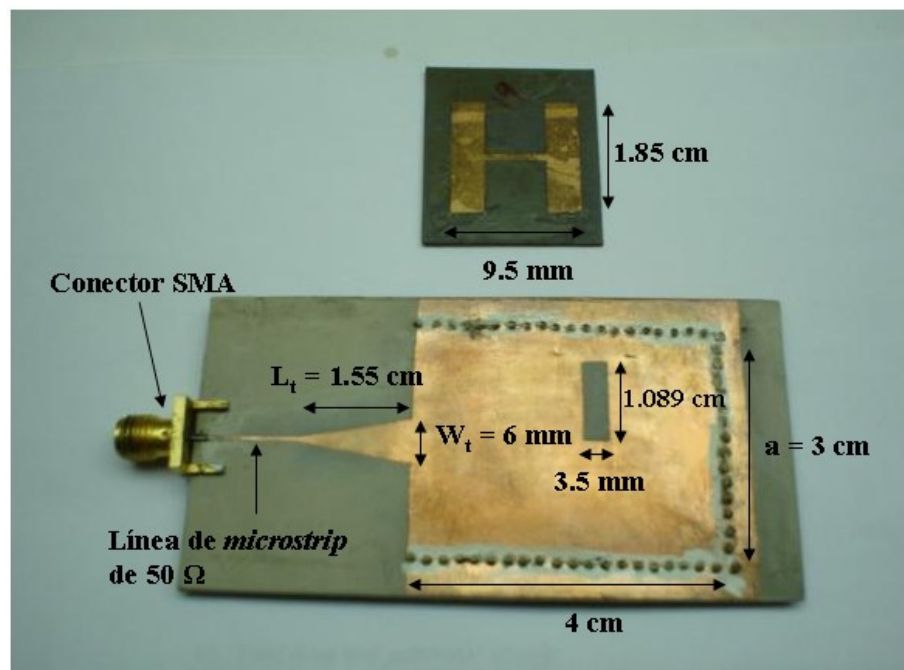


Figura 6. 20 Estructura de la antena tipo “H” alimentada con SIW.

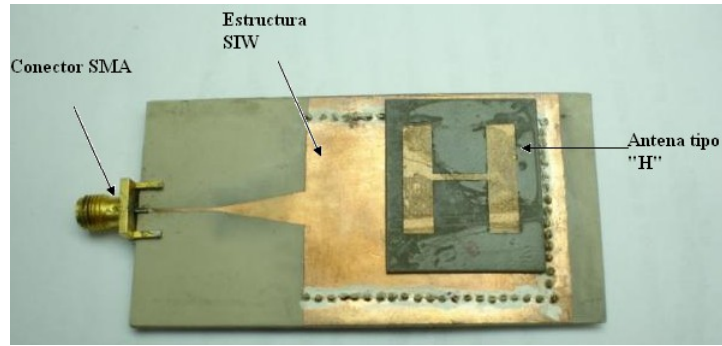


Figura 6. 21 Estructura final con posición óptima para antena tipo “H” a 2 GHz.

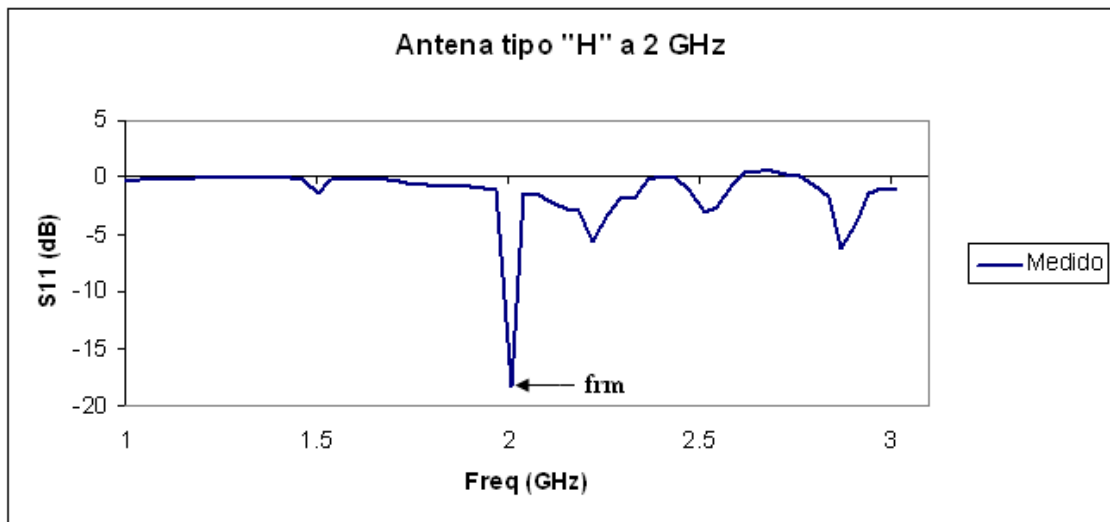


Figura 6. 22 Parámetro S_{11} medido de la antena tipo “H”.

De la figura 6.22 se puede apreciar que aún cuando la estructura SIW de alimentación no fue diseñada para obtener resultados óptimos para la frecuencia de resonancia medida $f_{rm} = 2$ GHz de la antena tipo “H”, se tiene un buen acoplamiento a esta frecuencia ya que el parámetro S_{11} alcanzó un valor de -18.249 dB. Con esto se comprueba que la estructura de alimentación puede ser utilizada para diversos diseños de antenas con resultados muy prometedores.