

# Capítulo 4

## Resultados

### Introducción

En el capítulo 4 se mostrarán todos los resultados obtenidos con los diferentes métodos de estudio que se han utilizado en el proyecto. Se mostrarán las gráficas obtenidas y se comentarán los distintos resultados. El parámetro que se muestra en todas las gráficas será el  $S_{12}$ , es decir, el coeficiente de transmisión de la señal entre el puerto de entrada (puerto 1) y el de salida (puerto 2).

Como se comentó en los primeros capítulos del proyecto el estudio teórico [2] y el método numérico desarrollado en el grupo de microondas de la Facultad de Física de la Universidad de Sevilla, indican que la presencia de la tapadera metálica provoca la excitación de un modo de fuga a frecuencias bajas. Como resultado aparecerá una atenuación general en la transmisión, con oscilaciones del  $S_{21}$  e incluso la existencia de una fuerte atenuación a frecuencias concretas para una altura de tapadera suficientemente baja. Estas zonas de fuerte atenuación del coeficiente de transmisión se achacan a una interferencia destructiva entre el modo ligado de la estructura y el modo leaky que se excita en la estructura con tapadera.

En este capítulo se mostrarán los resultados experimentales obtenidos con los dos prototipos de microstrip cubierto de distinta longitud (12cm y 14.8cm) que se han fabricado. Comprobaremos los resultados para dos alturas distintas de la tapadera metálica sobre la tira (0.5mm y 1mm). Estos resultados se compararán con los resultados numéricos que proporciona tanto el simulador CST como el método de análisis que se ha desarrollado en el Grupo de Microondas [2].

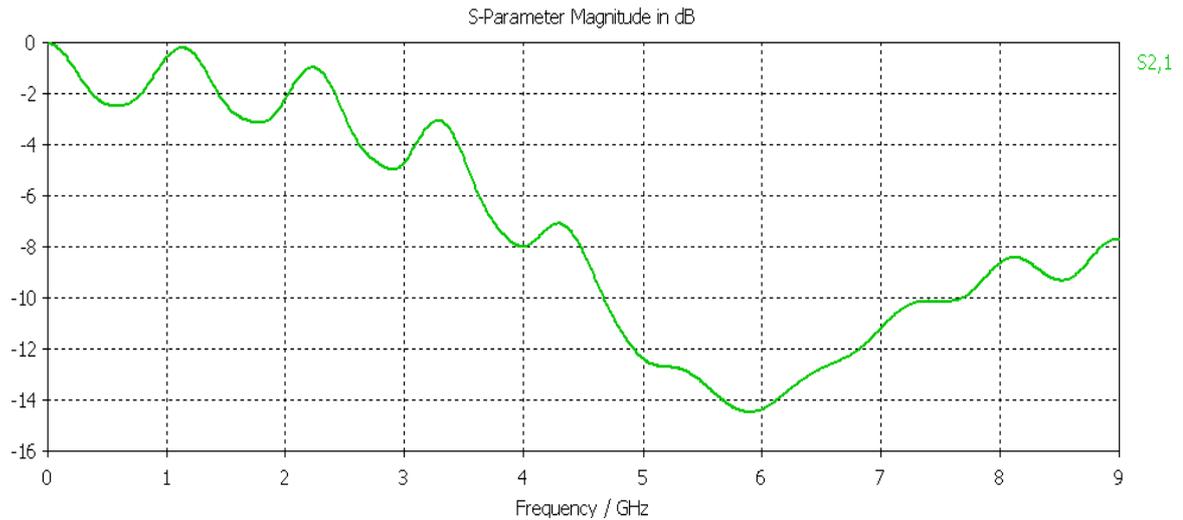
## Resultados para el primer prototipo

### Análisis con CST Microwave Studio

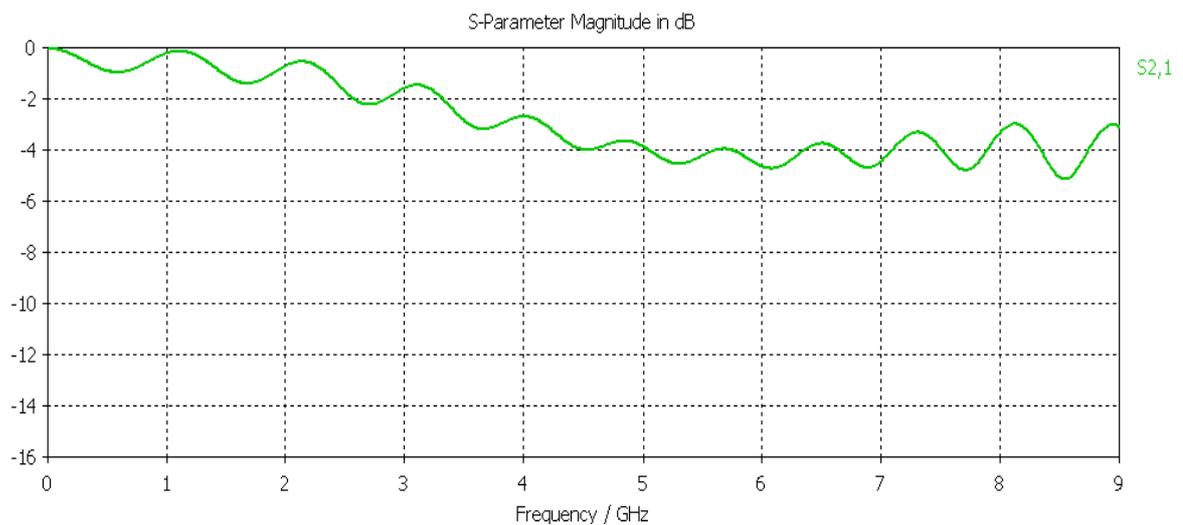
Las características principales del simulador CST Microwave Studio han sido descritas en el capítulo 2. Las distintas simulaciones que aquí se presentan se han llevado a cabo variando alguno de los parámetros característicos del primer prototipo que se definen en dicho capítulo 2.

Un aspecto de fundamental importancia que conviene resaltar es que en el análisis del microstrip cubierto que se realiza en [2] la estructura se considera de dimensiones infinitas lateralmente. Eso quiere decir que no se tienen en cuenta posibles reflexiones de la señal en las discontinuidades laterales que impone la presencia de una tapadera metálica real. Cuando se tienen en cuenta las reflexiones de la señal en las discontinuidades que introduce la tapadera aparecen ceros de transmisión asociados a resonancias en la caja metálica que camuflan la existencia de atenuaciones en la transmisión asociados a la interferencia del modo ligado de la estructura con el modo leaky que se excita. Por tanto, para observar este último fenómeno y corroborar así la existencia del modo leaky han de eliminarse estas reflexiones tanto en la simulación con CST como en las medidas experimentales. Cuando se simula con CST ha de trabajarse con un modelo de la estructura que es finito. Para eliminar las resonancias de la caja metálica es por tanto preciso que en las paredes laterales de la tapadera se impongan condiciones de contorno totalmente absorbentes.

Después de indicar los últimos detalles del diseño de simulación, se muestran las gráficas obtenidas en las simulaciones para el prototipo de 12cm. La figura 2 muestra la magnitud del  $S_{12}$  para una altura de la tapadera metálica de 0.5mm y la figura 3 para una altura de tapadera de 1 mm.



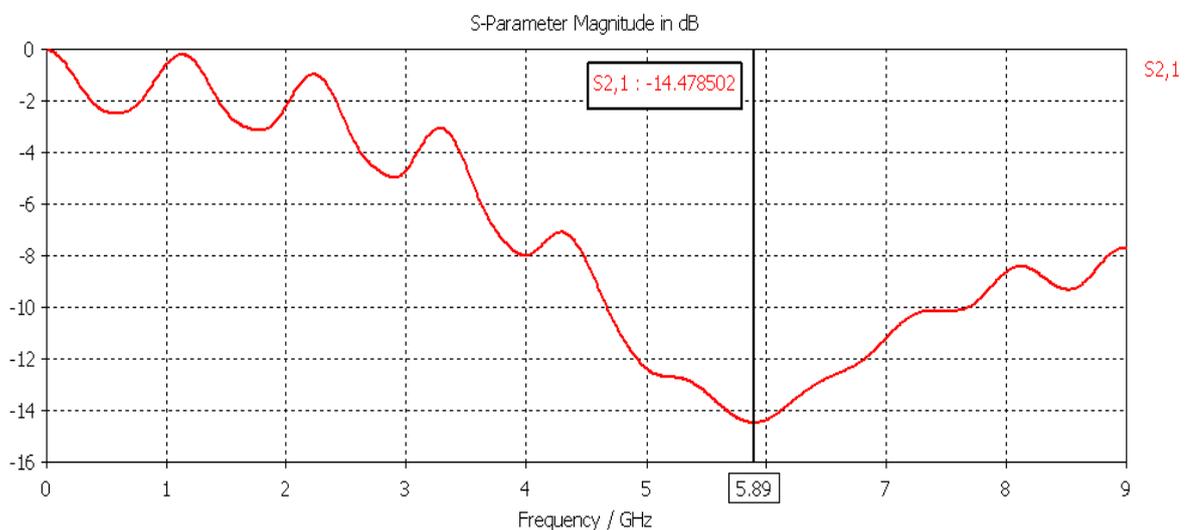
**Figura 2:** Coeficiente de transmisión  $S_{12}$  para un microstrip cubierto de 12 cm de longitud con  $w=h=1$  mm,  $h_c=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$



**Figura 3:** Coeficiente de transmisión  $S_{12}$  para un microstrip cubierto de 12 cm de longitud con  $w=h=1$  mm,  $h_c=1.0$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$

Para poder compararlas mejor se muestran ambas a igual escala. En una línea de transmisión ideal (línea acoplada y sin pérdidas) la gráfica del módulo del coeficiente  $S_{12}$  debería ser una línea recta a 0dB (toda la señal transmitida). La pérdida de potencia transmitida que se observa en estas gráficas podría achacarse en principio a la existencia de pérdidas óhmicas en nuestra estructura real. Sin embargo, aunque en una línea de transmisión real es de esperar una cierta pérdida de potencia en función del material utilizado y de la longitud de la línea, estas pérdidas son típicamente mucho menores que las que se observan en estas gráficas. Por otro lado, debe notarse

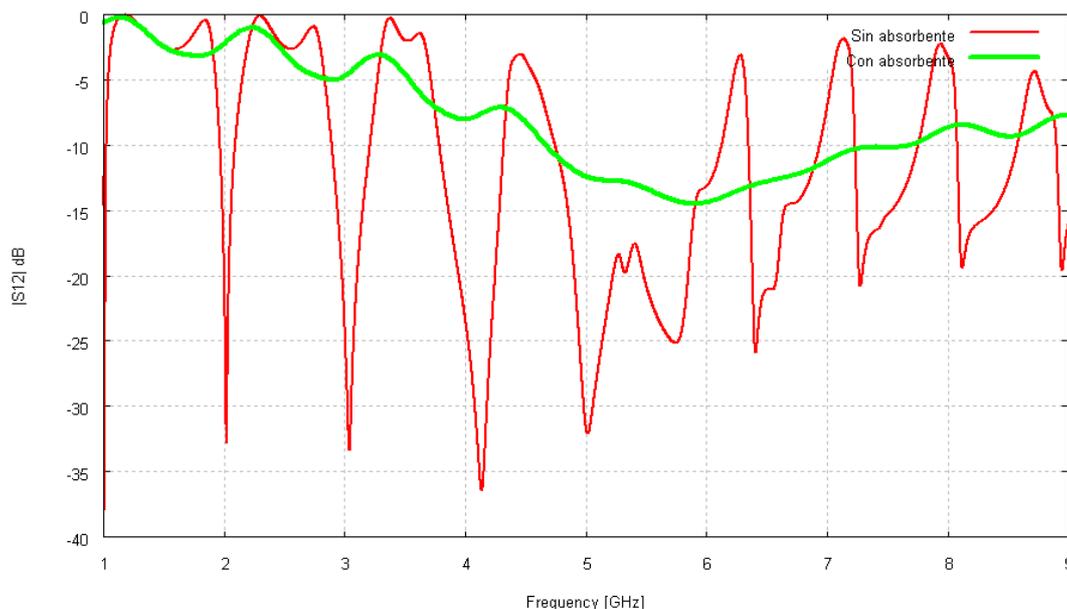
que en nuestro experimento la línea de transmisión no está perfectamente acoplada. En efecto, hemos calculado la impedancia característica de las líneas con tapadera y hemos encontrado que ésta es de  $33 \Omega$  para  $hc = 1 \text{ mm}$  y  $23,6 \Omega$  para  $hc=0.5 \text{ mm}$ . Calculando la potencia transmitida para un línea no acoplada (ecuación 2.75 en [5]) se llega a la conclusión de que la relación entre la potencia promedio transmitida y la emitida por la fuente es, en el peor de los casos (es decir, a 9GHz), de  $-0.3 \text{ dB}$  para  $hc = 1 \text{ mm}$  y de  $-1.91 \text{ dB}$  para  $hc = 1 \text{ mm}$ . Por consiguiente la degradación del coeficiente de transmisión que se observa en la figura 3 y, sobre todo, en la figura 2 y que parece al colocar la tapadera metálica sobre la estructura no puede ser achacada tampoco a este factor. Nuestra conclusión es que la parte más importante de esta atenuación de la señal transmitida está asociada a la existencia de un modo de fuga en la estructura y a su interferencia con el modo ligado. En concreto, en la figura 3 se observa que para una tapadera metálica de 1 mm de altura, debido a que se excita débilmente el modo de fuga, hay una moderada pérdida de potencia transmitida. Para una altura de tapadera menor, figura 2, aparece una atenuación muy importante de la transmisión. Como se ha mencionado, esta atenuación no se puede achacar a pérdidas óhmicas porque es muy alta y porque no crece con la frecuencia, como sería de esperar, sino que presenta un mínimo cerca de 6 GHz. En concreto, en la Figura 4 se muestra mediante el marcador que el mínimo de transmisión se da a 5.89 GHz, y el valor del  $S_{21}$  a esa frecuencia es  $-14.478 \text{ dB}$ .



**Figura 4:** Coeficiente de transmisión  $S_{12}$  para un microstrip cubierto con  $L=12 \text{ cm}$ ,  $w=h=1 \text{ mm}$ ,  $hc=0.5 \text{ mm}$  y  $\epsilon_r = 2.2$

Estos primeros resultados muestran que la altura de la tapadera es un parámetro decisivo para la aparición del modo de fuga. Se comprueba que el efecto es más importante cuanto menor sea esta altura.

Tal como se ha comentado al principio de esta sección, para poder observar en las simulaciones la atenuación de la transmisión debida al modo de fuga es muy importante eliminar las posibles reflexiones de la señal en las discontinuidades que imponen los bordes de la tapadera. Para ilustrar este punto se ha añadido en esta sección una figura adicional que permite comparar las simulaciones cuando se incluyen y cuando no se incluyen condiciones de contorno absorbentes en los bordes de la tapadera. Así en la Figura 5 se muestra la diferencia entre ambos tipos de simulaciones para el prototipo con longitud de 12cm y altura de tapadera de 0.5mm. En esta figura es interesante resaltar que la curva correspondiente a la simulación con el absorbente se comporta de forma parecida a una envolvente de la curva que corresponde a la simulación sin condiciones absorbentes. Esta figura también permite explicar el pequeño rizado que típicamente observamos en las gráficas del  $|S_{12}|$  cuando imponemos condiciones de contorno absorbentes en los bordes de la tapadera. Por comparación con la curva obtenida sin condiciones absorbentes se comprueba que el rizado está relacionado con los ceros de transmisión asociados a resonancias altamente atenuadas.



**Figura 5:** Coeficiente de transmisión  $S_{12}$  para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ . Comparación entre la simulación realizada con condiciones de contorno absorbentes (línea roja) y sin ellas (línea verde).

## Resultados experimentales con el analizador de redes

En este apartado se mostrarán los resultados obtenidos experimentalmente mediante el analizador de redes Agilent E8363B para el prototipo simulado en el apartado anterior.

Para obtener resultados experimentales se ha fabricado en el laboratorio un prototipo con las dimensiones especificadas en la sección anterior siguiendo el método de fabricación que se detalla en el capítulo 3. El  $S_{12}$  se ha medido mediante el analizador de redes Agilent E8363B de que se dispone en el laboratorio del Grupo de Microondas.

Para la obtención de resultados experimentales que puedan compararse con los obtenidos con el método numérico descrito en [2] y con los resultados de CST es preciso discutir previamente dos aspectos fundamentales. Estos dos aspectos son la absorción de la señal por los bordes de la tapadera y la homogeneidad de altura de la tapadera que se sitúa sobre la línea.

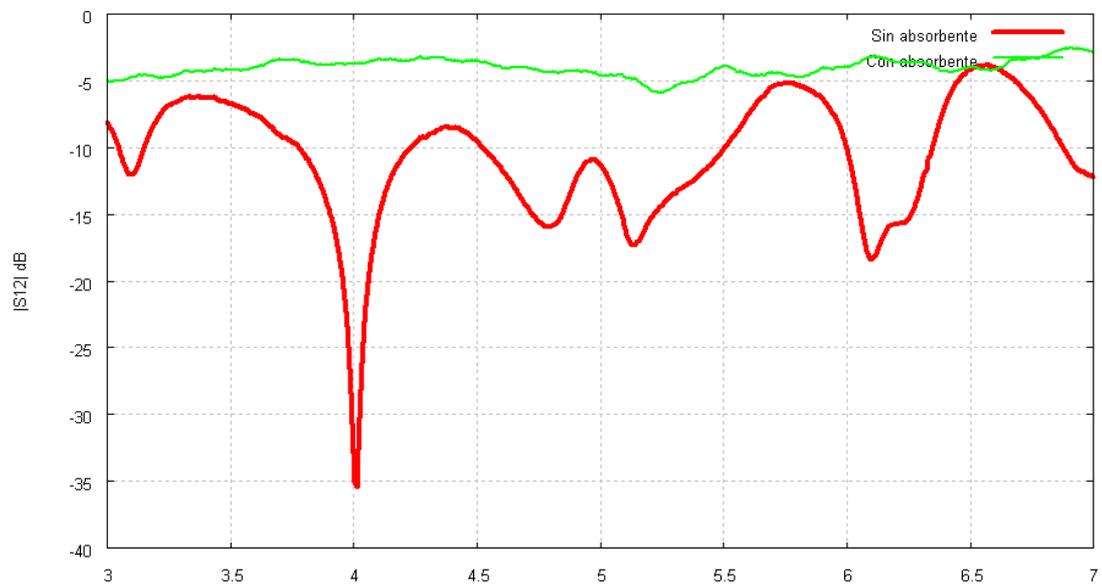
En cuanto a la absorción de la señal, en las primeras medidas que se realizaron se constató que los resultados obtenidos sin una capa de absorbente en los bordes de la tapadera no eran útiles para determinar la presencia de un modo de fuga. Esto era debido a que los resultados quedaban oscurecidos por la presencia de un gran número de ceros de transmisión asociados con la resonancia de la señal en la caja metálica que impone la tapadera. Posteriormente esto quedó corroborado a la vista de los resultados que proporcionaba la simulación con CST. Un ejemplo lo tenemos en la Figura 5 que ya se ha discutido en el apartado anterior.

Una solución para eliminar los ceros de transmisión asociados a resonancias es colocar un material absorbente en todos los bordes laterales de la tapadera. Como es sabido, en el momento que la señal de microondas se encuentra con un obstáculo, una parte de su onda es absorbida y transformada en calor, una parte continúa propagándose de forma debilitada y una parte puede ser eventualmente reflejada. Los materiales metálicos provocan una fuerte reflexión mientras que existen otros materiales que “absorben” la señal. Para eliminar las reflexiones de la señal en los bordes de la tapadera pusimos varios tipos de materiales aislantes como tiras de papel grafitado o piezas de espuma absorbente de la cámara anecoica. Sin embargo el mejor resultado lo obtuvimos con agua. En efecto, la radiación electromagnética a la frecuencia de microondas es absorbida con gran eficacia por las moléculas del agua debido a la existencia de un momento dipolar en el líquido (esta es la razón por la que se usan hornos de microondas para calentar los alimentos). Nosotros utilizamos como material absorbente tiras de papel mojadas en agua, tal como se muestra en la imagen 38. En la imagen 38 se muestra el montaje final con los conectores y puertos hacia el analizador de redes.



Imagen 38

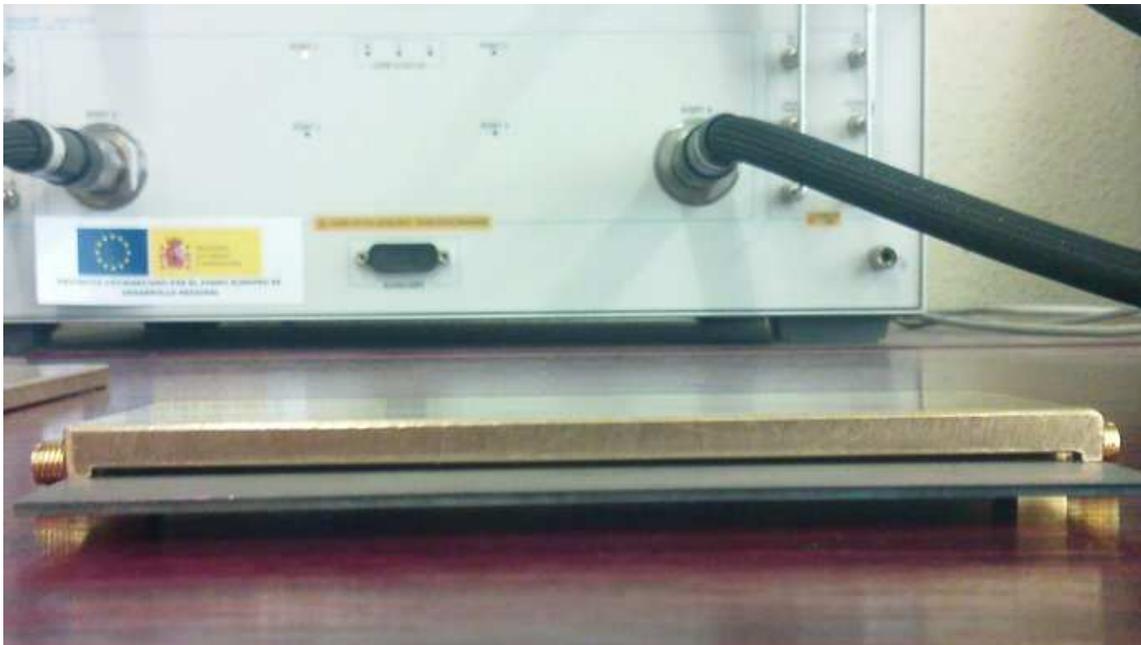
Un ejemplo de la diferencia en los resultados de las medidas con y sin absorbente se muestra en la Figura 6. Se observa que la curva correspondiente a la estructura con absorbente (agua) no contiene los picos producidos por las frecuencias de resonancia.



**Figura 6:** Medida experimental del coeficiente de transmisión  $S_{12}$  para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=1$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ . Comparación entre la medida con material absorbente en los bordes de la tira (línea verde) y sin absorbente (línea roja).

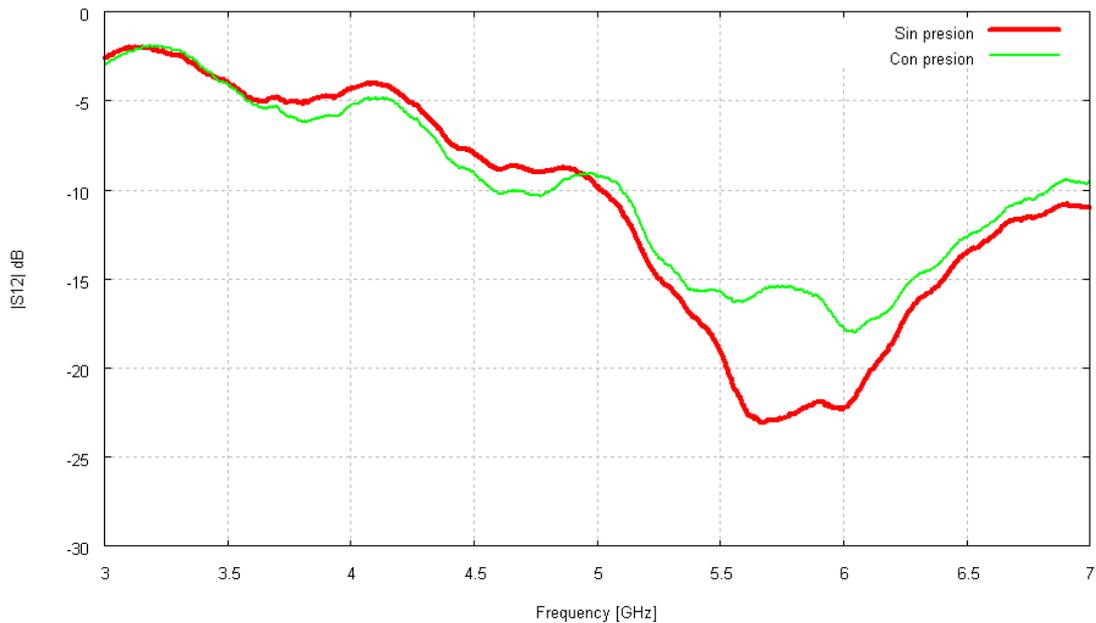
La Figura 6 muestra la potencia transmitida para la tira de 12 cm de longitud y 1 mm de altura de tapadera. Se muestra la comparación a 1mm de altura de tapadera porque se puede distinguir con más claridad el efecto de los picos de resonancia en el  $S_{12}$  de la señal sin absorbente.

Un segundo aspecto que es interesante tratar respecto a las medidas experimentales es la homogeneidad de la altura de la tapadera. Dado que se va a trabajar con alturas de tapadera pequeñas y que, tal como se ha comprobado en [2], la excitación del modo de fuga es muy sensible a una pequeña variación de este parámetro, un mínimo cambio puede variar el resultado. En la imagen 39 se observa una vista lateral de la estructura en la que se aprecia que es posible que exista una diferencia de altura muy pequeña entre puntos de la tapadera.



*Imagen 39*

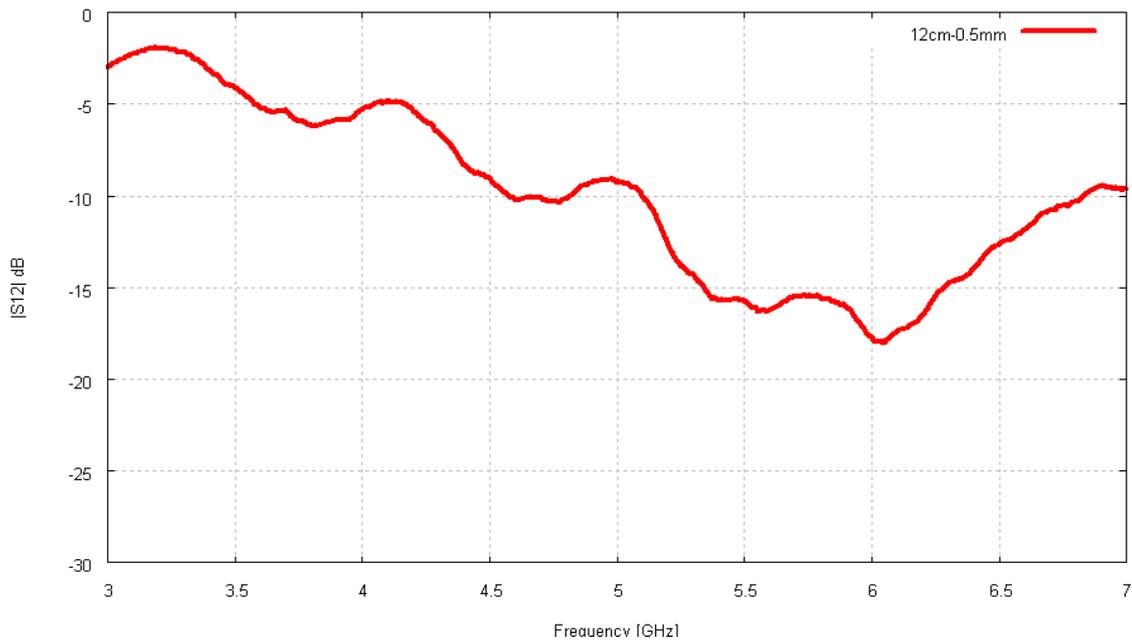
Para que la altura entre la tapadera y la tira esté controlada y sea constante se coloca un peso uniforme sobre la tapadera. Se muestra en la Figura 7 la diferencia cuando la estructura se deja libre y cuando se le aplica una presión.



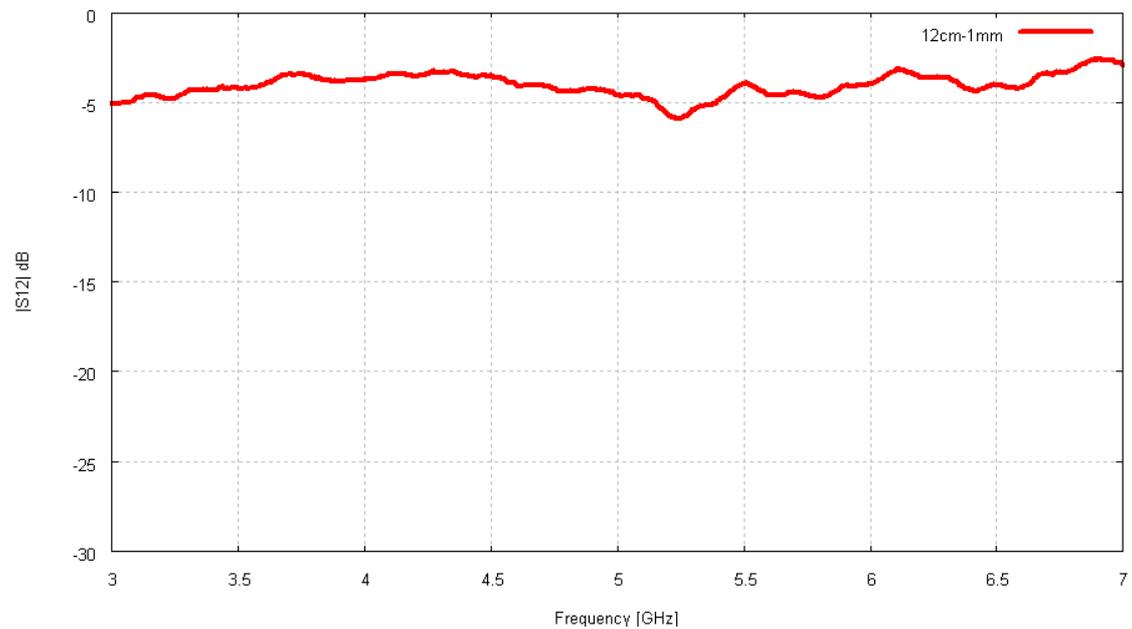
**Figura 7:** Coeficiente de transmisión medido para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$  cuando se ejerce presión sobre la tapadera metálica (línea roja) y cuando no se ejerce (línea verde).

En la Figura 7 se observa el efecto de la presión producida sobre la tapadera. Cabe destacar que la diferencia más importante, en torno a los 10 dB, se encuentra en el rango de frecuencias en las que se espera el máximo de atenuación de la señal producido por la interferencia entre el modo ligado y el modo de fuga, mientras que la influencia de la presión sobre la tapadera es pequeña fuera de esa región de frecuencias. Esto se explica porque la interferencia destructiva requiere que el modo ligado y el de fuga tengan unas amplitudes parecidas y se encuentren en contrafase. Esta situación crítica puede verse fácilmente alterada por una leve inhomogeneidad en la altura de la tapa metálica sobre la línea.

En las Figuras 8 y 9 se muestran las gráficas obtenidas para el coeficiente de transmisión con el analizador de redes Agilent E8363B para el prototipo de 12 cm y las dos alturas de tapadera que con las que estamos trabajando (0.5mm y 1mm).



**Figura 8:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .

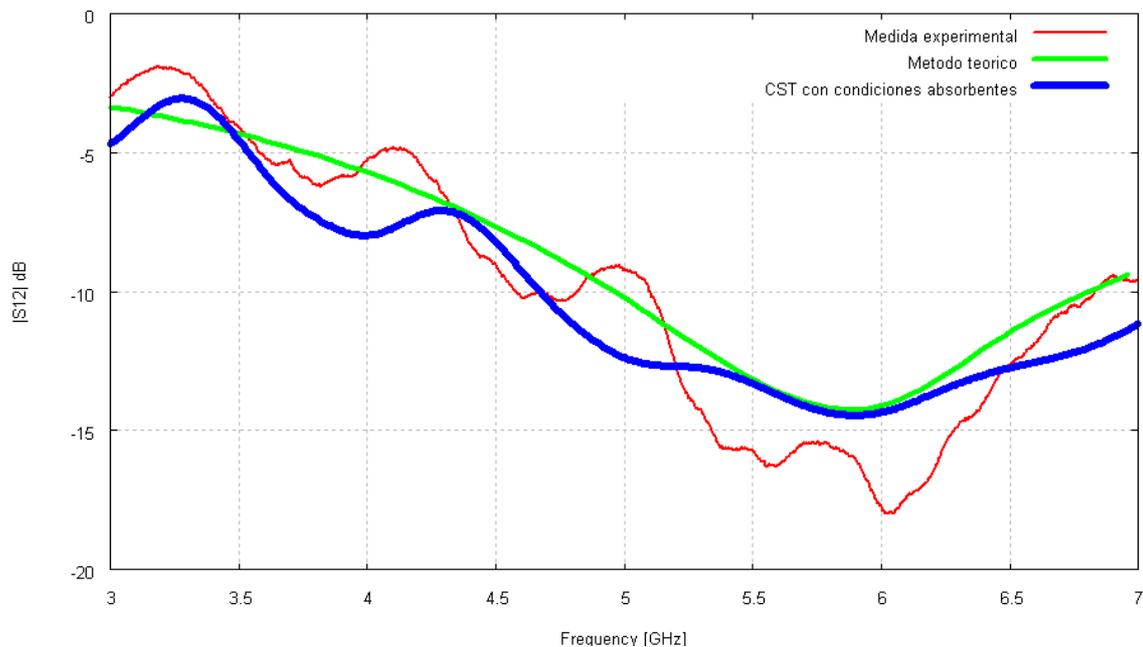


**Figura 9:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=1.0$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .

En la Figura 8 se muestra que, tal como predice el análisis numérico previo, para una altura de tapadera de 0.5 mm existe una atenuación importante de la transmisión en el entorno de los 6 GHz. En ese punto el  $|S_{12}|$  toma un valor de unos -17 dB. La Figura 9 demuestra que para una altura de 1mm de altura no se distingue este cero de

transmisión, además la potencia transmitida se atenúa en promedio en menor medida con respecto a la tapadera de altura 0.5mm. Tal y como puso de manifiesto el análisis numérico previo se demuestra como la altura de la tapadera es un aspecto importante a la hora de la aparición del modo de fuga y su interferencia con los modos ligados.

A continuación compararemos estos resultados con los obtenidos mediante cálculo numérico. Esto lo haremos para la estructura de altura de tapadera 0.5 mm, ya que es en esta estructura en la que aparece en fenómeno de interferencia buscado que pone de manifiesto más claramente la existencia el modo de fuga. La Figura 10 muestra un gráfica donde se superponen los resultados obtenidos con el simulador CST Microwave, los proporcionados por el modelo teórico de [2] y los resultados experimentales obtenidos a partir de las medidas del analizador Agilent E8363B que ya se han representado ya en la Figura 8.



**Figura 10:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  para un microstrip cubierto con  $L=12$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ . Se comparan los resultados medidos (línea roja) con los obtenidos mediante el método descrito en [2] (línea verde) y el análisis numérico de CST (línea azul).

La comparación de resultados de la Figura 10 muestra una concordancia muy buena entre los resultados teóricos y los experimentales. Como ya se ha comentado, el método de análisis descrito en [2] asume que la línea es infinita lateralmente. Por esta razón en el  $S_{12}$  no aparecen las oscilaciones que sí se observan en el resultado de CST y en la medida experimental. Como ya se ha comentado estas oscilaciones están relacionadas con el hecho de que los absorbentes que se colocan en los límites de la

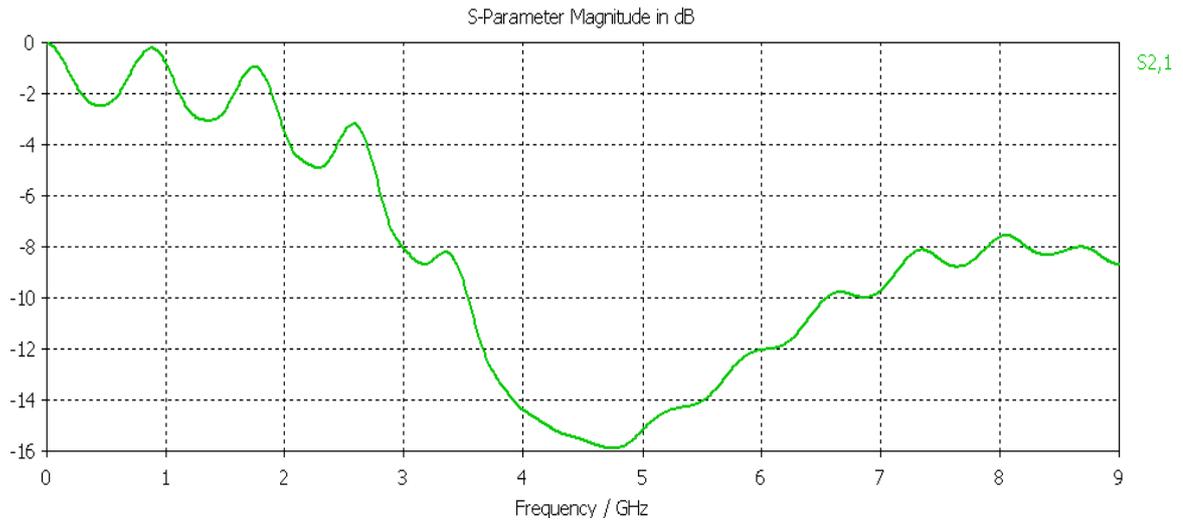
tapadera metálica no son perfectos y no emulan completamente el comportamiento de una estructura infinita. Sin embargo, lo más interesante de la Figura 10 es que muestra que tanto las medidas experimentales coinciden con los resultados teóricos, que predecían una caída en la transmisión alrededor de 6 GHz. Tal como se ha discutido a lo largo de esta memoria, la existencia de este máximo de atenuación en la señal transmitida es una evidencia de la coexistencia en la línea de dos modos de propagación que interfieren. Demostrar que es posible en la práctica la excitación de un modo de fuga en una línea microstrip cubierta era uno de los objetivos de este trabajo. Sin embargo, para obtener una mayor certeza en estas conclusiones sería interesante que pudiéramos obtener resultados similares para otras geometrías de la línea microstrip cubierta. Con esta idea en el apartado siguiente analizaremos una línea microstrip cubierta de diferente longitud.

## Resultados del segundo prototipo

Después de comprobar para el prototipo de longitud 12cm que los resultados experimentales coinciden con los que proporcionan nuestros métodos de análisis numérico, se decide fabricar un segundo prototipo con la idea de afianzar aún más las conclusiones obtenidas en el primero. Se trata de verificar que la coincidencia de resultados entre teoría/análisis numérico y experimento no es casual y que puede obtenerse una coincidencia parecida para otros casos. En concreto se trata de verificar el desplazamiento en frecuencia del cero de transmisión que se ha detectado cuando se modifica la longitud de la línea. Nuestro método de análisis [2] predice que para una línea similar a la usada en el apartado anterior pero con una longitud mayor la frecuencia a la que aparece la atenuación en la transmisión es inferior. Se trata entonces de construir y medir un prototipo de mayor longitud de línea.

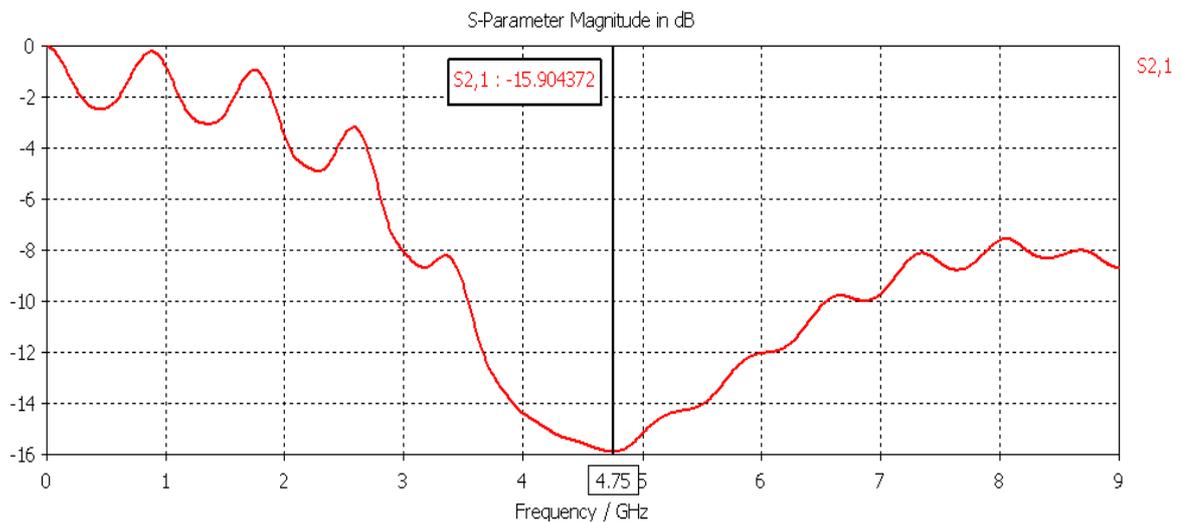
## CST Microwave Studio

El segundo prototipo fabricado es idéntico al anterior, salvo por la longitud de la estructura, cambia su L, pasando de 12cm a 14.8cm. Esta es la longitud mayor de línea que nos es posible fabricar en los laboratorios del Grupo de Microondas con la técnica descrita en el capítulo 3. En CST, para esta nueva longitud de línea hemos simulado de nuevo en el tiempo para una altura de la tapa metálica 0.5mm. El resultado se muestra en la Figura 11.



**Figura 11:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=14,8$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=1.0$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .

En la Figura 11 puede apreciarse que el mínimo en la transmisión de la señal sigue apareciendo para esta nueva longitud de línea, opero ahora se encuentra a una frecuencia menor.



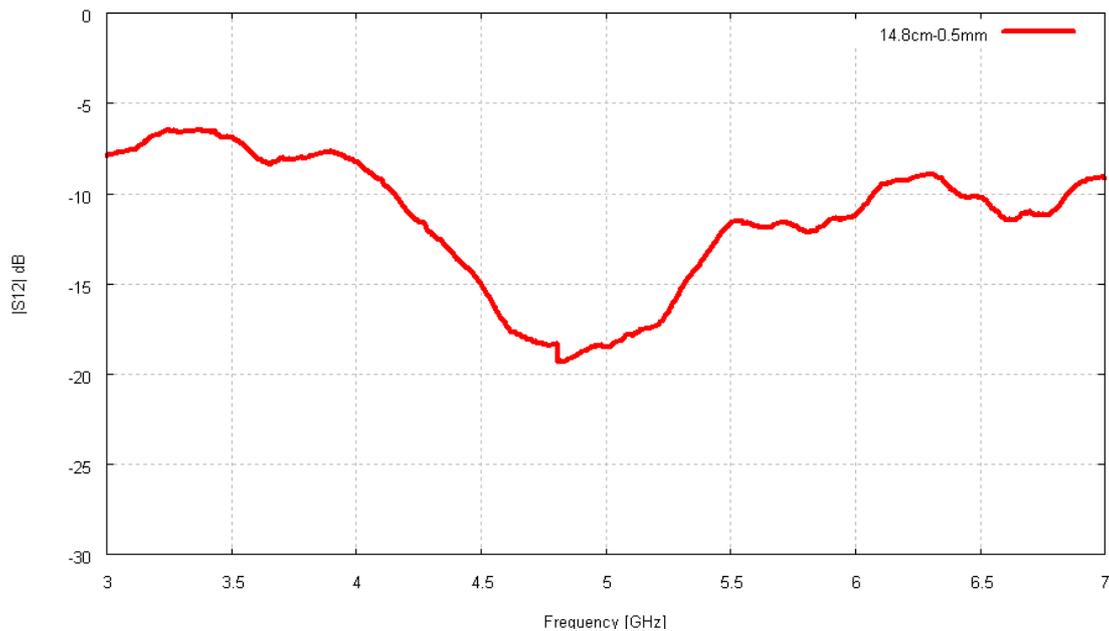
**Figura 12:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=14,8$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=1.0$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .

En la Figura 12 se muestra el mínimo de potencia transmitida,  $S_{21}$ , y a la frecuencia a la que se produce este mínimo, 4.75 GHz y -15.90 dB. Frecuencia que dista

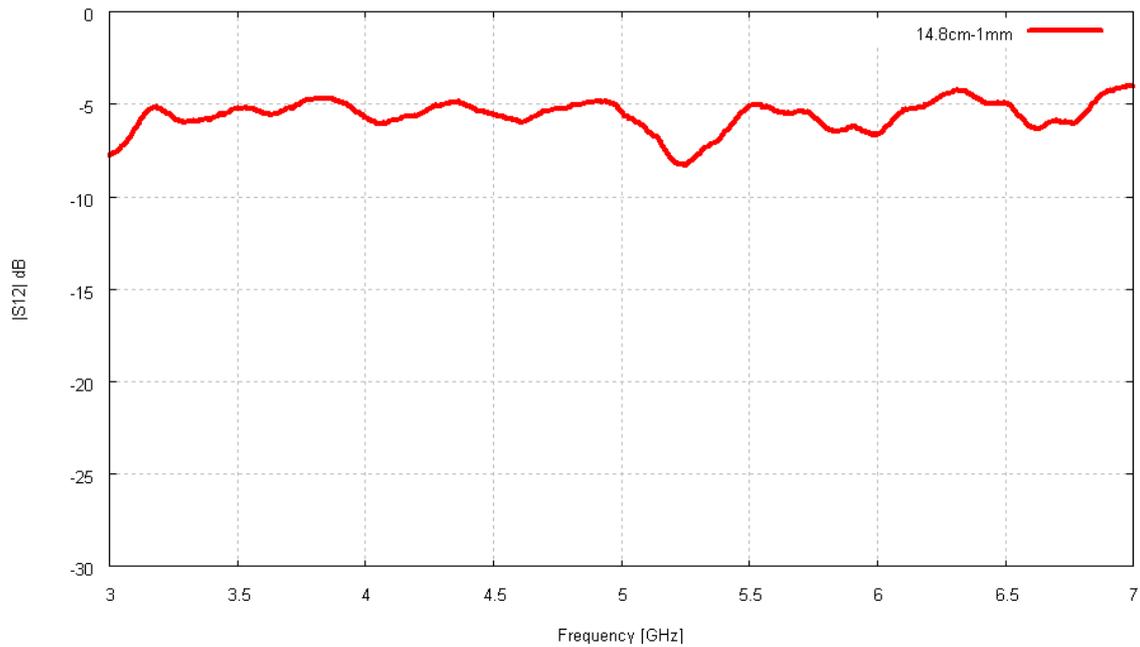
de la simulación anterior de 12 cm en más de 1 GHz, con una atenuación en dB muy parecida.

## Analizador de redes Agilent

Como se comentó anteriormente se ha fabricado y medido una segunda estructura idéntica al microstrip cubierto que ya se había analizado antes pero con una longitud que pasa de 12cm a 14.8cm. Las figuras 13 y 14 muestran los resultados experimentales obtenidos para las tapaderas de 0.5mm y de 1mm, respectivamente. De nuevo se observa que el parámetro de altura de la tapadera es muy importante. Solamente para una altura de tapadera suficientemente pequeña el modo de fuga se excita lo suficiente como para poder dar lugar a una interferencia destructiva con el modo ligado. Para una altura de un 1mm se observa una pérdida de potencia transmitida prácticamente uniforme en todo el rango de frecuencias.

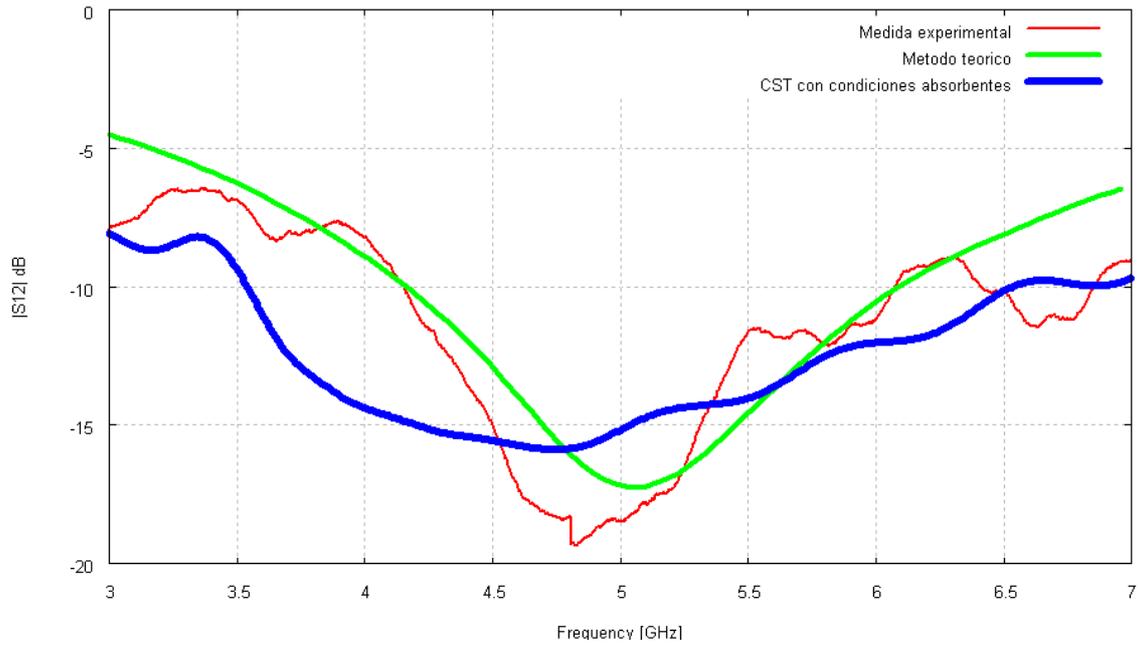


**Figura 13:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=14.8$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .



**Figura 14:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  medido para un microstrip cubierto con  $L=14.8$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=1$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ .

En la Figura 13 se puede ver como a una frecuencia algo por debajo de los 5 GHz se produce una fuerte atenuación en la transmisión de casi -20 dB. En la sección anterior se ha visto que una atenuación similar es predicha por el análisis de CST. Para verificar la exactitud de estos resultados hemos comparado de nuevo en una misma gráfica el resultado de las medidas para esta estructura con los resultados numéricos que proporcionan tanto CST como el software desarrollado en el Grupo de Microondas [2]. Estos resultados se muestran en la Figura 15. Los resultados son parecidos a los obtenidos en la Figura 10, salvo por el hecho de que el cero de transmisión provocado por la interferencia destructiva se sitúa ahora en torno a los 5 GHz, es un cero de transmisión a una frecuencia menor. La coincidencia entre los resultados experimentales y los predichos según el método descrito en [2] es buena. Especialmente cabe destacar que la atenuación en la señal transmitida ocurre a una frecuencia muy cercana a la predicha por dicho análisis numérico. Los resultados de CST no coinciden ahora con los experimentales con tanta precisión, pero sí al menos muestran una caída en la transmisión en la misma zona de frecuencias.



**Figura 15:** Coeficiente de transmisión  $|S_{12}|$  para un microstrip cubierto con  $L=14.8$  cm,  $w=h=1$  mm,  $hc=0.5$  mm y  $\epsilon_r = 2.2$ . Se comparan los resultados medidos (línea roja) con los obtenidos mediante el método descrito en [2] (línea verde) y el análisis numérico de CST (línea azul).