

### 3 DESARROLLO DE LA SONDA

Una vez que hemos validado los modelos HFSS, en este paso lo que vamos a hacer es estudiar el comportamiento de las sondas para un amplio rango de valores de  $\epsilon'$  y de  $\epsilon''$ , correspondientes a los valores esperados de nuestras muestras. El estudio ideal sería un estudio paramétrico (en módulo y fase) de la respuesta de las tres sondas midiendo materiales con parejas determinadas de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ , pero estamos limitados por el compromiso existente entre precisión y potencia de cálculo. Este estudio ideal requeriría unos tiempos de cálculo que sobrepasan largamente los objetivos temporales del Proyecto. Por tanto, teniendo en cuenta lo visto anteriormente de que la variación de  $\epsilon'$  se nota principalmente en la fase y que la variación de  $\epsilon''$  se nota en la magnitud, vamos a realizar el siguiente estudio:

$\epsilon'$ (estudio de la fase)	De 3 a 60 en pasos de 2 $\epsilon''=25$
$\epsilon''$ (estudio de la magnitud)	De 0.1 a 50 en pasos de 2 $\epsilon'=30$

Tabla 3.1: Análisis de desarrollo

El objetivo de este estudio es obtener una base de datos suficientemente amplia (y suficientemente precisa) con la que comparar los valores que obtengamos en las medidas. El método que utilizaremos consistirá en comparar los valores de magnitud y de fase de las medidas y obtener por comparación el valor de las partes real e imaginaria de la permitividad más probable, tomando como criterio de probabilidad la cercanía con los valores medidos con los valores calculados por HFSS para los diferentes valores de permitividad.

Hay parejas [ $\epsilon'$   $\epsilon''$ ] que no son reales, o al menos no son lógicas dado que  $\epsilon'$  debe ser prácticamente en todos los casos mayor que  $\epsilon''$ , pero realizaremos su estudio de todas formas. A la hora de programar el algoritmo de decisión de la permitividad más probable tendremos en cuenta este hecho y desecharemos posibles resultados que incumplan esta condición.

Tenemos que tener en cuenta que este método es un método experimental, así que una fase primordial de su desarrollo será la comparación con otras aproximaciones al comportamiento de la sonda coaxial abierta en un extremo. Para poder realizar esta comparación (que se hará más adelante y no ahora), hemos decidido utilizar magnitudes y fases normalizadas en lugar de magnitudes y fases. Lo que haremos será normalizar los resultados con respecto a un cálculo de referencia de la sonda en el aire, tal como se hacía en el método de la capacidad equivalente. Si recordamos este método, veremos que necesitábamos un plano de referencia de fase para poder calcular la permitividad a partir del coeficiente de reflexión medido y por lo tanto era necesario conocer  $\rho_{med}/\rho_{aire}$ .

Por lo tanto, la magnitud y la fase normalizadas quedan:

$$\begin{aligned} |S_{11}|_{norm} (dB) &= |S_{11}|_{medido} (dB) - |S_{11}|_{aire} (dB) \\ \Phi_{norm} (^\circ) &= \Phi_{medido} (^\circ) - \Phi_{aire} (^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

Veamos a continuación los resultados de los análisis. Se han realizado seis análisis (dos, el de  $\epsilon'$  y el de  $\epsilon''$ , por cada una de las tres sondas) y se presentan los resultados de dos maneras diferentes: en primer lugar, mediante ábacos en Excel y en segundo lugar, mediante representaciones tridimensionales realizadas en el programa Maple. Estas representaciones nos permitirán ver los resultados de una forma más inmediata: presentamos un corte bidimensional del gráfico en el cuál, como ejes tenemos los valores de frecuencia y de permitividad. Si se conoce el valor de la fase o la magnitud normalizada a una frecuencia determinada, buscamos en la escala el color al que corresponde dicho valor y entramos en el gráfico con la frecuencia. A dicha frecuencia, el color obtenido corresponde a un único valor de permitividad. En los ábacos de Excel, no hay que olvidar que no estamos intentando comparar la curva que se obtenga en la medida con ninguna curva en particular (las curvas del ábaco se obtienen para múltiples valores constantes de permitividad), sino que la permitividad real irá variando con la frecuencia, por lo tanto, para cada valor de frecuencia se acercará más cada vez a una curva diferente.

Comenzamos por la sonda SP, por el análisis de  $\epsilon'$  ( $\epsilon''$  fija = 25), por lo tanto, es un análisis de la magnitud normalizada, en dB:

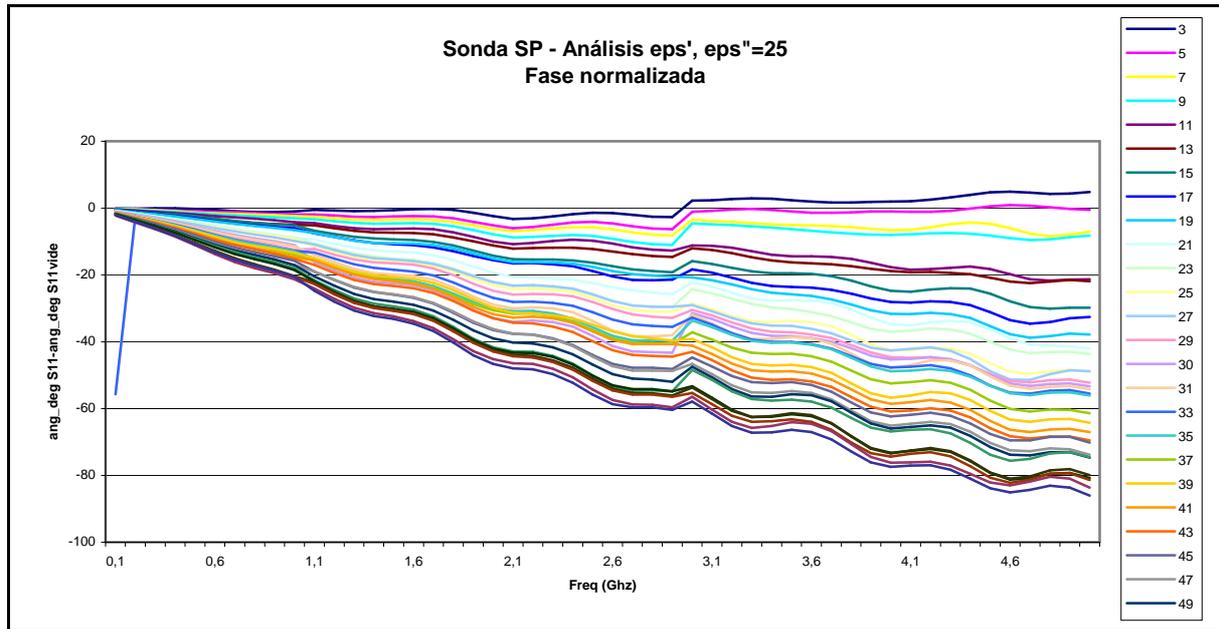


Fig. 3.1: Sonda SP. Análisis de  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''=25$  (Excel)

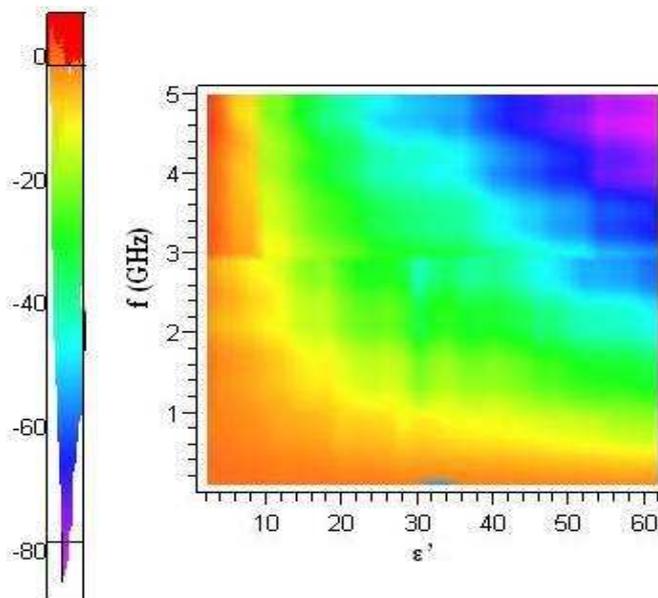


Fig. 3.2: Sonda SP. Análisis de  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''=25$  (Maple)

El siguiente análisis que se presenta también corresponde a la sonda SP, aunque en este caso se trata del análisis de  $\epsilon''$  (con  $\epsilon'$  fijo = 30). Por lo tanto, es un análisis de magnitud:

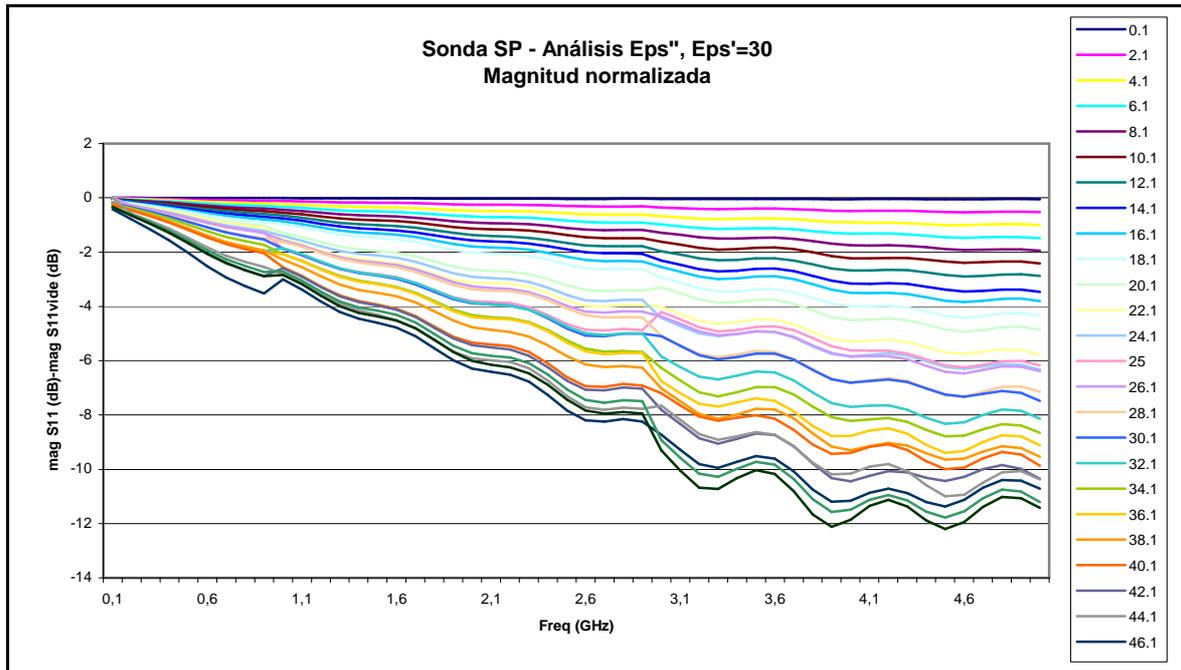


Fig. 3.3: Sonda SP. Análisis de  $\epsilon''$ ,  $\epsilon'=30$  (Excel)

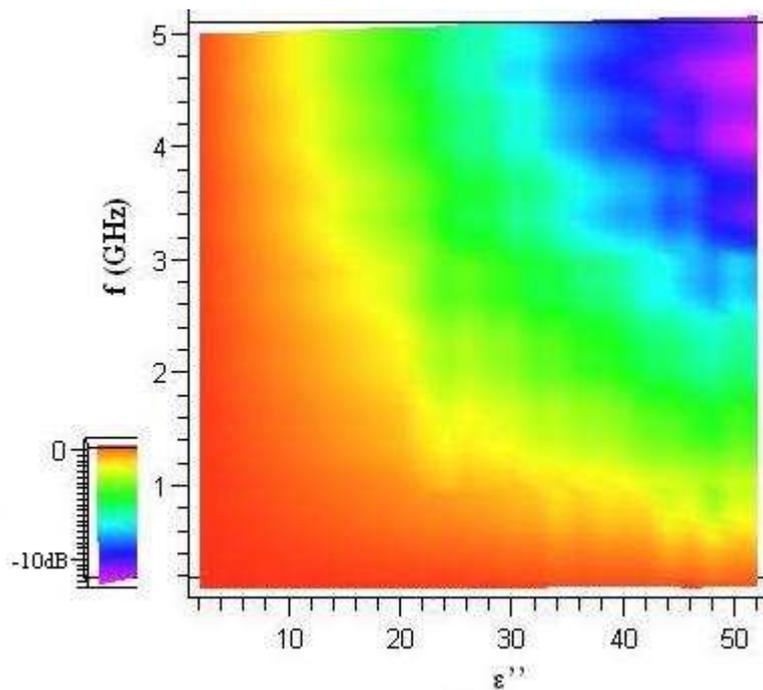


Fig. 3.4: Sonda SP. Análisis de  $\epsilon''$ ,  $\epsilon'=30$  (Maple)

La sonda SP, a causa de su pequeño diámetro trabaja bien en alta frecuencia, incluso para las parejas [ $\epsilon'$   $\epsilon''$ ] que son imposibles.

Estudiaremos a continuación la sonda N, viendo en primer lugar el análisis de  $\epsilon'$ , con  $\epsilon''$  fija. Veamos los resultados:

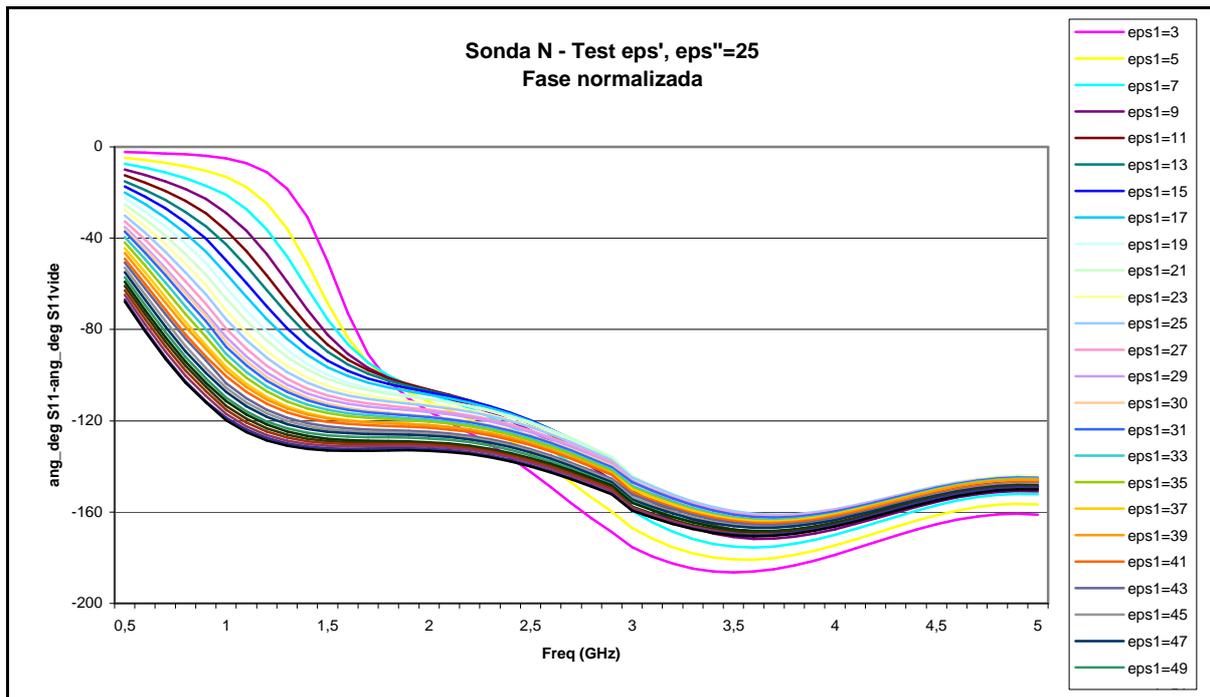


Fig. 3.5: Sonda N. Análisis de  $\epsilon'$  (Excel)

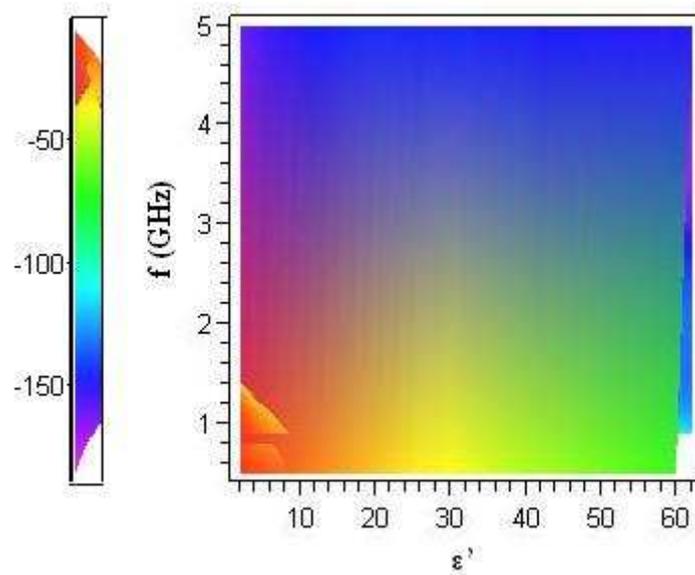


Fig. 3.6: Sonda N. Análisis de  $\epsilon'$  (Maple)

Vemos que a alta frecuencia el comportamiento dista de ser óptimo para nuestra aplicación. De hecho, los resultados son prácticamente inexplotables, debido a que las curvas son prácticamente iguales.

Seguimos a continuación con la sonda N, con el análisis de  $\epsilon''$ , con  $\epsilon'$  fijo. Veamos la magnitud normalizada:

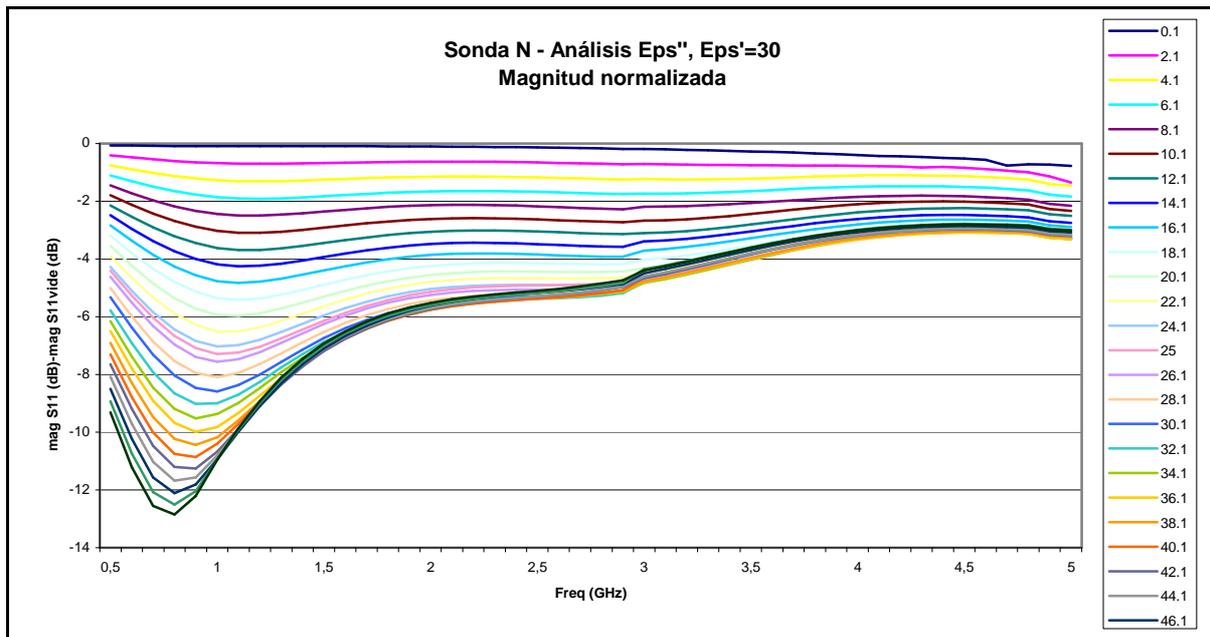


Fig. 3.7: Sonda N. Análisis de  $\epsilon''$  (Excel)

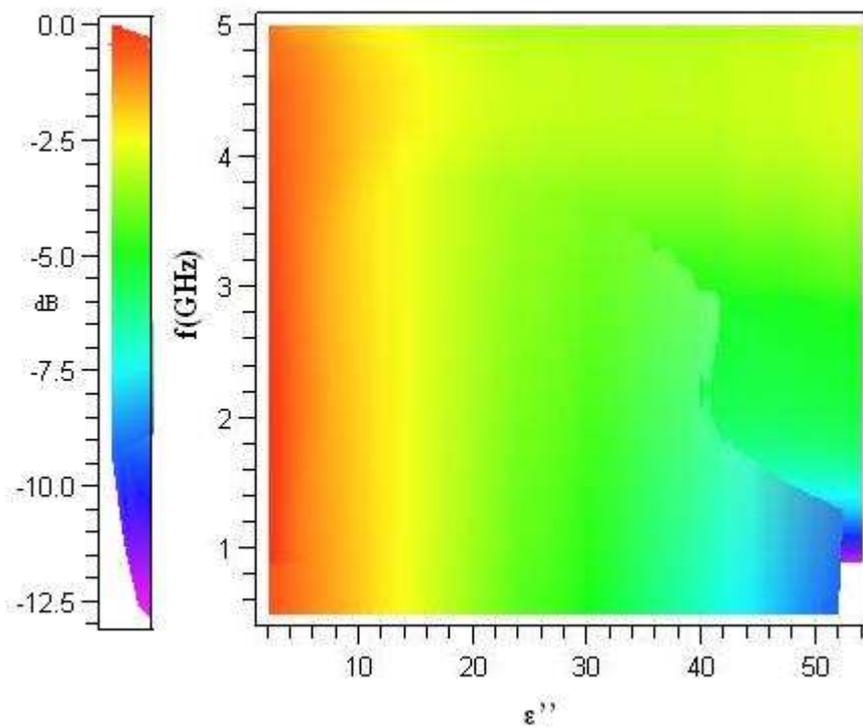


Fig. 3.8: Sonda N. Análisis de  $\epsilon''$  (Maple)

Por último, nos adentramos en el estudio de la sonda SMA, comenzando por el análisis de  $\epsilon'$ :

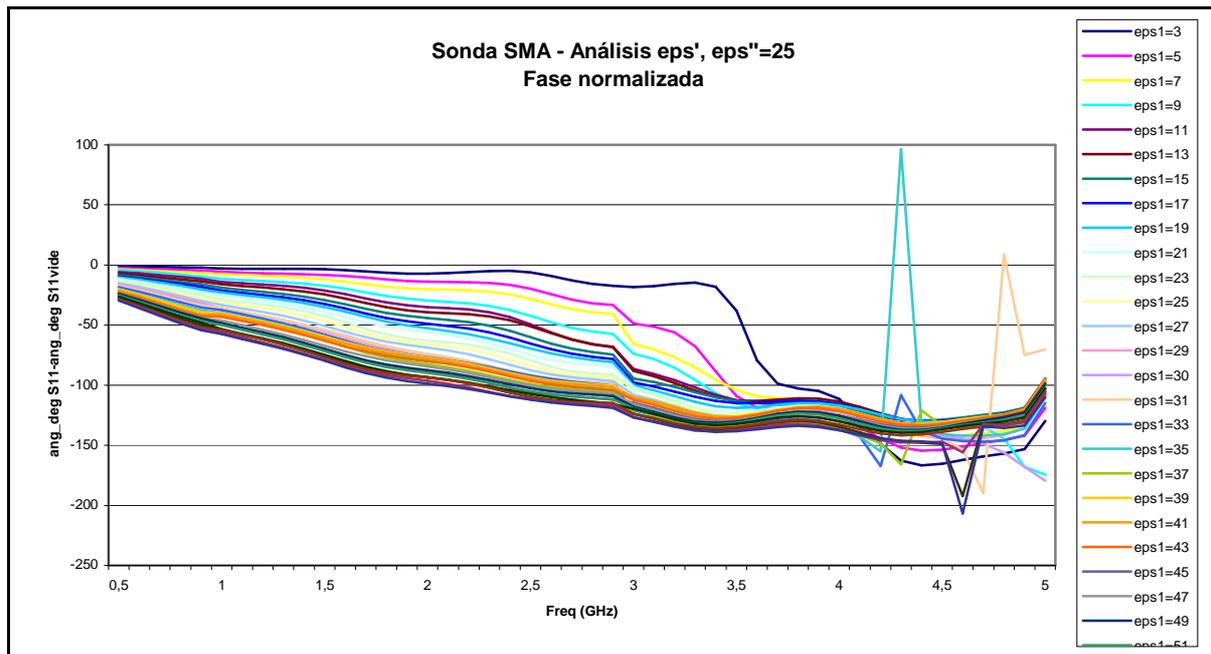


Fig. 3.9: Sonda SMA. Análisis de  $\epsilon'$  (Excel)

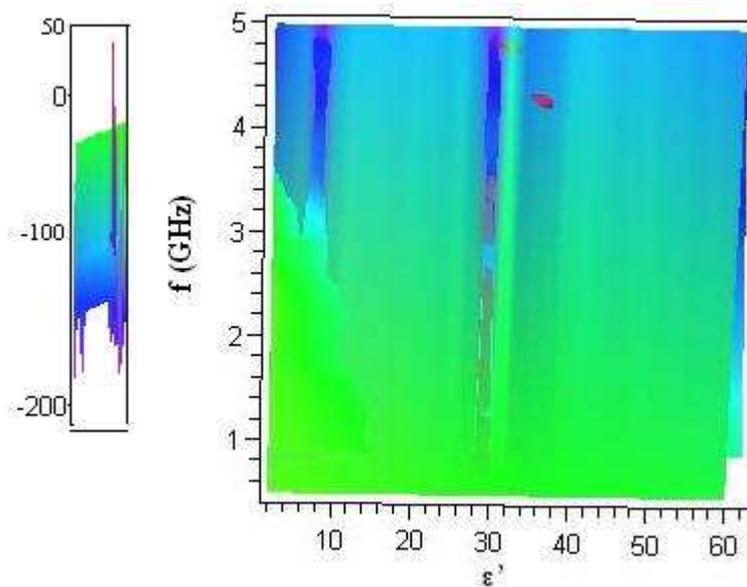


Fig. 3.10: Sonda SMA. Análisis de  $\epsilon'$  (Maple)

Para esta sonda también vemos que el comportamiento en alta frecuencia no es óptimo.

El último análisis es el de la parte imaginaria de la permitividad para la sonda SMA:

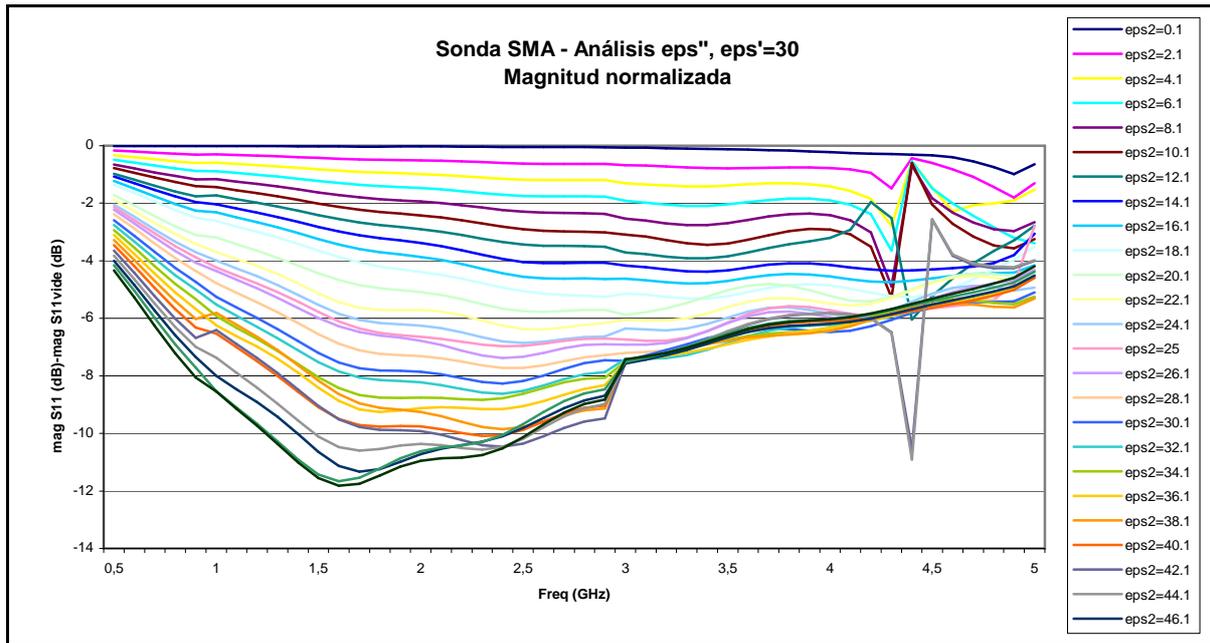


Fig. 3.11: Sonda SMA. Análisis de  $\epsilon''$  (Excel)

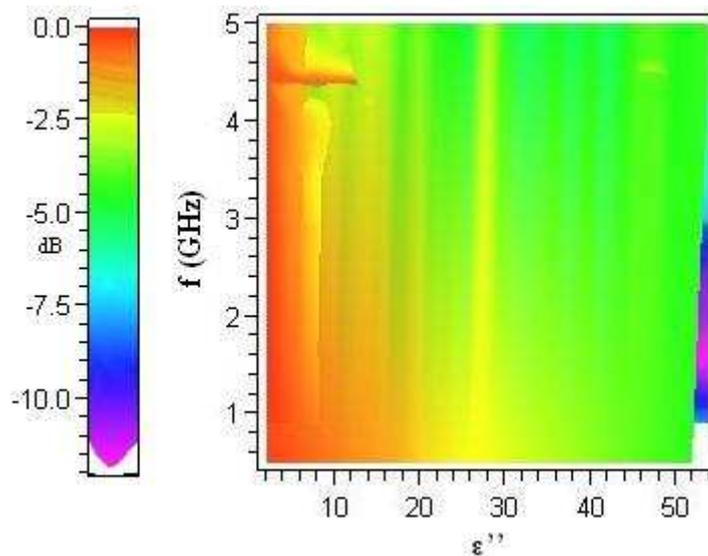


Fig. 3.12: Sonda SMA. Análisis de  $\epsilon''$  (Maple)

Como decíamos antes, la primera conclusión a la vista de los resultados es que no se pueden utilizar las curvas como si fueran continuas. La razón, que se ha considerado la permitividad como constante para todo el rango de frecuencias. Será necesario, pues, comparar los resultados experimentales para diferentes frecuencias. Normalmente, esta comparación nos dará la variación de la permitividad del material con la frecuencia.

La segunda conclusión concierne a la sonda SMA, que presenta un comportamiento inexplorable a alta frecuencia. Por dicha razón, vamos a considerar a partir de aquí que los resultados para la sonda SMA son inexplorables a partir de 4GHz.

Pero en realidad el método aún está a todas luces incompleto. Nos falta por saber el efecto de  $\epsilon'$  sobre la magnitud en el estudio de  $\epsilon''$  y también el efecto de  $\epsilon''$  sobre la fase en el estudio de  $\epsilon'$ . Para ello, hemos decidido ampliar los análisis: el de  $\epsilon''$  se ha repetido con  $\epsilon'=10$  y  $\epsilon'=50$  y el de  $\epsilon'$  con  $\epsilon''=5$  y  $\epsilon''=15$ .

Esta ampliación de los análisis nos trae también una mayor complejidad en el método de cálculo de la permitividad. Ahora, todo se multiplica por tres: si antes mirábamos la magnitud normalizada para obtener la  $\epsilon''$  más probable, ahora tenemos tres ábacos de magnitud normalizada, correspondientes a  $\epsilon' = 10, 30, 50$ . Por tanto,

las tres posibles soluciones serán:  $10-jx_1$ ,  $30-jx_2$ ,  $50-jx_3$ . Si a continuación miramos los ábacos de fase normalizada, por la misma razón obtendremos tres nuevas soluciones:  $x_a-j5$ ,  $x_b-j15$ ,  $x_c-j25$ .

Nuestro problema ahora es que tenemos seis soluciones posibles, pero sólo debemos presentar una, que será evidentemente la que estimemos que es la más cercana a la realidad. Hay que desarrollar un algoritmo para realizar esta elección: comenzaremos por definir tres “dominios” para  $\epsilon'$ , que son (10, 30, 50) y los llamaremos (1, 2, 3) y otros tres dominios para  $\epsilon''$ , que son (5, 15, 25) y los llamaremos (a, b, c). Los dominios se han definido de tal forma que, por ejemplo, los dominios (1, 2, 3) significan respectivamente valores bajos, medios y altos de la parte real de la permitividad y los dominios (a, b, c) significan valores bajos, medios y altos de la parte imaginaria.

La explicación del algoritmo que vamos a seguir es la siguiente: nos aprovecharemos del hecho de que los valores  $x_i$ ,  $i = 1,2,3$  (correspondientes a los valores posibles de la parte imaginaria de la permitividad cuando miramos los ábacos de magnitud normalizada) presentan una menor dispersión en torno a un valor medio para ver “hacia donde apuntan” los valores  $x_i$ , es decir, si nos indican que la parte imaginaria de la permitividad es baja, media o alta. El siguiente paso será definir unos vectores  $\delta$  de la forma:

$$\begin{aligned}\delta_a &= [|5 - x_1|, |5 - x_2|, |5 - x_3|] \\ \delta_b &= [|15 - x_1|, |15 - x_2|, |15 - x_3|] \\ \delta_c &= [|25 - x_1|, |25 - x_2|, |25 - x_3|]\end{aligned}$$

Estos vectores  $\delta$  representan la distancia del conjunto de soluciones  $x_i$  a cada uno de los dominios (a, b, c). Para conocer a qué dominio se acercan más, vamos a calcular las medias de los vectores,  $\delta_j$ ,  $j = a, b, c$ , para escoger el dominio  $j$ :

$$j = \arg \min(\{\delta_j\}, j = a, b, c)$$

Una vez que tengamos el dominio  $j$ , haremos la suposición de que la parte real de la permitividad es el resultado que corresponda a dicho dominio, es decir, tendremos también  $x_j$ . El siguiente paso es decidir en qué dominio  $i$  nos movemos, es decir, si el valor  $x_j$  que hemos obtenido nos indica que la parte real es baja, media o alta. Para escoger el dominio  $i$ , vamos a buscar el dominio (entre  $\epsilon'_i = (10,30,50)$ ) más cercano a  $x_j$ :

$$i = \arg \min(|x_j - \epsilon'_i|, i = 1,2,3)$$

Realizamos la suposición de que la parte imaginaria que buscamos es la que corresponde al dominio  $i$  encontrado:

$$\epsilon = x_j - jx_i$$

Solamente en el caso de que  $x_j < 3$  o  $x_i < 2$ , hará falta afinar un poco el valor, ya que no nos podemos permitir tener tan poca precisión para valores bajos de la permitividad. Para ello, se ha hecho otro análisis paramétrico con HFSS, que llamaremos análisis de afinamiento:

$\epsilon'$ (estudio de la fase)	De 1 a 6 en pasos de 1 $\epsilon''=2$
$\epsilon''$ (estudio de la magnitud)	De 0 a 3 en pasos de 0.5 $\epsilon'=3$

Tabla 3.2: Análisis de afinamiento.

El método se ha automatizado gracias a un programa realizado con el programa de cálculo MATLAB (ver Anexo 3) y validado con las medidas experimentales de muestras de agua (las mismas que se estudiaron en el Capítulo 2, cuyas permitividades se habían llegado a estimar) y muestras de arena seca, cuya permitividad es conocida,  $\epsilon=3-0.001j$ .