# 2 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS HESS

Como explicamos anteriormente, nuestro estudio de la sonda coaxial abierta en un extremo se basa en un nuevo enfoque, basado en el comportamiento. Decíamos que para el estudio era necesario definir un modelo HFSS de la sonda y validarlo, es decir, demostrar que HFSS es capaz de representar fielmente el comportamiento de la sonda. Este capítulo se basa en el esquema de la figura 1.18.

# 2.1 MEDIDAS

Recordemos que lo que vamos a medir es el coeficiente de reflexión, S<sub>11</sub> (P<sub>1,reflejada</sub>/P<sub>1,incidente</sub>) con una sonda coaxial abierta en un extremo. En primer lugar, se realizará una medida de referencia, con la sonda al aire, es decir, sin contacto con material alguno. Como hemos dicho anteriormente, el objetivo de estas primeras medidas es obtener unos datos que podamos comparar con los resultados de los modelos HFSS. Estas medidas las realizaremos para los valores extremos de la permitividad: permitividad muy grande (agua,  $\varepsilon$ ' $\approx$ 75) y permitividad muy pequeña (aire,  $\varepsilon$ ' $\approx$ 1).

Las medidas se han realizado con tres sondas diferentes: la sonda N, la sonda SMA y la sonda SP, con longitudes eléctricas y diámetros diferentes:



### 2.1.1 Sonda N

Estas medidas se hicieron con el analizador ANRITSU 37325A, sin filtrado temporal. Se observará que, en ocasiones, la medida de magnitud de  $S_{11}$ , en unidades logarítmicas es mayor que 0, lo cuál implicaría un coeficiente de reflexión mayor que 1 en unidades naturales, lo cuál sabemos que no es lógico. Hay que tener en cuenta, sin embargo, lo que explicamos anteriormente sobre la precisión de la medida con el analizador y la existencia de un error intrínseco a la medida. Para ver la magnitud del error, podemos suponer, por ejemplo, que si medimos un valor de magnitud de 0.1 dB, el error será  $10^{0.005}$ , que está alrededor del 1%, un error achacable al aparato, a los cables y a la sonda. Igualmente, cabe destacar que para la medida del agua se ha tomado agua corriente, a una temperatura estimada de unos  $25^{\circ}$ C.



Fig. 2.2: Respuesta en magnitud de las medidas de 27/09/2006 con la sonde N, en agua y en aire. (Excel)



Fig. 2.3: Respuesta en fase de las medidas de 27/09/2006 con la sonde N, en agua y en aire. (Excel)

### 2.1.2 Sonda SMA

Hemos realizado dos tipos de medida: con una línea de 135mm. de longitud y sin dicha línea. Las medidas se han realizado sobre el analizador ANRITSU 37325A y sin filtrado temporal. El uso de la línea nos va a dar una información interesante sobre la dependencia del comportamiento de la sonda con la longitud: veremos que la fase cambia más rápidamente conforme aumenta la longitud.



Fig. 2.4: Respuesta en magnitud de las medidas de 29/09/2006, con la sonda SMA, en agua y en aire (Excel)



Fig. 2.5: Respuesta en fase de las medidas de 29/09/2006, con la sonda SMA, en agua y en aire (Excel)



Fig. 2.6: Respuesta en magnitud de las medidas de 29/09/2006, con la sonda SMA con línea, en agua y en aire (Excel)



Fig. 2.7: Respuesta en fase de las medidas de 29/09/2006, con la sonda SMA con línea, en agua y en aire (Excel)

## 2.1.3 Sonda SP

Para la medida con esta sonda, hemos introducido una variación de importancia: hemos medido con agua a diferentes temperaturas, con el objetivo de estudiar la posible influencia de la temperatura en la medida: un "agua fría" a 10°C, un "agua templada", a 23°C y un "agua caliente", a 43°C. Las medidas se realizaron sobre el analizador ANRITSU 37325A sin filtrado temporal.



Fig. 2.8: Respuesta en magnitud de las medidas de 6/10/2006, con la sonda SP, en agua y en aire (Excel)



Fig. 2.9: Respuesta en fase de las medidas de 6/10/2006, con la sonda SP, en agua y en aire (Excel)

Una vez realizadas estas medidas, ya tenemos unos datos para comparar con los resultados que calcule HFSS para nuestros modelos. El siguiente paso es presentar dichos modelos y sus resultados, que iremos comentando y variando según lo que nos digan las comparaciones.

# 2.2 SIMULACIÓN HFSS

Como venimos explicando, el modelado HFSS de la sonda coaxial abierta en un extremo es indispensable para el estudio de la sonda mediante el enfoque basado en el comportamiento. En esta sección presentaremos, en primer lugar, el modelo que utilizaremos, para después presentar los resultados de los cálculos realizados por HFSS.

### 2.2.1 Modelo HFSS de la sonda coaxial abierta en un extremo

Hemos utilizado la misma geometría para modelar las tres sondas (N, SMA y SP), salvo los diámetros de los conductores y la longitud eléctrica. Esta geometría consiste en tres cilindros concéntricos. Para modelar los conductores perfectos, se ha utilizado la condición de contorno Perfect E y para considerar un dominio de cálculo infinito, la condición de radiación (Rad) en la caja. La excitación es un Wave Port definido en el extremo de la sonda. La medida se modela mediante la yuxtaposición de la sonda con una caja rellena de un material (interfaz sonda-material) que nosotros podremos definir. Así podemos ver una de las ventajas de este enfoque al estudio de la sonda: la flexibilidad. Por ejemplo, si queremos modelar una medida a una determinada profundidad, sólo tendremos que introducir la sonda la profundidad deseada dentro de la caja que representa el material.



Fig. 2.11: Distribución del campo eléctrico en la sonda. (HFSS)

Hemos analizado la banda de frecuencias entre 100Mhz y 5GHz, con 50 puntos para la sonda N y 200 para las sondas SMA y SP (como hemos visto antes, la longitud eléctrica está relacionada con la velocidad de cambio en la fase, así que para estas dos sondas, más largas, necesitábamos una mayor precisión en frecuencia, es decir, más puntos). En primer lugar, intentamos definir únicamente un barrido frecuencial completo (Sweep) pero aparecieron problemas de cálculo derivados del mallado. Si se define un único barrido, la frecuencia de solución es de 1GHz y el mallado para esta frecuencia no está adaptado para el cálculo entre 3 y 5 GHz. La solución es definir tres barridos en frecuencia: el primero, entre 100MHz y 1GHz (frecuencia de solución de 1 GHz); el segundo, entre 1GHz y 3GHz (frecuencia de solución de 2GHz) y el tercero entre 3 y 5GHz (frecuencia de solución de 4GHz).

Para los primeros análisis, las condiciones de convergencia del cálculo se definieron de la siguiente manera:

Maximum Number of Passes	10	
Maximum Delta S	0.005	
Maximum Refinement Per Pass	20%	
Minimum Number Of Passes	3	
Minimum Converged Passes	3	
Tabla 2.1: Condiciones de convergencia		

HFSS nos proporciona también perfiles de convergencia. Como ejemplo vamos a ver un perfil a 1 GHz con estas condiciones de convergencia:



El problema existente es que es absolutamente necesario encontrar un compromiso entre precisión y potencia de cálculo requerida. Una precisión demasiado importante puede causar que necesitemos valores de tiempo de cálculo y de memoria RAM requerida que no sean realistas. Se sabe que los ordenadores tienen una memoria RAM limitada, así que deberemos adaptar los cálculos al ordenador que tengamos, es decir, si se dispone de un ordenador mejor seremos capaces de encontrar mejores soluciones. Como ejemplo vamos a ver las condiciones de mallado, el tiempo de cálculo y la memoria requerida para las tres sondas:

		f1 (1GHz)	f2 (2GHz)	f3 (4GHz)
	Tiempo de cálculo	00:02:30	00:02:00	00:02:00
Sonda N	RAM	62 MB	34 MB	35 MB
	Número de células	4817	3186	3200
	Tiempo de cálculo	01:47:20	01:10:17	03:06:46
Sonda SMA	RAM	295 MB	268 MB	290 MB
(con línea)	Número de células	35447	29606	37860
	Tiempo de cálculo	01:51:06	03:37:40	03:47:40
Sonda SP	RAM	299 MB	300 MB	302 MB
	Número de células	46257	46707	48600

Tabla 2.2: Capacidades necesarias para los cálculos.

Hay una relación directa entre la longitud de la línea y la complejidad de los cálculos, así como otra relación entre el diámetro de la sonda y la complejidad. Diámetros más pequeños requieren una potencia de cálculo mayor (en la tabla **2.2**, el análisis de la sonda SP tiene un nivel de precisión menor respecto a los otros dos análisis ya que un análisis de la misma precisión resultaba inabarcable).

#### 2.2.2 Simulación Sonda N

La sonda N es la primera que hemos estudiado. Se comenzó realizando una aproximación de la sonda real, que tenía en cuenta únicamente la forma, pero no la longitud eléctrica real. Los resultados con esta aproximación no son verdaderamente interesantes ya que nos muestran un comportamiento totalmente alejado del comportamiento real. De esta aproximación podemos obtener una información que nos permita mejorar el modelo: no se debe obviar la longitud real.

Por lo tanto, la etapa siguiente del estudio fue medir la longitud real de la sonda (con el conector). Tras la medida, obtuvimos una longitud de h=48mm. Queríamos saber también el efecto de los diámetros del conductor y del dieléctrico para una longitud fija. Preparamos un análisis paramétrico con tres valores:

Radio conductor	Radio Dieléctrico	
1.51mm	4.16mm	
0.94mm	2.70mm	
0.63mm	2.07mm	

El diseño para esta sonda es:

Con el fin de comparar con las medidas experimentales, haremos análisis en agua y en aire. Para ello, definiremos, de momento, la permitividad del agua como  $\epsilon$ =78-j14. Los resultados obtenidos con HFSS son:

Tabla 2.3: Análisis paramétrico de la sonda N



Fig. 2.14: Sonda N, respuesta en magnitud (agua). Análisis paramétrico (Excel)



Fig. 2.15: Sonda N, respuesta en fase (agua). Análisis paramétrico (Excel)

Viendo los resultados, vemos que la respuesta no es muy sensible al diámetro (en realidad es lo que esperábamos ya que la relación entre los diámetros del conductor y del dieléctrico se mantiene constante para una línea de  $50\Omega$ ). Vamos a considerar a partir de ahora el caso con un radio de conductor central de 1.51mm y un radio del dieléctrico de 4.16mm (embase N). Se presentaron anteriormente los resultados con este diámetro, pero si recordamos nuestro método, lo que nos importa no son los resultados en sí mismo, sino la comparación con las medidas experimentales. ¿Será nuestro modelo parecido a la realidad? En caso contrario, ¿a qué puede deberse la diferencia? Veamos la comparación tanto en magnitud como en fase de la respuesta, para la medida en el agua:



Fig. 2.16: Comparación de la respuesta en magnitud HFSS y experimental, con teflón como dieléctrico (Excel)



Fig. 2.17: Comparación de la respuesta en fase HFSS y experimental, con teflón como dieléctrico (Excel)

Preguntábamos antes si el modelo HFSS que presentábamos sería una buena aproximación a la realidad o no. En magnitud, aunque el parecido a la realidad sea bastante mejorable (y será mejorado posteriormente), podemos decir que en realidad sí nos estamos aproximando, pero el comportamiento en fase presenta una enorme diferencia. Veamos el motivo: en el modelo que hemos presentado, hemos considerado la sonda como unos cilindros concéntricos: un cilindro de material dieléctrico situado entre dos cilindros de material conductor. Sin embargo, cuando medimos, debemos modelar el conjunto de la sonda y del conector (anteriormente cuando medimos la longitud eléctrica dijimos que medíamos la longitud de la sonda con su conector). Este conector tiene la misma estructura interna que la sonda propiamente dicha, salvo que el cilindro situado entre los dos conectores está relleno de aire ( $\varepsilon' = 1$ ). Por lo tanto, no se puede definir un modelo de sonda en el cuál el dieléctrico sea teflón ( $\varepsilon' = 2.1$ ), sino que tendremos que definir un dieléctrico equivalente, teniendo en cuenta la mucho mayor anchura del conector con respecto a la sonda. Un valor aceptable puede ser alrededor de  $\varepsilon' = 1.2$ . Además, si miramos los resultados presentados arriba (figs. **2.16** y **2.17**), podemos ver que el valor de  $\varepsilon'$  afecta fundamentalmente a la respuesta en fase. Sin embargo,  $\varepsilon''$  afecta a la respuesta en magnitud, ya que como vimos en la Teoría, representa las pérdidas. Veamos a continuación el esquema del conjunto sonda-conector, que nos ayudará a comprender la razón por la cuál es necesario definir un dieléctrico equivalente:



Fig. 2.18: Esquema de la sonda con el conector

Veamos ahora los resultados con el dieléctrico equivalente:







Fig. 2.20: Comparación de la respuesta en magnitud HFSS y experimental, con dieléctrico equivalente (Excel)

Se observa que la magnitud de la medida experimental es irregular, al contrario que los cálculos, lo cuál puede venir provocado por un problema en el contacto entre la sonda y la muestra, pero de momento, no le daremos más importancia. Como primera aproximación, podemos ver que los resultados de los cálculos y de las medidas muestran un comportamiento similar. Hay varias razones posibles de diferencia: por una parte, una posible inexactitud en la medida de la longitud, una inexactitud en la permitividad utilizada para el dieléctrico y por supuesto, la no coincidencia de la permitividad real del agua con la permitividad que hemos introducido en HFSS. De hecho, para esta aproximación se ha considerado un agua cuya permitividad no varía con la frecuencia, contrariamente al comportamiento real de la misma.

### 2.2.3 Simulación Sonda SMA

Tras el modelado de la sonda N, comenzaremos el estudio de la sonda SMA. Se considera que es un tipo de sonda diferente ya que el conector es distinto. Queremos conocer el comportamiento en dos situaciones diferentes: la primera, con una línea de longitud 135mm y también sin dicha línea. Para modelar este estudio, se ha definido un análisis paramétrico cuyo parámetro es la longitud de la línea. El objetivo es saber si será interesante utilizar un filtrado (caso con una línea suplementaria) o no (sin línea, menos perturbación). Vemos a continuación el diseño de la sonda SMA con línea:



Fig. 2.21: Sonda SMA con la línea

Viendo los resultados del primer análisis con esta sonda, se observa que tenemos el mismo problema que para la sonda N: en el caso sin la línea existe un desplazamiento en la fase a causa de la permitividad que se ha escogido para el dieléctrico. La solución que hemos tomado, la misma que en el caso anterior: definir una permitividad equivalente,  $\varepsilon' = 1.2$ . Es curioso reseñar que este problema no se presenta tan claramente en el caso de la línea. La razón es que la línea que se utiliza es una línea coaxial, cuya estructura interna es igual a la de la sonda, por lo tanto, debido a la longitud de dicha línea, la permitividad equivalente del conjunto sonda-línea-conector será parecida a la de la sonda. No se ha considerado de interés presentar los resultados antes de utilizar el dieléctrico equivalente, por ser redundantes con lo expuesto para la sonda N, así que pasamos directamente a presentar los resultados del cálculo en agua con el dieléctrico equivalente:



Fig. 2.22: Comparación de la respuesta en magnitud, para la sonda SMA, en agua (Excel).



Fig. 2.23: Comparación de la respuesta en fase, para la sonda SMA, en agua (Excel).

Para esta sonda, los resultados animan a seguir, ya que vemos que, pese a que siga habiendo diferencias, debidas a lo explicado anteriormente para la sonda N, el comportamiento de la sonda según los cálculos HFSS tiene la misma tendencia que el comportamiento detectado en las medidas.

### 2.2.4 Simulación sonda SP

Tras el estudio de la sonda SMA, pasamos al estudio de la tercera y última sonda. Realizaremos los cálculos en agua y en aire, que como sabemos son los dos casos extremos. Esta sonda es la que presenta el diámetro más pequeño, aunque la relación entre los diámetros de los conductores se mantenga, ya que presenta la misma impedancia (50 $\Omega$ ). Teóricamente, por su pequeño tamaño será la que presente un mejor comportamiento en alta frecuencia y será la mejor adaptada para la medida en líquidos. Presentamos en primer lugar el modelo HFSS:



Veamos los resultados de la simulación en agua, tanto en magnitud como en fase:



Fig. 2.25: Comparación de la respuesta en magnitud HFSS-Experimental en agua (Excel)



Fig. 2.26: Comparación de la respuesta en fase HFSS-Experimental en agua (Excel)

En los resultados de todas las sondas, se ha observado que la diferencia entre la realidad y el modelo va aumentando con la frecuencia, siendo mayor a alta frecuencia. La explicación es que en el modelo que hemos utilizado hasta ahora hemos considerado que la permitividad es constante con la frecuencia, cuando en la realidad esto no es así, sino que la permitividad es variable. Para validar los modelos, es necesario estudiar qué pasaría si en HFSS definiéramos permitividades variables en función de la frecuencia.

En primer lugar, hemos hecho un análisis paramétrico para intentar encontrar la permitividad del agua en función de la temperatura y de la frecuencia. Se ha hecho variar la parte real de la permitividad entre 75 y 80, con un paso de 1 y la parte imaginaria entre 10 y 26, con pasos de 2. Hemos estudiado la banda de frecuencias entre 3 y 5GHz, allá donde veíamos que existía una mayor diferencia entre los resultados calculados por HFSS y las medidas experimentales. Hemos encontrado empíricamente informaciones importantes: la magnitud de la respuesta depende de la parte imaginaria de la permitividad (como ya sabíamos, ya que la parte imaginaria representa un factor de pérdidas) y la fase de la respuesta depende fundamentalmente de la parte real. Debido a que las mayores diferencias se producen en la magnitud, presentamos a continuación los resultados del análisis de  $\varepsilon$ '', en los que se observa que pequeñas variaciones de  $\varepsilon$ ' no provocan gran variación en la magnitud:





Fig. 2.27: Respuesta en magnitud para valores de  $\epsilon$ '' fijos (Excel)

En estas gráficas podemos ver, por ejemplo, que para el agua que hemos denominado "agua fría", podemos decir, mirando los cruces entre las curvas HFSS y las experimentales, que a 3 GHz su ɛ" vale aproximadamente 18 y a 5 GHz vale aproximadamente 26. Para estas gráficas hay que recordar que aún se han realizado los cálculos con permitividades no dependientes de la frecuencia, de ahí que las curvas correspondientes a HFSS no presenten la misma tendencia que las experimentales. Una vez que hemos estimado unos valores posibles para la permitividad del agua fría a 3GHz y 5GHz nos planteamos estudiar la variación entre dichos valores de frecuencia. Para ello, hemos utilizado los resultados de los estudios de Van Hippel en el M.I.T. (Massachussets Institute of Technology)[15] sobre la relación entre la permitividad del agua, su temperatura y la frecuencia de funcionamiento:



Fig. 2.28: Relación frecuencia -permitividad para ɛ' y diferentes temperaturas (Excel)



Fig. 2.29: Relación frecuencia -permitividad para  $\varepsilon$ '' y diferentes temperaturas (Excel)

Entre 3 y 5GHz se puede considerar que la variación de la parte imaginaria de la permitividad es lineal. Así pues, vamos a probar a realizar un cálculo HFSS de nuestra sonda SP midiendo en un material (agua fría) cuya permitividad será variable con la frecuencia (la parte real la consideraremos constante de momento ya que estudiamos la magnitud), siendo 18 a 3GHz y 26 a 5GHz. Veamos los resultados:



Fig. 2.30: Magnitud para una permitividad ε'' que cambia entre 18 y 26 (Excel)

Vemos que hemos conseguido el resultado deseado: la respuesta en magnitud cae con la frecuencia, con la misma tendencia que la medida real. Para completar el estudio vamos a intentar extender este resultado a toda la banda de frecuencias de medida (500MHz-5GHz). Para ello, vemos en las gráficas de Van Hippel que no es descabellado suponer que entre 500MHz y 3GHz la variación de la parte imaginaria de la permitividad con la frecuencia es también lineal, con lo cuál extrapolamos de los valores anteriores y construimos la recta de variación que introduciremos en HFSS (haciendo la regla de tres simple vemos que la permitividad a 500MHz es aproximadamente igual a 8). Los resultados son:



Fig. 2.31: Magnitud para una permitividad ɛ'' que cambia entre 8 y 26 (Excel)

A partir de estos resultados se puede concluir que HFSS puede modelar perfectamente un dispositivo como la sonda coaxial abierta en un extremo. Simplemente hay que prestar atención para introducir en el modelo los parámetros más cercanos posibles a la realidad. Para ello, nos podemos servir de un estudio paramétrico previo, por ejemplo.

Una vez validada la sonda SP, queremos hacer lo mismo para las sondas N y SMA, ya que pese a que presentan un comportamiento más irregular en la medida en agua, su mayor diámetro y su forma (planicie del contacto sonda-muestra) las hacen idóneas para las medidas que deseamos realizar, las medidas con arena mezclada. Hay que reseñar que, por ejemplo, el mayor tamaño de la sonda nos ayudará a promediar mejor las variaciones debidas a inhomogeneidades en las mezclas de arena con agua y sal. Para la validación de dichas

sondas, vamos a realizar el mismo análisis que para la sonda SP. Calcularemos la respuesta de dichas sondas en agua fría, con una permitividad que varía entre 8 y 26 de forma lineal en la banda de trabajo. Hay que recordar que las medidas experimentales para dichas sondas se realizaron en un agua templada, a unos 25°C, por lo que no esperamos resultados tan parecidos a los obtenidos en la sonda SP, pero para lo que se pretende (validar las sondas) nos basta con ver que el comportamiento calculado por HFSS se adapta en tendencia al medido. Veamos los resultados:



Fig. 2.32: Respuesta en magnitud de la sonda N en un material variable con la frecuencia (Excel)



Fig. 2.33: Respuesta en magnitud de la sonda SMA en un material variable con la frecuencia (Excel)

Llegados a este punto, podemos decir que las tres sondas han sido validadas, a pesar de las pequeñas diferencias de las sondas SMA y N a alta frecuencia (explicadas anteriormente) con lo cuál hemos llegado al final de la primera fase de nuestro estudio. El siguiente paso que debemos dar es el desarrollo en HFSS de la sonda de medida que utilizaremos de aquí en adelante.