



UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI

Departament d'Enginyeria Electrònica Elèctrica i Automàtica

Optimización de Sistemas RFID en bandas UHF

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones especialidad Telemática

AUTOR: Javier Lorenzo Galera

DIRECTORES: Antonio Ramon Lázaro Guillén , David Girbau Sala

FECHA: Junio del 2009

Índice

	Pág.
1.- Introducción	1
1.1.- Tecnología RFID	1
1.1.1.- Composición	2
1.1.2.- Estandarización	4
1.1.3.- Regulación	5
1.2.- Antenas Lectoras de Portal RFID	6
1.3.- Antenas Tag RFID	6
1.4.- Objetivos	6
1.5.- Organización de la Memoria	7
1.6.- Referencias	7
2.- Portal de Lectura RFID	9
2.1.- Diseño de Antena Directiva para Portal	9
2.2.- Simulación con SuperNec	10
2.3.- Simulación Realista con MATLAB	14
2.4.- Antena Fabricada	21
2.5.- Referencias	26
3.- Optimización de Tag para RFID	27
3.1.- Diseño de Tag con Slot	27
3.2.- Estudio del Comportamiento del Tag	33
3.2.1.- Simulación del Tag sobre Madera/Cartón	33
3.2.2.- Simulación del Tag sobre Cristal	36
3.2.3.- Simulación del Tag sobre Cristal y Agua	38
3.2.4.- Simulación del Tag sobre Masa con Spacer	41
3.2.5.- Comportamiento con diferentes ϵ_r y grosores de material	43
3.3.- Referencias	46
4.- Conclusiones y Líneas Futuras	47
5.- Anexos	49
A- Simulación de Tag con Madera/Cartón	49
A.1.- Representación de Radiación	60
B.- Simulación de Tag con Cristal	61
B.1.- Representación de Radiación	70
C.- Simulación de Tag con Cristal y Agua	72
C.1.- Representación de Radiación	82
D.- Simulación de Tag con Spacer y Masa	84
D.1.- Representación de Radiación	89
E.- Simulación del Tag con Diferentes Permitividades Relativas	90
E.1.- Representación de Radiación	113
F.- Simulaciones MATLAB	115

1.- Introducción

El sistema de identificación automática más popular es el del código de barras, desarrollado a comienzos de los años 70. La popularidad de dicho sistema es tal, que prácticamente no nos damos cuenta de que nos rodea por todas partes: supermercados y todo tipo de comercios, mercancías en general, documentación oficial del Estado.... Gracias a este sistema se permitió automatizar la entrada de datos, aumentando la velocidad y reduciendo los errores. El problema de estos, son las desventajas que nos encontramos, como la imposibilidad de ser reprogramados, la escasa información que pueden almacenar, la necesidad de tener visibilidad directa con el lector para poder ser leídos o la facilidad con que se pueden llegar a deteriorar e imposibilitar su lectura. Dichos inconvenientes y la necesidad, cada vez mayor, de almacenar más información y de que esta pudiese ser modificada según la evolución del proceso, han hecho evolucionar los sistemas de identificación automática hacia otros campos.

Esto supuso el origen de la tecnología RFID, que son las siglas de Radio Frequency IDentification, en castellano, *IDentificación por RadioFrecuencia*. Se trata de una tecnología inalámbrica que utiliza ondas de radiofrecuencia para identificar de forma automática, eficiente y rápida todo tipo de activos y entidades (fijas o en movimiento), personas, animales, objetos (metálicos o no, tanto en entornos con líquidos como secos). Se presenta como una tecnología sucesora y a veces complementaria de la de los códigos de barras [1].

1.1.-Tecnología RFID

La tecnología RFID tiene una aplicación muy importante en logística, almacenaje y gestión de las cadenas de suministro. Permite una trazabilidad eficiente en tiempo real del inventario. Nos proporciona visibilidad cuando los objetos-entidades fluyen a lo largo de una cadena de suministro desde el fabricante, las empresas de envío, distribuidores y venta al público. Esta visibilidad añadida permite identificar posibles cuellos de botella, así como ahorrar tiempo y dinero. También es utilizado en la inmovilización de vehículos, en control de accesos, telepeaje de los coches, etcétera [2].

El término RFID se empezó a utilizar sobre el año 1997, aunque la tecnología ya es utilizaba desde la primera guerra mundial. El resto de tiempo, hasta el año 2000, se ha producido su desarrollo de miniaturización hasta convertirse en chip RFID y así poderse asociar a todos los productos o artículos.

Actualmente, el sistema RFID se utiliza, como hemos comentado, en gran cantidad de aplicaciones que nos rodean, pero la implantación de dicho sistema al gran mercado no se acaba de producir. A pesar de las mejoras obtenidas con los tags (calidad-precio) y de los avances logrados con la detección y la discriminación de errores en la lectura, resulta muy difícil que hoy por hoy, llegue a substituir por completo a los códigos de barras, debido a la falta de un estándar que permita la interoperabilidad entre productos de distintos fabricantes.

1.1.1.- Composición

Un sistema de auto identificación por RFID está constituido por una serie de bloques básicos:

- *Transpondedor o tag.* Es la etiqueta que va adherida al objeto el cual se desea identificar. Esta constituida por una antena de hilo de cobre, un chip, que contiene la información, y una capa protectora. Existen tres tipos de tags: pasivos, activos y semiactivos
- *Lector.* Dispositivo electrónico que se encarga de generar las ondas de radio, emitirla, captar, mediante una antena, la información contenida en el tag y decodificarla.
- *Antena.* Se encarga de la emisión y recepción de las ondas electromagnéticas para activar el tag.
- *Software.* Encargado de gobernar el lector y de intercambiar datos con el ordenador.

Como es evidente, los tags son una parte esencial de este sistema, ya que contienen la información que nos interesa obtener con el lector. Los diferentes tipos de tags se pueden clasificar de diferentes formas [3].Obtenemos tres grandes bloques en función de donde toman la energía para su alimentación:

- *Pasivos.* No incorporan ninguna fuente de energía. Se alimentan de las propias ondas electromagnéticas que reciben del lector.
- *Activos.* Tienen una fuente de alimentación propia que alimenta sus circuitos. Son más pequeños y fiables que los pasivos. Tienen un tiempo de vida limitado.
- *Semiactivos.* También tienen una fuente de alimentación autónoma, pero no esta constantemente activada. La señal de radiofrecuencia despierta el tag y a continuación emite el código almacenado utilizando un transmisor se activa para aumentar el alcance.

Por otro lado, los sistemas RFID se clasifican dependiendo del rango de frecuencias de trabajo. Dicho rango es determinante en función de la aplicación final en que deseemos realizar la auto-detección por radiofrecuencia y en el diseño del tag. De esta forma obtenemos cuatro tipos (ver *Figura 1.1*):

- Sistemas de baja frecuencia (LF), entre 119-135 kHz

La principal ventaja de esta banda es su gran aceptación en todo el mundo y funciona sin ningún problema cerca de los metales. La distancia de lectura es inferior a 0,5 m. El tipo de tag utilizado en estas frecuencias es pasivo con acoplamiento inductivo. Se suele utilizar en identificación de animales o control de accesos.

- Sistemas de alta frecuencia (HF), a 13,56 MHz

Frecuencia de trabajo también muy difundida, aunque no trabaja correctamente cerca de los metales. La distancia de lectura es de aproximadamente 1m. El tipo de tag utilizado en estas frecuencias es pasivo con acoplamiento inductivo. Se suele utilizar en acceso a edificios o control de movimientos de equipajes de avión, en smart cards, bibliotecas o biometrías.

- Sistemas de frecuencia ultra elevada (UHF), de 860 a 960 MHz

Esta banda de frecuencias no puede ser utilizada de forma global ya que no existen regulaciones globales para su uso y su aplicación depende de la legalidad del país. La distancia de lectura esta alrededor de 4 ó 5 m. En este rango de frecuencias se emplean tanto tags activos como pasivos. Se suele utilizar para aplicaciones de trazabilidad con tags activos.

- Sistemas de microondas a 2,45 GHz

Esta es la frecuencia más habitual para la lectura de tags activos. Posibilita la lectura de los tags a largas distancias y a altas velocidades de transmisión. La distancia de lectura es aproximadamente de 1 m. Se suele utilizar para el seguimiento y trazabilidad de personas u objetos.



Figura 1.1. Rango de frecuencias de trabajo de RFID

A medida que aumentamos el rango de frecuencia de trabajo conseguimos que cada vez el tamaño de los tags pasivos sea menor y mejoramos la tasa de lectura de múltiples tags al mismo tiempo. Por otro lado, al aumentar de rango de frecuencias, empeoramos la capacidad de lectura del sistema en ambientes húmedos o con elementos metálicos próximos.

1.1.2.- Estandarización

Existen dos principales grupos de especificaciones reguladores de la tecnología RFID. Por un lado tenemos a ISO (*International Organization for Standardization*) y por otra parte existe la EPCglobal (*Electronic Product Code Global*), aunque ambas trabajan en poder conseguir tags cada vez con un coste menor dentro del rango UHF.

Los estándares existentes acerca del RFID cubren cuatro aspectos fundamentales:

- Certificación. Se realizan diferentes pruebas para comprobar que los equipos cumplen los estándares y pueden comunicarse correctamente con equipos de otros fabricantes.
- Protocolo en el interfaz aéreo. Se especifica de qué forma se comunican mediante radiofrecuencia los lectores y los tags de RFID.
- Contenido de los datos. Se especifica la semántica y el formato de los datos intercambiados entre los lectores y los tags.
- Aplicaciones. Diferentes aplicaciones de los sistemas RFID.

1.1.3.- Regulación

Como hemos visto, la tecnología RFID puede trabajar en diferentes rangos de frecuencia. Dichos rangos de trabajo no son regulados por igual en todo el mundo. En la siguiente *Tabla 1.1* vemos los diferentes niveles de potencia en función del rango de frecuencia y de la zona geográfica de trabajo.

Banda LF (119 – 135 kHz)			
<i>EEUU/Canadá</i>	<i>Europa</i>	<i>Japón</i>	<i>China</i>
2400/f(kHz) μ V/m@ 300m	119 – 127 kHz; 66 dB μ A/m @ 10 m 127 – 135 kHz; 42 dB μ A/m @ 10 m	30 V/m @ 3m	P _{PEAK} < 1W
Banda HF (13,56 MHz)			
<i>EEUU/Canadá</i>	<i>Europa</i>	<i>Japón</i>	<i>China</i>
13,553 – 13,567 MHz 42 dB μ A/m @ 10 m	13,553 – 13,567 MHz 42 dB μ A/m @ 10 m	13,553 – 13,567 MHz 42 dB μ A/m @ 10 m	13,553 – 13,567 MHz 42 dB μ A/m @ 10 m
Banda UHF (860 – 960 MHz)			
<i>EEUU/Canadá</i>	<i>Europa</i>	<i>Japón</i>	<i>China</i>
902 – 928 MHz P _{e.i.r.p.} = 4W	865,0 – 868,0 MHz P _{e.r.p.} = +20 dBm 865,6 – 868,0 MHz P _{e.r.p.} = +27 dBm 865,6 – 867,6 MHz P _{e.r.p.} = +33 dBm	952 – 955 MHz P _{e.r.p.} = 1W + 6 dB antena Gain = 4W	840,5 – 844,5 MHz P _{e.r.p.} = 2W 920,5 – 924,5 MHz P _{e.r.p.} = 2W (Habilitado desde Mayo del 2007)
Banda de Microondas (2,45 GHz)			
<i>EEUU/Canadá</i>	<i>Europa</i>	<i>Japón</i>	<i>China</i>
2,4 – 2,483 GHz P _{e.i.r.p.} = 4W	2,446 – 2,454 GHz P _{e.i.r.p.} = 500 mW ó 4W	2,4 – 2,4835 GHz 3 mW/MHz(P _{e.i.r.p.} = 1W)	2,4 – 2,425 GHz 250 mW/m @ 3m (P _{e.i.r.p.} = 21mW)

Tabla 1.1 . Regulaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones

Como podemos observar, excepto en la banda de frecuencias de 13,45 MHz, donde en todas las zonas se trabaja a la misma potencia, en el resto de bandas frecuenciales, los niveles de potencia son diferentes en cada región reguladora.

1.2.- Antenas Lectoras de Portal RFID

Para la lectura de diferentes productos identificados mediante el sistema RFID, se utilizan, sobre todo en logística, portales de lectura. Esto se refiere a portales equipados con varias antenas lectoras de tags RFID, que se encargan de detectar los tags que pasan a través de él. Esto supone que dichas antenas deben estar diseñadas para trabajar con polarización circular, de tal forma que permita la lectura de tags orientados de forma paralela o perpendicular a estas. Para poder obtener la polarización circular, la antena más popular y extendida es la de parche con dos de las esquinas opuestas recortadas [4].

Cuando pasan varios productos al mismo tiempo por el portal, es posible que las antenas situadas en este no sean capaces de detectar todos los tags que lo están cruzando [5]. Esto supone graves problemas en el control de tags, lo que impide reconocimientos masivos sin tener la certeza firme de que todos los productos hayan sido registrados.

1.3.- Antenas Tag RFID

Como hemos comentado, los tags son los dispositivos que van adheridos a los productos que han de ser identificados. Dichos tags están compuestos básicamente con un chip que contiene la información que ha de ser transferida y la antena que ha de estar diseñada para corresponder al rango de RFID (*Figura 1.1*) en el que ha de trabajar.

Generalmente, las antenas de los tags están basados en sistemas microstrip, en los que dicha antena está constituida por un conductor y el resto del tag no es material conductor [6]. Esto supone algunos problemas en función del producto en que el tag esté situado. Cuando se sitúan los tags para controlar diferentes productos, esto supone que estos están sobre materiales diversos. Dependiendo de las características de estos materiales, alteran el correcto funcionamiento de los tags, de tal forma que quedan desadaptados, lo que impide su lectura.

1.4.- Objetivos

En el presente proyecto nos planteamos unos objetivos centrados en el estudio de los problemas planteados por los sistemas de lectura RFID.

Por un lado, debido a los problemas existentes en las lecturas de varios productos etiquetados con tags al pasar por un portal RFID, se propone el diseño de una antena lectora de RFID sintonizable [7], que varíe la dirección de radiación para ser capaz, de este modo, de detectar los productos en el momento que se aproximan, atraviesan, o se alejan de dicho portal. Con esto se pretende obtener una antena capaz de minimizar el porcentaje de errores de lectura en portales RFID.

En segundo lugar, como la mayoría de tags utilizados en RFID están basados en microstrip, constituyendo antenas dipolo para la comunicación de estos con los lectores, está constatado un grave problema de desadaptación de los tags en función de sobre que material están situados. En el presente proyecto se diseña un tag basado en slot (la antena constituye la parte no metalizada del tag) en la banda europea (*Figura 1.1*) y se estudia su comportamiento sobre diferentes materiales y de diferentes grosores, buscando posibles alternativas para los casos más comunes (tags sobre madera, cartón, cristal, etc).

1.5.- Organización de la Memoria

El presente proyecto está dividido en tres claras partes.

Por un lado, en el capítulo dos, se propone una antena lectora de RFID para portal sintonizable, basada en una array de monopolos. Primero se estudia su comportamiento realizando simulaciones con *SuperNEC*, seguidamente se extraen resultados simulando su comportamientos más realista con Matlab siguiendo una relación de ecuaciones (método Hallen y de integrales). Finalmente, se procede a la realización de la array y a la comprobación de su comportamiento real en laboratorio.

En segundo lugar, en el capítulo tres, se diseña un tag basado en slot sintonizado a la banda europea con el programa *Momentum* de *Advanced Design System*, de *Agilent Technologies*. Después se simula con el mismo programa el comportamiento del tag realizado en diferentes condiciones, analizando su comportamiento en lo que se refiere a ganancia, directividad, eficiencia y radiación en la banda deseada.

Por último, en el capítulo cuarto se extraen conclusiones de los resultados obtenidos en los dos capítulos anteriores y se proponen posibles caminos de investigación próximos.

1.6.- Referencias

- [1] Prof. Dr. Javier Areitio Bertolín &ndash, Analisis de los sistemas de identificación automática RFID: riesgos a la privacidad y a la seguridad
- [2] Klaus Finkenzeller, RFID Handbook Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification, Wiley, 1999, ISBN: 0-470-84402-7, pag. 427.
- [3] Vipul Chawla and Dong Sam Ha, Virginia Polytechnic Institute and State University. Applications & Practice An Overview of Passive RFID
- [4] Hanphil Rhyu, Frances J. Harackiewicz and Byungje Lee. Wide Coverage Area of UHF-Band RFID System Using a Pattern Reconfigurable Antenna. Microwave and Optical Technology Letter, Vol 49 no 9, September 2007.
- [5] Thorkild B. Hansn and Michael L. Oristaglio. Method for Controlling the Angular Extent of Interrogation Zones in RFID. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol 5, 2006, pag 134-137
- [6] Daniel M. Dobkin, Enigmatics, Sunnyvale, CA., Steven M. Weigand, WJ Communications Inc., San Jose CA. UHF RFID and Tag Antenna Scattering. Technical Feature, May 5, 2006.
- [7] Beat Schaer, K. Rambabu, Jens Bornemann, Fellow, IEEE, and Rüdiger Vahldieck, Fellow, IEEE. Design of Reactive Parasitic Elements in Electronic Beam Steering Arrays. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol 53, no 6, June 2006.

2.- Portal de Lectura RFID

Como hemos comentado, los sistemas de RFID son muy utilizados en logística. Es un sistema muy eficaz para controlar en todo momento la entrada y salida de materiales en el recinto. Esto se consigue instalando unos arcos o portales en los accesos a dichos almacenes. En los arcos se instalan antenas que se encargarán de establecer la conexión con los tags que llevarán adheridos los paquetes.

Las antenas instaladas en los arcos suelen ser de polarización circular para poder atacar ambas polaridades y poder detectar sin ningún problema tags que se encuentren en orientaciones diferentes. Otra opción es utilizar tags con polarización dual, y antenas polarizadas linealmente.

En la teoría, no deberíamos encontrarnos con ningún problema, ya que las diferentes antenas instaladas en el portal podrán detectar los tags del paquete que esté pasando. En casos reales, no suele ser práctico que los paquetes entren de uno en uno en el almacén, por lo que las carretillas suelen transportar varios paquetes en un solo viaje, cada uno con su propio tag identificativo. Estos tags pueden no tener visibilidad directa con las antenas. Esto produce que justo en el momento en que la mercancía traspasa el arco se puedan provocar errores en la lectura, lo cual no es permisible.

Para poder solucionar este problema, una de las soluciones más práctica es no ceñirnos a una única lectura de la mercancía en el momento que esta atraviesa el arco. Esto significa que las antenas realizan diferentes lecturas del material que atraviesa el portal: antes de llegar, al atravesarlo y al alejarse.

2.1.- Diseño de Antena Directiva para Portal

Una de las soluciones posibles, es la instalación de unas antenas en el portal a las cuales se les puede rotar el diagrama de radiación. De esta manera, conseguimos que una sola antena, que en la configuración tradicional solo captaría los tags en el momento que atravesasen el portal, pueda captar el tag justo antes de atravesar el portal, el momento que lo atraviesa y cuando lo ha atravesado y se aleja.

Para poder realizar el cambio de diagrama de la antena, utilizamos una array compuesto por una antena rodeada por varios parásitos, situados todos sobre un plano de masa [1]. En la *Figura 2.1* podemos observar la distribución básica.

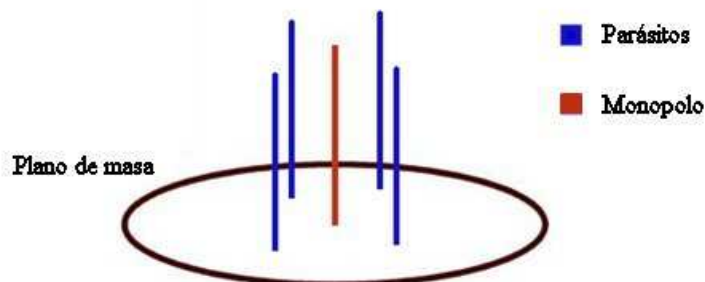


Figura 2.1. Distribución básica array con parásitos. Las varillas azules representan los parásitos, la roja el monopolo y la base es el plano de masa

En esta imagen vemos el monopolo central en rojo y alrededor los parásitos equidistantes en azul. El monopolo está alimentado, asilado del plano de masa. Dicho monopolo radía por defecto de forma omnidireccional. Los parásitos podrán estar conectados o no al plano de masa. Los parásitos conectados al plano de masa actuarán como reflectores del monopolo, los que no, actuarán como directores, debido a la variación de impedancia de los mismos siguiendo el concepto básico de Yagi-Uda. Si situásemos cada parásito en un punto cardinal, si por ejemplo, quisiésemos obtener una mayor directividad en dirección norte, deberíamos conectar el parásito sur a masa. Del mismo modo, si conectásemos a masa los parásitos situados en el norte y el este, obtendríamos mayor directividad en dirección sur-oeste.

2.2.- Simulación con SuperNec

Para poder obtener el efecto deseado, simulamos con SuperNec el esquema propuesto en la *Figura 2.1*. La distribución de la antena y de los cuatro parásitos queda acotada como en la *Figura 2.2*.

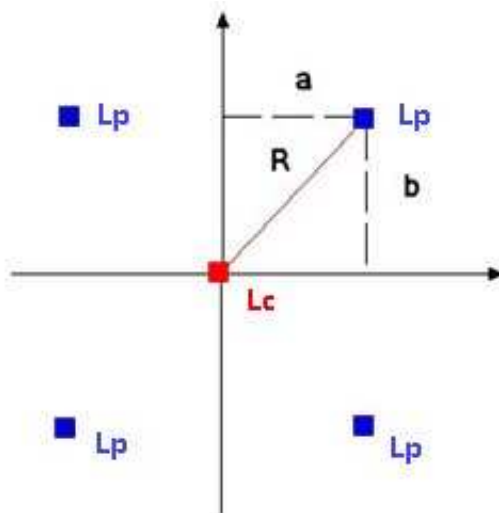


Figura 2.2. Cotas de distribución

En el esquema (*Figura 2.2*) identificamos L_c como el monopolo activo y L_p como cada uno de los parásitos. Para situar de forma equidistante y que la distancia R sea igual del monopolo a todos ellos, a y b serán iguales. Con fin de obtener resultados teóricos relativos, obviaremos la banda de trabajo de los sistemas RFID y simularemos el sistema para una frecuencia de 300 MHz para facilitar los cálculos, ya que obtenemos entonces la longitud de onda λ vale 1 m, y por tanto todas las distancias están normalizadas respecto la longitud de onda (c es la velocidad de la luz y f la frecuencia de la señal):

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^8} = 1m \quad (2.1)$$

Para una optimización, trabajamos con medidas tales que:

$$\begin{aligned} R &= 0.45\lambda = 0.45m \\ L_p &= 0.45\lambda = 0.45m \\ L_c &= 0.45\lambda = 0.45m \end{aligned} \quad (2.2)$$

Para obtener las medidas a y b :

$$a = b = R \cos \frac{\pi}{4} = 0.45 \cdot \frac{\cos \pi}{4} = 0.32m \quad (2.3)$$

Simulamos dicho montaje con SuperNec, de tal forma que implementamos un plano de masa ideal donde estarán conectados dos de los parásitos y los otros dos quedan ligeramente separados (0.05 m entre los parásitos y el plano de masa).

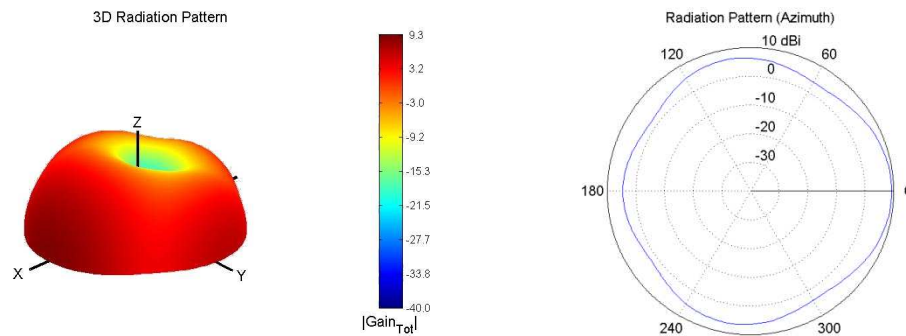


Figura 2.3- Patrón de radiación 3D y 2D con array ideal

Como podemos observar en los patrones de radiación de la *Figura 2.3*, al haber dos parásitos cortocircuitados a masa, la directividad de la antena se ve desviada.

Para poder realizar en la práctica la alternancia de directividad y, por lo tanto, de conectividad, o no, de los parásitos a masa, se implementa un sencillo circuito basado en un diodo [2]; dicho circuito se implementa entre cada parásito y masa, de tal manera que, dependiendo de la alimentación aplicada, el diodo quedará polarizado de forma directa o inversa, actuando como una resistencia muy elevada o muy baja. De esta forma, el parásito queda aislado o no del plano de masa (este circuito se estudiará más adelante).

Para poder simular con SuperNec estos diferentes estados de los parásitos, conectaremos todos a masa, pero no directamente. Los que queramos simular que están conectados a masa por dicho circuito, los separamos de masa 0.05 m y los conectaremos en la simulación con un cable con una impedancia muy baja (0.01 m). Los pasos seguidos para su realización se pueden ver en la *Figura 2.4*.

En el caso de los parásitos que han de quedar aislados del plano de masa, realizaremos la misma operación pero, en este caso, el cable que une el parásito deberá estar cargado con una capacidad muy baja (0.01 m) como vemos en la *Figura 2.5*.

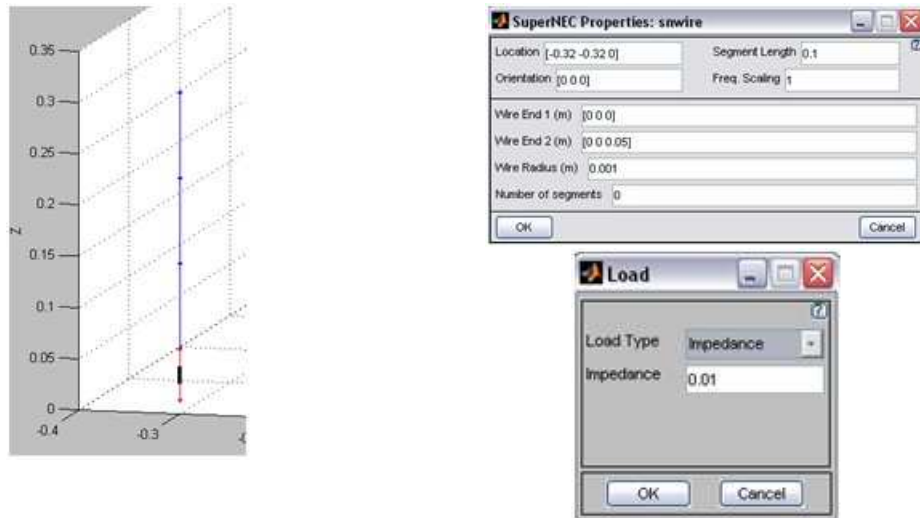


Figura 2.4. Cable de baja impedancia entre el parásito y el plano de masa



Figura 2.5. Propiedad de baja capacidad

En el presente proyecto trabajamos con la banda UHF de RFID, lo que nos define la frecuencia de trabajo entre 860 y 960 MHz, ya que es el rango utilizado en Europa y Estados Unidos. Para este tipo de aplicación, a este rango, nosotros utilizamos un monopolo diseñado para trabajar a una frecuencia de 867 MHz (frecuencia central de la banda RFID Europea), de donde obtenemos que

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{867 \cdot 10^6} = 0.3460m \quad (2.4)$$

En referencia a lambda, obtenemos las siguientes medidas:

$$\begin{aligned} R &= 0.45\lambda = 0.45 \cdot 0.3460 = 0.1557m \\ Lp = Lc &= 0.5\lambda = 0.5 \cdot 0.3460 = 0.1730m \rightarrow 0.0865m \end{aligned} \quad (2.5)$$

Volvemos a calcular las distancias a las que debemos colocar los parásitos del monopolo.

$$a = b = R \cos \frac{\pi}{4} = 0.1557 \cdot \frac{\cos \pi}{4} = 0.1101m \quad (2.6)$$

El esquema para la simulación queda así como vemos en la *Figura 2.6*:

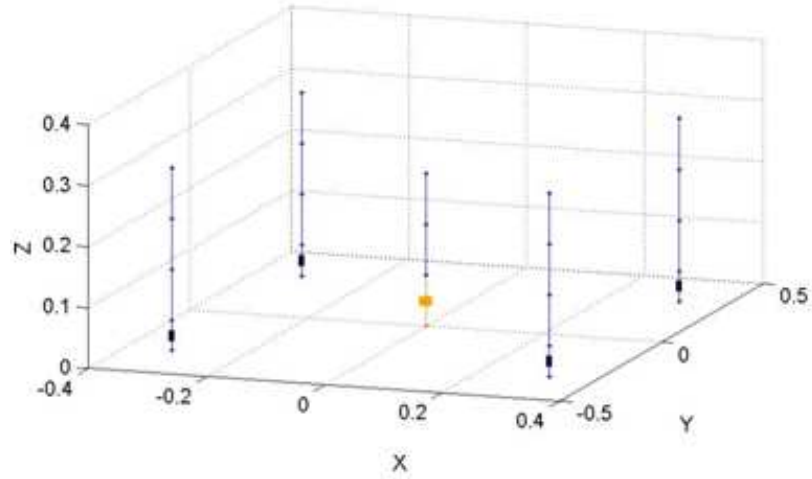


Figura 2.6. Esquema de simulación realista

Al conectar dos de los parásitos a masa con cables de muy baja impedancia y los otros dos con cables de muy baja capacidad y simulamos, obtenemos unos patrones de radiación (*Figura 2.7*) indeseados.

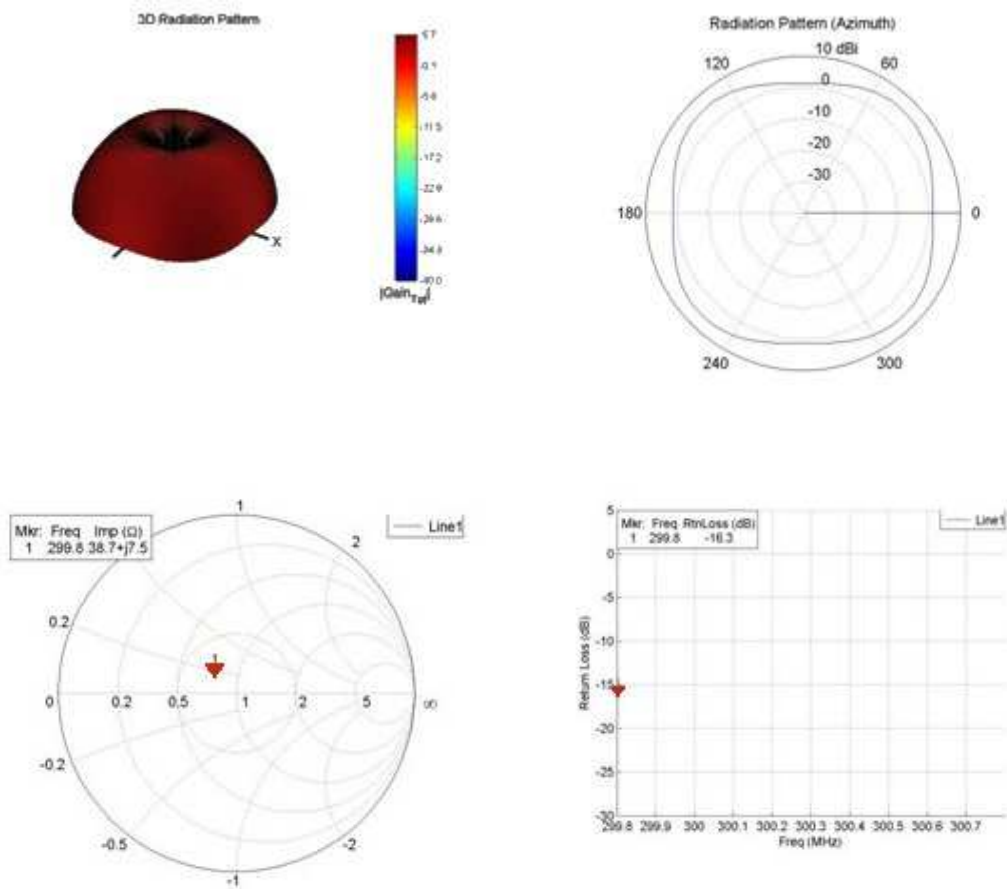


Figura 2.7. Gráficas obtenidas de simulación realista

Observando estas gráficas, vemos que la directividad de la antena no se ve afectada por la acción de los diferentes parásitos.

Aunque las pérdidas de retorno son óptimas (-15dB), podemos ver claramente en los patrones de radiación 3D y 2D que el monopolo sigue siendo omnidireccional, a pesar de haber configurado dos parásitos como reflectores y otros dos como directores.

De estos resultados podemos deducir que el concepto teórico es bueno, ya que en la simulación ideal el diagrama de radiación se modifica claramente en la dirección deseada. Por otro lado, vemos que, en el intento de obtener una simulación más realista con SuperNec no sale como esperábamos, debido probablemente a una adaptación y a un efecto de impedancia entre los parásitos y el plano de masa incorrecto, causado por los valores tan reducidos de capacitancia y de la inductancia en los segmentos utilizados para unir los parásitos (que teóricamente están al aire) al plano de masa.

2.3.- Simulación Realista con MATLAB

Para poder obtener unos datos más próximos a la realidad, debemos tener varios factores más y ser más precisos en los cálculos relacionados en la interacción entre parásitos y la antena. Como veremos más adelante, el método de cálculo empleado por SuperNec es menos preciso que otros existentes que exigen mayor coste computacional.

Las simulaciones realizadas con SuperNec generalmente son muy fiables y nos sirven de guía para seguir con nuestras investigaciones, pero, en nuestro caso, debido a los resultados inesperados obtenidos con la última simulación, decidimos realizar directamente desde MatLab el cálculo relacionado a la relación de impedancias entre los diferentes parásitos, obteniendo una mayor precisión en la definición de las gráficas.

Existen diferentes aproximaciones al cálculo de impedancias en sistemas radiantes. Para ello debe obtenerse la distribución de corrientes a la largo de cada antena.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta que la distribución de corrientes utilizando el teorema de las imágenes de un monopolo es la misma que la de un dipolo, fijaremos las excitaciones. Así el dipolo activo por ejemplo será el primer elemento, mientras que a los dipolos parásitos cortocircuitados se aplicará tensión $V_i=0$. Como por los dipolos en circuito abierto no circulan corrientes se eliminarán de la matriz la fila y columna correspondiente. Invertiendo la matriz de impedancias se pueden obtener las corrientes a la entrada de los dipolos y a partir de ellas el diagrama de radiación y la impedancia de entrada:

$$Z_{IN} = \frac{V_1}{I_1} \quad (2.8)$$

Las impedancias mutuas dependen de la distancias entre los dipolos. Existen varias formas de hallarlas. El primer método consiste en suponer que la distribución de corrientes a lo largo del dipolo es sinusoidal, entonces se pueden encontrar expresiones exactas [3].

Para la impedancia mutua entre dos dipolos de longitud L y separados una distancia d :

$$Z_{21}(L,d) = 30 \left\{ 2Ei(-j\beta d) - Ei(-j\beta\sqrt{d^2 + L^2} + L) - Ei(-j\beta\sqrt{d^2 + L^2} - L) \right\} \quad (2.9)$$

donde

$$Ei(\pm jy) = Ci(y) \pm jSi(y) \quad (2.10)$$

siendo Ci y Si las integrales de Fresnel coseno y seno.

Dichas integrales se pueden hallar de forma numérica o exacta.

La siguiente *Tabla 2.1* muestra el código utilizado para hallar la impedancia mutua. Notar para el caso $d=0$ se obtiene la impedancia de un dipolo aislado de longitud L .

$$Z_{11}(L) = 30(Ci(2\beta L) + Si(2\beta L)) \quad (2.11)$$

donde β es el numero de onda:

$$\beta = k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.12)$$

```
function Z=zmutua(d,l) %d i l en termes de lambda
k0=2*pi;
if d==0,
    [C,S]=trigintegral2(2*k0*l);
    Z=30*C+sqrt(-1)*30*S;
else
    [C1,S1]=trigintegral(k0*(sqrt(l^2+d^2)+l));
    [C2,S2]=trigintegral(k0*(sqrt(l^2+d^2)-l));
    [C3,S3]=trigintegral(k0*d);
    R12=-30*(2*C3-C1-C2);
    X12=-30*(2*S3-S1-S2);
    Z=R12+sqrt(-1)*X12;
end

function [C,S]=trigintegral(x)
w = mfun('Ei',1,sqrt(-1)*x);
S=imag(w);

C=real(w);

function [Cin,Si]=trigintegral2(x)
w = mfun('Ei',1,sqrt(-1)*x);
```

```

Si=imag(w)+pi/2;
w = mfun('Shi',sqrt(-1)*x);
Si=-w*sqrt(-1);
gama=0.5772156649015329;%Euler Gamma constant
C = mfun('Chi',sqrt(-1)*x);
Cin=-C+log(x)+gama;

```

Tabla 2.1. Código de MATLAB para hallar impedancia mutua

Un método más riguroso para hallar la impedancia y diagrama de radiación consiste en utilizar el método de Hallen. Este es análogo al método de los momentos, y consiste en dividir cada dipolo en varios segmentos. Por tanto, no supone que la distribución de corrientes es sinusoidal.

Una vez conocidas las corrientes que circulan por cada dipolo se puede hallar el diagrama de radiación utilizando el concepto de factor de array. En una array circular (UCA) se puede hallar el factor de array [3] utilizando:

$$FA(\theta, \phi) = \sum_{n=1}^N I_n e^{j \frac{2\pi}{\lambda} R_n \sin(\theta) \cos(\phi - \phi_n)} \quad (2.13)$$

donde R_n es la distancia de cada antena al centro de la array ($R_1=0$ y $R_n=R$, para $n>1$) y ϕ_n es la posición angular de cada elemento de la array.

Para una primera simulación, utilizaremos el método Hallen para obtener la radiación de la array de un monopolo y cuatro parásitos (*Figura 2.2*). Para los cálculos, introducimos la longitud de los parásitos en función de $\lambda = 1$ ($f = 300\text{MHz}$) y con un radio de 0,001 m. Siguiendo el paralelismo anterior de la situación de los parásitos con los puntos cardinales, en la simulación especificamos que los situados en el sud y el oeste están conectados a masa y los del norte y este no.

La *Tabla 2.2* muestra el código utilizado:

```

function [ge,gh,thetav,phiv]=circular
clear Fn F
%Radi nomralitzat en lambda
R=0.35;
Lc=0.45;
Lp=0.45;
%nombbre de parasits
N=4;
%Posicio dels monopols
Phin=2*pi*(0:(N-1))/N;
P=R.*exp(sqrt(-1)*Phin);
Pt=[0,P];%tots inclos central
Lt=[Lc,ones(size(P))*Lp];%vector de longituds

%Dipols cc (excepte el primer) ZL=0
ZL=[0,1e9,1e9,0,0];

figure(1)
polar(angle(P),abs(P),'o')

```

```

%Calculo matriu impedancia
Nt=N+1;
for i=1:Nt,
    for k=1:Nt,
        if i==k,
            Zii=zmutua2(0.001,Lt(i))/2+ZL(i);
        else
            Zii=zmutua2(abs(Pt(i)-Pt(k)),(Lt(i)+Lt(k))/2)/2;
        end
        Z(i,k)=Zii;
    end;
end;
V=zeros(Nt,1);V(1)=1; %vector tensions, nomes el primer esta polaritzat
I=inv(Z)*V; %Trobo les corrents
Zin=V(1)/I(1);%Impednacia de entrada
rho=(Zin-50)/(Zin+50);%coeficient de reflexio
RL=20*log10(abs(rho));%perdues de retorn
RL

%Dibuix dels diagrames
%Tall en theta
thetav=linspace(0,pi/2,180);
phi=45*pi/180; %ha d'apuntar al maxm en phi
for i=1:length(thetav),
    theta=thetav(i);
    psi=j*2*pi*abs(Pt)*sin(theta);
    A=exp(psi.*cos(phi-angle(Pt)));
    F(i)=sum(I.'.*A);
end;
Fn=abs(F).^2/max(abs(F.^2));ge=Fn;
figure(2)
%polar(thetav,abs(Fn))
dbp2(thetav,Fn,30,12)

%Tall en phi
theta=pi/2;
phiv=linspace(0,2*pi,360);
for i=1:length(phiv),
    phi=phiv(i);
    psi=j*2*pi*abs(Pt)*sin(theta);
    A=exp(psi.*cos(phi-angle(Pt))).*Fdipole(Lt,theta);
    F(i)=sum(I.'.*A);
end;
Fn=abs(F).^2/max(abs(F.^2));gh=Fn;
figure(3)
%polar(phiv,abs(Fn))
dbz2(phiv,Fn,30,12)

%-----
function F=Fdipole(L,th)
k=2*pi;
if sin(th)==0, % gains of antenna
    elements % F is K-dimensional
        F = zeros(length(L),1);
    column
else
    F = (cos(k*L*cos(th)/2) - cos(k*L/2)) / sin(th);
end

```

Tabla 2.2 Código utilizado en MATLAB para cálculo Hallen

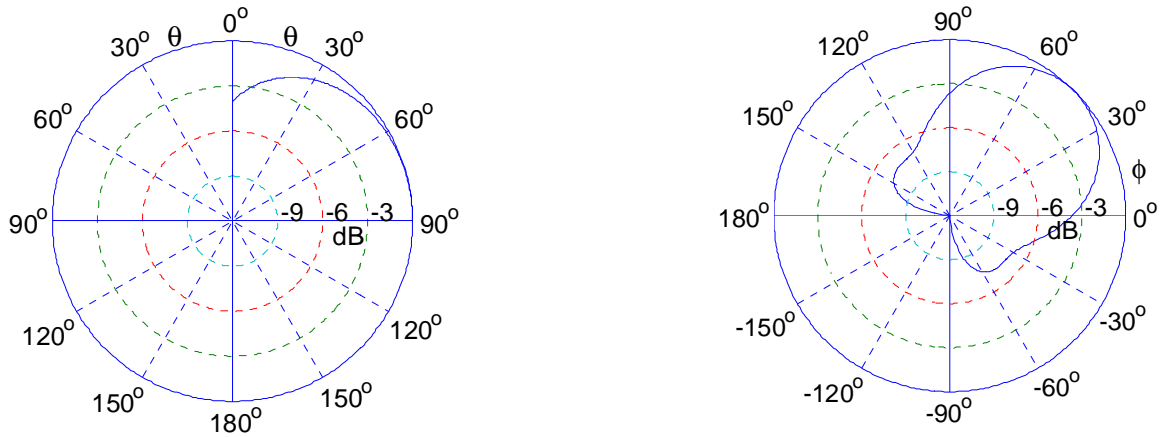


Figura 2.8. Radiación de monopolo y cuatro parásitos

Como podemos observar en la *Figura 2.8*, en la gráfica obtenida sobre el ángulo ϕ se ve claramente que la radiación queda claramente orientada en el sentido esperado (nord-este). En el corte θ podemos ver la forma del óvulo de radiación.

Para llegar a obtener un poco más de precisión, realizamos los cálculos sobre una array más grande, en el que actúen un número mayor de parásitos y realizando el cálculo a partir de integrales. Nos basamos en una array circular consistente de N elemento idénticos, separados de forma equidistante a lo largo del círculo de radio R . De esta forma, la separación angular entre elementos adyacentes es de $\frac{2\pi}{N}$. Los elementos de la antena, como vemos en la *Figura 2.9* pueden ser conductores paralelos de longitud $2h$ y diámetro $2a$.

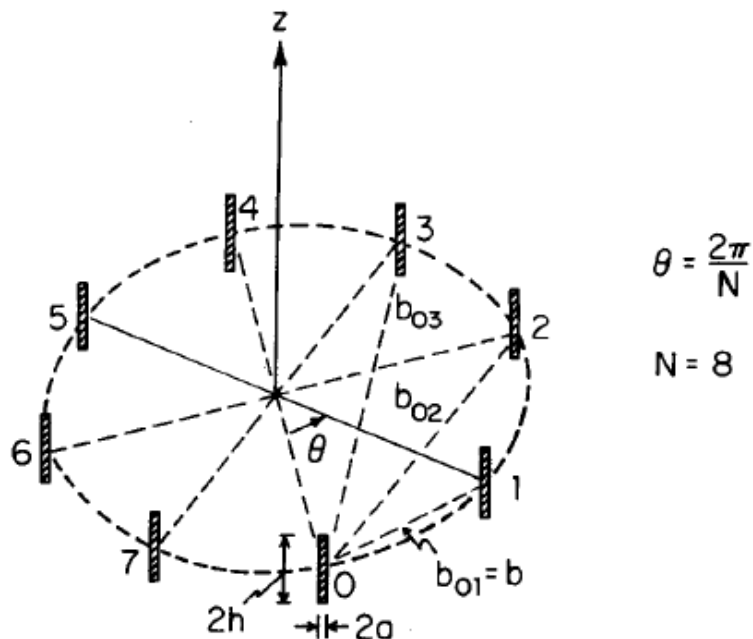


Figura 2.9. Array circular de 8 elementos y monopolo activo

En este caso, el juego de N ecuaciones integrales simultáneas para las N corrientes $I_j(z)$ en los N elementos emparejados es conocida [4]:

$$\int_{-l}^l I_j(z) \cos(kz) dz = V \cos(kz) - \int_{-l}^l I_l(z) \cos(kz) dz \quad (2.7)$$

Donde V es la conducción de voltaje, $\xi_0 = 120\pi$ ohms, y la \mathcal{K} es:

$$\mathcal{K} = \int_{-l}^l \int_{-l}^l \frac{\cos(kz) \cos(kz')}{|z - z'|} dz dz' \quad (2.8)$$

Donde b_{lj} es la distancia entre el elemento l y el elemento j .

La solución de las ecuaciones simultáneas N (7), ha sido llevada a cabo en primer lugar a la reducción de las N ecuaciones integrales que las componen. Esto se logra mediante la selección de juegos de conducción N voltajes, (N secuencias de fase) para cada uno de los cuales la relación es independiente de l . Que es:

$$\int_{-l}^l I_j(z) \cos(kz) dz = V \cos(kz) - \int_{-l}^l I_l(z) \cos(kz) dz \quad (2.9)$$

donde

$$\mathcal{K} = \int_{-l}^l \int_{-l}^l \frac{\cos(kz) \cos(kz')}{|z - z'|} dz dz' \quad (2.10)$$

Implementamos el sistema de ecuaciones y realizamos una simulación en la que podamos comparar las pérdidas de retorno del sistema, con diferentes métodos de cálculo de las impedancias. Como primer método, calcularemos las integrales exactas para el caso de distribución de corrientes sinusoidal, por segundo método tomaremos el cálculo de integrales numéricas y, como tercer método utilizaremos el método Hallen (ver *Apéndice F, Tablas F.1 y F.2*).

En la *Figura 2.10* podemos ver el resultado en un sistema en el que hay cuatro parásitos alrededor del monopolo (dos de ellos a masa).

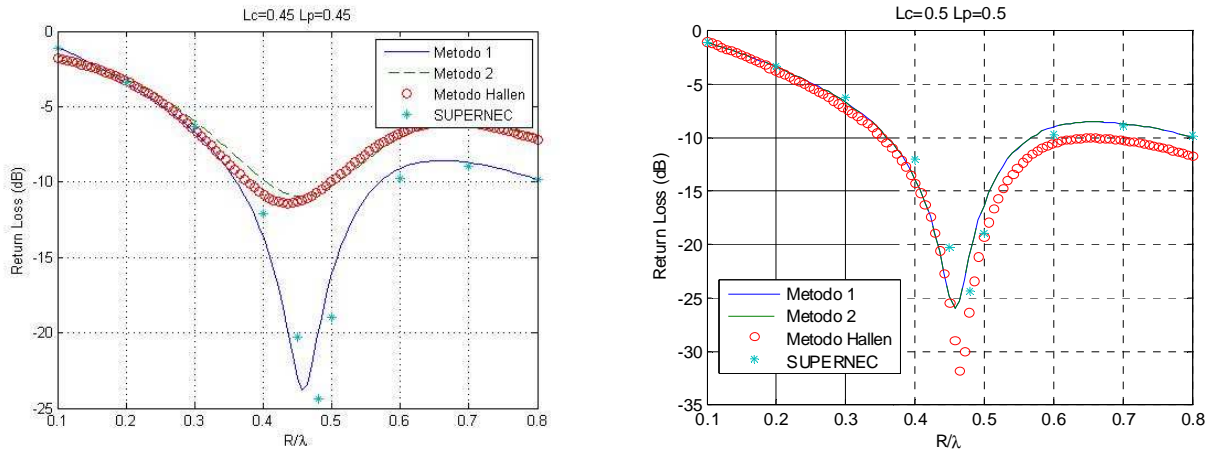


Figura 2.10. Pérdidas de retorno con cuatro parásitos

Las dos gráficas se corresponden al mismo sistema de cuatro parásitos en el que, hemos variado la longitud de los mismos; en primer lugar son a $0,45\lambda$ y en segundo lugar de $0,5\lambda$. Podemos ver como, en el primer caso (método 1), el método de integrales exactas para el caso de distribución de corriente sinusoidal (línea azul continua), que es el más fiel a la realidad, mantiene una adaptación más regular, en la banda de frecuencia de la array, por el contrario, con los otros dos métodos (integrales numéricas en línea verde discontinua y el método Hallen en círculos rojos) obtenemos una adaptación muy pobre, no válida para un caso real. En el segundo caso, el método 1 obtiene prácticamente los mismos resultados, mientras que, con los otros dos métodos, la adaptación en la banda de trabajo mejora abruptamente. En los dos casos, podemos ver una cuarta línea (de asteriscos azules) correspondientes al método utilizado por SuperNec.

Para optimizar el resultado de la array, realizamos los mismos cálculos con un sistema de un monopolo y ocho parásitos (tres de ellos conectados a masa).

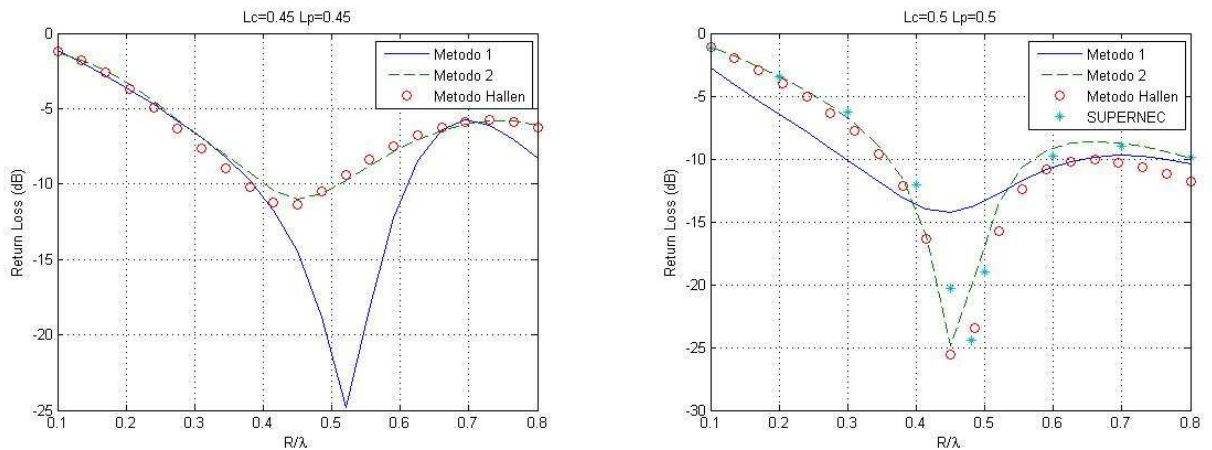


Figura 2.11. Pérdidas de retorno con ocho parásitos

Podemos observar (Figura 2.11) como en el caso en que los parásitos son de $0,5\lambda$ el resultado es prácticamente idéntico al sistema de cuatro parásitos. En el caso de los parásitos de $0,45\lambda$, con los métodos por Hallen e integrales numéricas obtenemos los mismo resultados, pero por el contrario, con el método de integrales exactas, obtenemos

una adaptación ligeramente desplazada pero más buena. Con esto lo que conseguimos es tener una banda de trabajo de la array más ancha.

2.4.- Antena Fabricada

Finalmente, para poder comprobar realmente la funcionalidad de la antena, la montamos y comprobamos su funcionamiento en el laboratorio.

Para un comportamiento más óptimo de la array direccional, la realizamos con un monopolo central y ocho parásitos alrededor. Debido a que necesitamos que el sistema controle el paso de los tags solo por un ángulo concreto, no necesitamos implementar todos los parásitos, solo los del lado contrario (*Figura 2.12 –a-*) de donde queremos que apunte, para que actúen como reflectores de la señal cuando así los configuremos. De esta forma nos quedamos con una array semicircular.

Creamos los parásitos y el monopolo con varillas de cobre a la medida relacionada para funcionar a 867 MHz (2.5).

Para realizar una primera prueba, colocamos la array encima de un rotor (*Figura 2.12 –b-*) y delante suya una antena de RFID. Conectamos la antena y el monopolo de la array al analizador de espectros y medimos el coeficiente de reflexión entre ambos. Soldamos directamente a masa las cinco varillas, por lo que nos aseguramos de que actúan todas como reflectoras del monopolo.



-a-



-b-

Figura 2.12. (a) Antena de portal semicircular; (b) Antena sobre trípode y rotor

Con el programa “*URVRAD*” controlamos el ángulo de giro del rotor para que la array gire sobre sí mismo enfrente de la antena hasta completar los 360°.

Realizamos la prueba seis veces variando los grados del paso del rotor y obtenemos los diagramas de radiación de la antena a 900 y 870 MHz.

Diagrama a 900 MHz

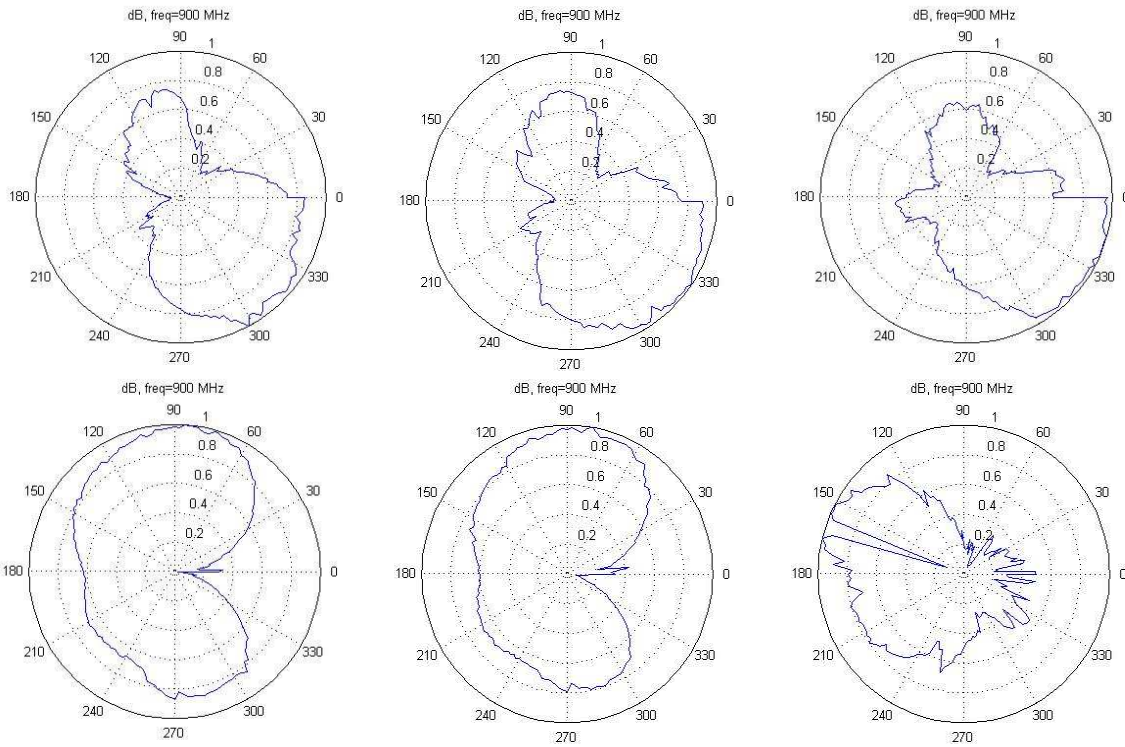


Figura 2.13. Diagramas de radiación a 900 MHz

Diagrama a 870 MHz

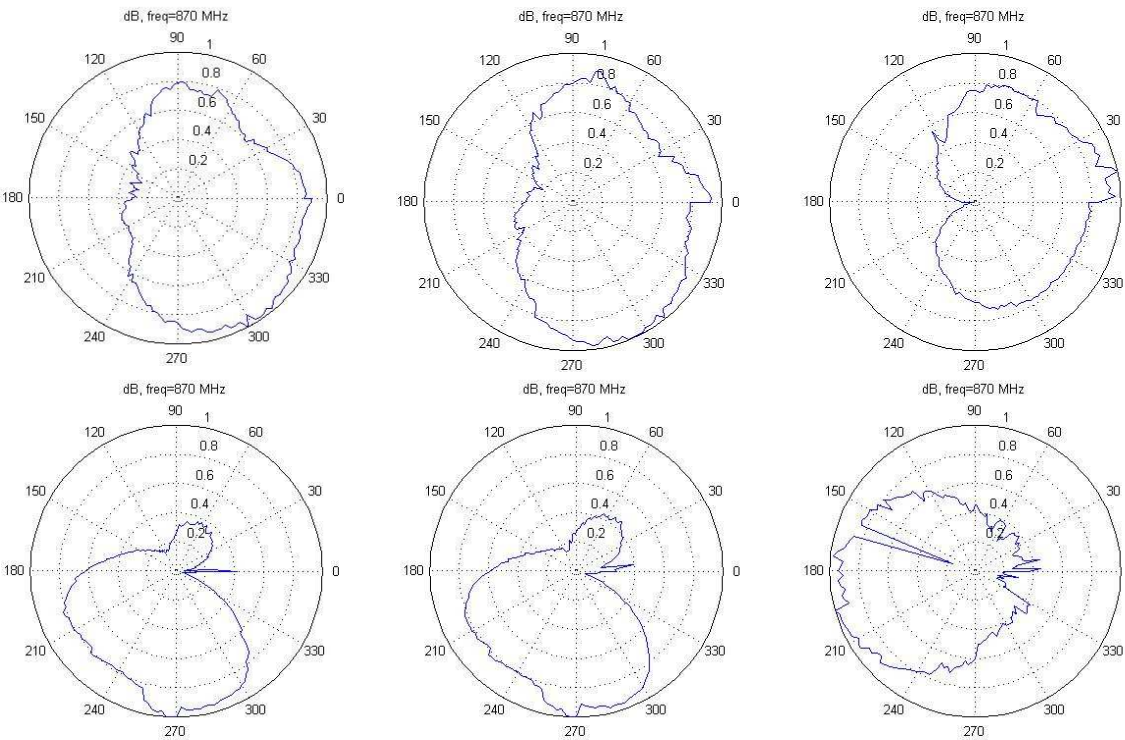


Figura 2.14. Diagramas de radiación a 870 MHz

Podemos observar como, en la mayoría de los casos, la antena se comporta como esperábamos, obteniendo mayor directividad en el lado opuesto del que se encuentran los parásitos. Nos hemos encontrado con el problema de que el rotor ha girado con algunos

problemas en determinados casos y de que, la prueba se ha realizado dentro de un laboratorio en el que se producen reflexiones que afectan la medida de la radiación.

Para poder realizar la conmutación de parásitos que se encuentren conectados a masa o no, en la parte inferior de la placa, conectamos el diodo PIN (BAP64-03 de Philips) y la bobina de choque (presenta alta impedancia en RF y permite el paso de corriente cuando el diodo conduce) entre cada varilla y masa [1] como en el circuito de la *Figura 2.15*. Los condensadores realizan un cortocircuito a frecuencias de RF e evitan cortocircuitar la alimentación. De esta forma, controlando la polaridad de la alimentación, haremos que el parásito quede conectado a masa o no. Cuando alimentamos con una tensión positiva, el diodo conduce y presenta una resistencia muy pequeña. Cuando el diodo se polariza con una tensión negativa esta en corte, se comporta como un condensador parásito y presenta una impedancia muy elevada.

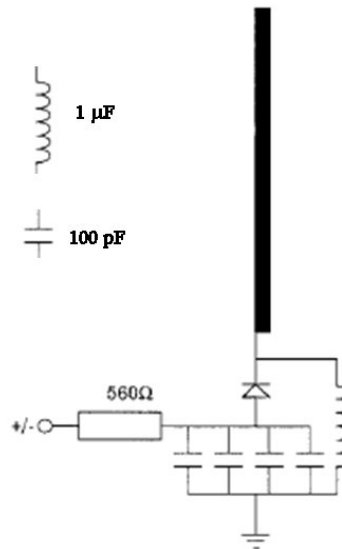


Figura 2.15. Circuito de conmutación

Para realizar las siguientes medidas, variaremos las polaridades de las alimentaciones para conectar a masa los parásitos por parejas consecutivas, sean así 1-2, 2-3 y así sucesivamente, siguiendo la numeración de la *Figura 2.16* (en color rojo vemos el monopolo y en color azul los parásitos).

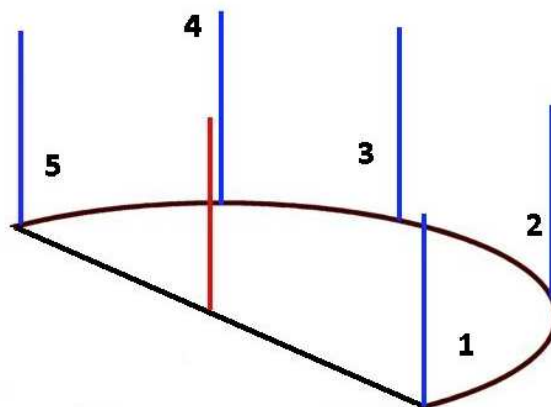


Figura 2.16. Numeración de parásitos de array semicircular

También contemplamos los casos en que los cinco parásitos quedan conectados a masa (*TODOS ON*) y en el que no (*TODOS OFF*). Realizamos para cada caso cuatro medidas a cuatro frecuencias diferentes (860, 867, 900 y 915 MHz).

En la *Tabla 2.1* representamos los diagramas de radiación obtenidos en las mediciones.

Analizando los diagramas de radiación obtenidos, vemos que los resultados son un poco desalentadores. En las medidas realizadas con parejas de parásitos conectados a masa, son aceptables en las frecuencias más bajas (860 y 867 MHz), con las frecuencias más altas (900 y 915 MHz) obtenemos varios lóbulos de radiación dispares, independientemente de los parásitos cortocircuitados.

En los casos más extremos vemos que se repite la situación: con las dos frecuencias más bajas, cuando tenemos todos los parásitos cortocircuitados, vemos que los diagramas obtenidos son bastante buenos, ya que la directividad es la deseada. En los casos de las frecuencias superiores, los diagramas obtenidos no son nada buenos, ya que si esperábamos obtener un lóbulo principal bien definido, lo que vemos es que la radiación de la array es bastante dispar.

Cuando todos los parásitos no están conectados a masa, a la banda de frecuencia más baja, obtenemos el resultado más óptimo, aunque no del todo. En esta situación, la array en realidad debería comportarse prácticamente como si no estuviese y deberíamos obtener el diagrama de radiación del monopolo a solas, es decir, un diagrama omnidireccional. Como comentábamos, a 860 MHz se acerca bastante, aunque no del todo. A medida que aumentamos en frecuencia, el diagrama va empeorando, apareciendo, por ejemplo, diferentes máximos y ceros a 900 MHz.

Los resultados medidos tan poco deseados obtenidos podemos pensar que son debidos a varios factores. Principalmente nos hemos encontrado con el problema de que sistema de rotación de la antena a provocado algunas de las irregularidades destacables de los diagramas de radiación. Por otro lado, el laboratorio en el que realizamos está compuesto por mobiliario diverso, que puede provocar rebotes de la señal (este es el principal factor que impide unas medidas más acordes con la simulación).

Para mejorar las condiciones de medida de los diagramas de radiación, sería recomendable utilizar un sistema de rotación (motor-rotor y plataforma) y sobretodo un recinto más adecuado. Lo ideal sería poder realizar las medidas en una cámara anecoica. Dichas cámaras tienen un blindaje metálico en sus paredes (como una jaula de Faraday) y están forradas por su interior con un material que absorbe las ondas de radiofrecuencia, de esta forma minimizaríamos el problema de los rebotes.

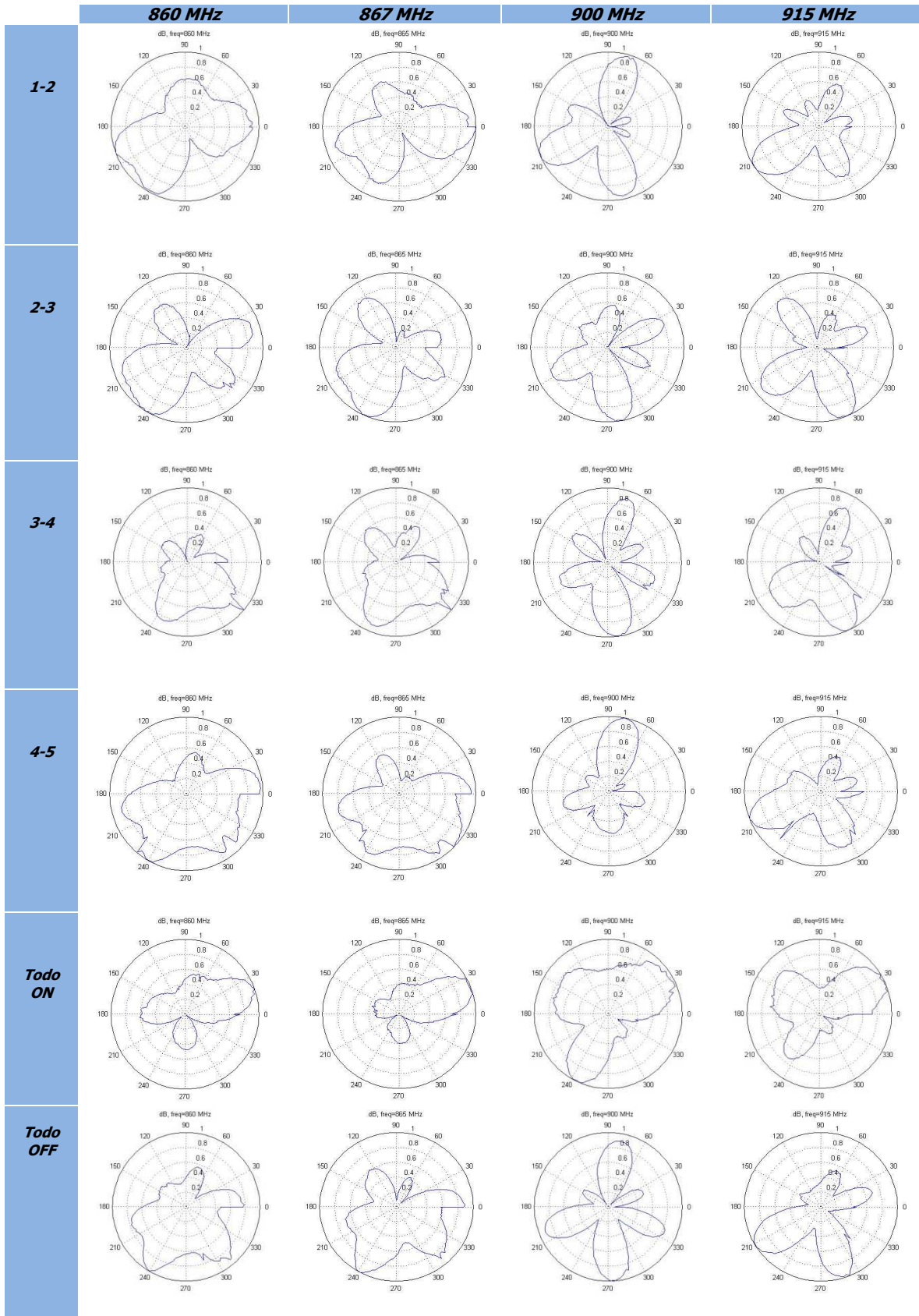


Tabla 2.1. Diagramas de radiación con diferentes configuraciones

2.5.- Referencias

- [1] Naftali (Tuli) Herscovici, Christos Christodoulou, Uniform Circular Arrays for Smart Antennas, Department of Electrical Engineering, Arizona State _University, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol 47, No 4, August 2005.
- [2] Neil L. Scott, Miles O. Leonard-Taylor, Rodney G. Vaughan, Diversity Gain from a Single-Port Adaptive Antenna Using Switched Parasitic Elements Illustrated with a Wire and Monopole Prototype, IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL 47, NO 6, JUNE 1999
- [3] C.Balanis, Antenna Theory. John Wiley&Sons, 1982
- [4] Ronald W. P. King, Life Fellow, IEEE, Supergain Antennas and the Yagi and Circular Arrays. IEEE Transactions on antennas and Propagation, Vol 37, NO 2, February 1989

3.- Optimización de Tag para RFID

En los sistemas RFID, otro de los componentes susceptibles a diseño y, por lo tanto, a constante mejora e investigación, son los tags, buscando un mejor rendimiento de estos en diferentes ámbitos.

Los tags son los encargados de recibir la señal proveniente de la antena (del portal o lector manual) y con ella ser capaces de devolver la información contenida en su chip. Por este caso, los tags deben estar perfectamente sintonizados en el rango de frecuencias de trabajo que se esté utilizando (*Figura 1.1*).

Como hemos comentado, la identificación por RFID es muy utilizada en logística, por lo que los productos a identificar pueden ser de formas y materiales muy diversos. Este es uno de los problemas más importantes a afrontar. El comportamiento de los tags puede variar en función de los diferentes productos en los que esté situado y del tipo de tag empleado, por lo que, dependiendo de la composición del producto en el que esté, producirá que el tag, y por lo tanto el producto, no pueda ser leído correctamente. Esto se produce porque determinados materiales pueden influir en el comportamiento del tag y, de esta forma, hacer que el tag no quede bien adaptado a la frecuencia de trabajo.

En el presente capítulo se presenta el diseño de un tag de slot para la banda RFID UHF Europea (centrada en 867 MHz) y adaptada a la impedancia del chip que ha de contener la información a transmitir. Después se estudia su comportamiento variando el tipo de sustrato al que estará adherido.

3.1.- Diseño de Tag con Slot

Muchos de los tags empleados actualmente son implementados como una línea microstrip, por las que la corriente circula por la propia línea. Variamos la longitud y el grosor de dicha línea para modificar las condiciones de trabajo del tag [1]. Los tags diseñados con esta tecnología presentan el grave problema de desintonizarse de la frecuencia de trabajo fácilmente. Esto ocurre cuando el tag es situado sobre algunos materiales. En nuestro caso planteamos un tag pero con topología slot, lo que significa que la superficie es toda de material conductor y es la parte vacía la que determina su comportamiento. El objetivo es ver la sensibilidad de esta topología con el material al cual se adhiere. Variamos la longitud y el grosor del slot y el punto de alimentación para lograr sintonizar el tag, de esta forma conseguimos que la frecuencia de resonancia se desplace o que varíe la amplitud del espectro frecuencial de trabajo.

Para realizar el diseño del slot utilizamos *Momentum*, una aplicación integrada en la aplicación *Advanced Design System*, de *Agilent Technologies*.

ADS-Momentum es un simulador electromagnético basado en el método de momentos. Este sistema de modelización es un método integral, lo que permite una aproximación suficiente y un gran ahorro computacional, ya que proporciona los datos sobre estructuras 2.5D. Aunque, evidentemente estamos hablando de estructuras 3D, su gran relación de aspecto nos permite hacer la aproximación de que se trata de estructuras 2.5D. Si deseásemos realizar un estudio con un simulador 3D, existe el software

Electromagnetic Design System (también de *Agilent Technologies*) basado en el método de los elementos finitos, aunque supondría un mayor coste computacional.

Para realizar el diseño del tag, *Momentum* ofrece dos opciones. Una en la que nos permite determinar las zonas de metalización, especificando el tipo de componente y sus dimensiones numéricamente (*Schematic*). De esta forma el diseño de la antena es poco flexible y dinámico. El otro sistema para el diseño del tag que nos ofrece la aplicación, es mediante una interficie gráfica en la que podemos dibujar directamente la antena con el ratón (*Layout*). Unos accesos directos permiten acceder a las opciones más habituales y simplemente determinando con el ratón las esquinas opuestas, permite dibujar áreas de metalización rápidamente. Este sistema es mucho más dinámico e intuitivo.

Dibujamos los márgenes máximos del tag, determinándolo, como comentábamos antes, todo de metal, y diseñamos el slot del grosor y la longitud necesaria para que quede sintonizado a 867 MHz aproximadamente. Para minimizar el tamaño del mismo, el slot se dibuja enroscándose sobre sí mismo. De tal modo, obtenemos un tag de 66x120,5mm y el slot de 0,5 mm de ancho y una longitud total de 236 mm (*Figura 3.1*).

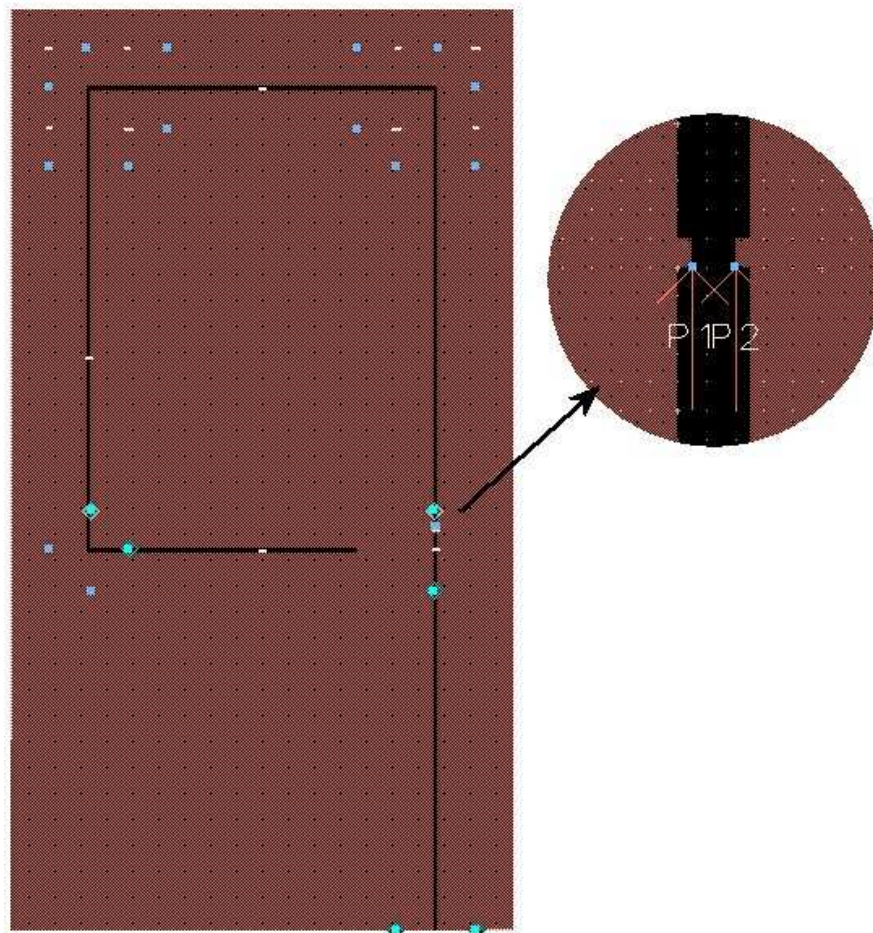


Figura 3.1. Slot para etiqueta RFID y detalle del punto de alimentación (dónde se conecta el chip)

En el diseño del tag también es muy importante determinar el punto de alimentación y su impedancia. Para representar el punto en que irá soldado el chip que ha

de contener la información, se añaden en el interior del slot dos pequeñas áreas metálicas (Figura 3.1). De esta forma, se pretende simular el punto en que irá la soldadura que realizará el contacto entre el tag y el chip. Para obtener resultados correspondientes a su comportamiento real, debemos cargar los puertos de alimentación del simulador con la impedancia conjugada del chip (*Impinj Monza Gen 2*). Para ello accedemos al menú *Momentum/Port Editor* (Figura 3.2) y cargamos el puerto número 1 con una impedancia de $40+j95$ y el puerto número 2 lo asociamos al 1.

También existe la posibilidad de realizar las simulaciones dejando los puertos de alimentación del tag con una carga estándar de 50Ω , pero si se decide realizar las simulaciones de esta forma, hemos de tenerlo en cuenta a la hora de interpretar las medidas obtenidas. Al simularlo con una carga de 50Ω , obtenemos el comportamiento del tag en condiciones más generales. Para después adaptar las lecturas al interés del presente proyecto, se han de cargar los archivos de las simulaciones obtenidas en el *Schematic* de *ADS* y añadirle en la entrada el puerto con la impedancia deseada.

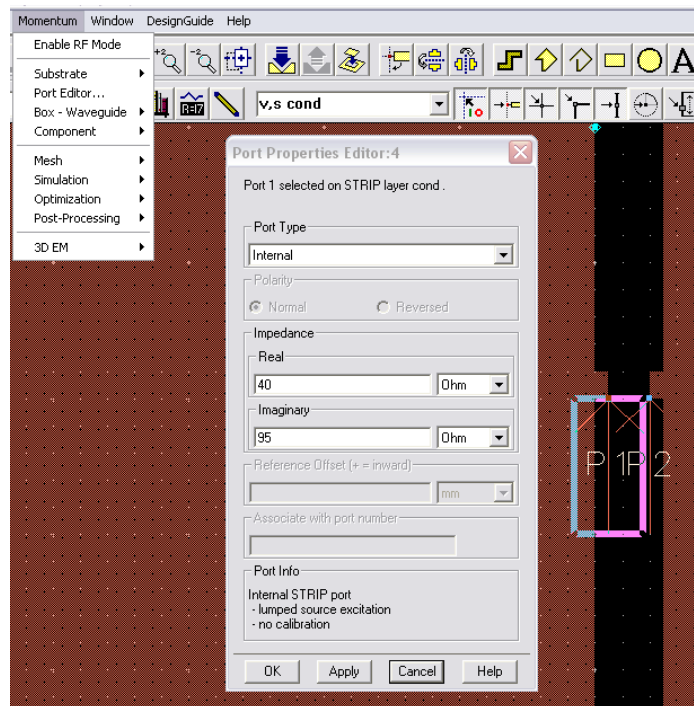


Figura 3.2. Editor de puertos

Para nuestras simulaciones, decidimos cargar los puertos con la impedancia correspondiente al chip utilizado. De esta forma, conseguimos simular el slot con la impedancia real con la que trabajará cuando esté conectado al chip. El programa nos permite también especificar las características del tag, así como de los elementos por los que le rodean. Con esto nos referimos a que *Momentum* permite especificar el grosor, la permitividad (ϵ_r) y tangente de pérdidas ($\tan\delta$) de los materiales. Para especificar las propiedades del sustrato, el programa permite añadir diferentes capas y dar a cada una de ellas las características deseadas (Figura 3.3). Esto se realiza por el menú *Momentum/Substrate/Create-Modify*. También nos ofrece la opción de especificar una capa de aire o masa.

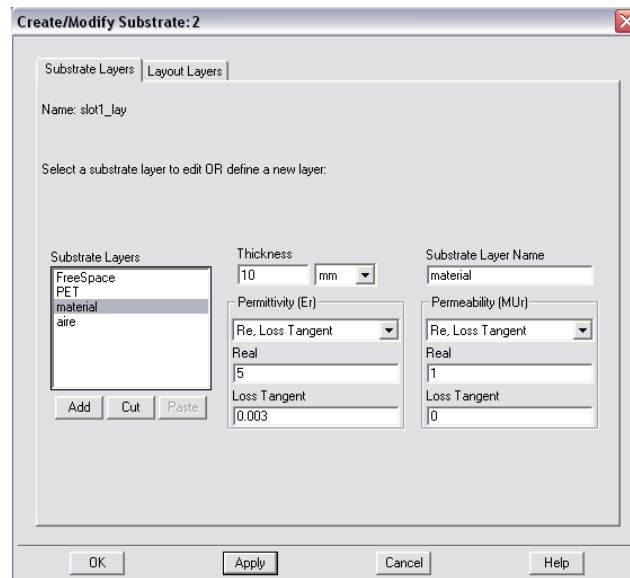


Figura 3.3. Editor de substrato

Para simular el tag, primero observamos su respuesta en condiciones ideales, tal que quede rodeado por aire, tanto por arriba como por abajo.

Para observar el comportamiento del tag, se obtiene la gráfica correspondiente al parámetro S_{11} de 300 MHz a 1,2 GHz para tener una visión general y de 867 a 916 MHz, rango cubierto por la banda de RFID en la que nos interesa que trabaje nuestro dispositivo.

Tras examinar las gráficas (*Figura 3.4*), vemos que tenemos el tag perfectamente sintonizado con su primera resonancia dentro del rango de frecuencias deseado, que es alrededor de los 870 MHz. En una primera simulación, se realiza un barrido del comportamiento del tag desde 300 MHz hasta 1,2 GHz, especificando al programa que analice 30 puntos dentro de este rango. Con el resultado obtenido, también podemos ver que en este tipo de tag, el ancho de banda de trabajo es muy estrecho (21,8 MHz). Realizamos una segunda simulación (*Figura 3.4*), especificando un rango de frecuencias más estrecho pero con el mismo número de puntos de análisis, de esta forma, conseguimos más precisión en las gráficas realizadas por *Momentum*. En esta segunda gráfica podemos ver que, la frecuencia de la primera resonancia es exactamente 869,9 MHz, a -18,112 dBs.

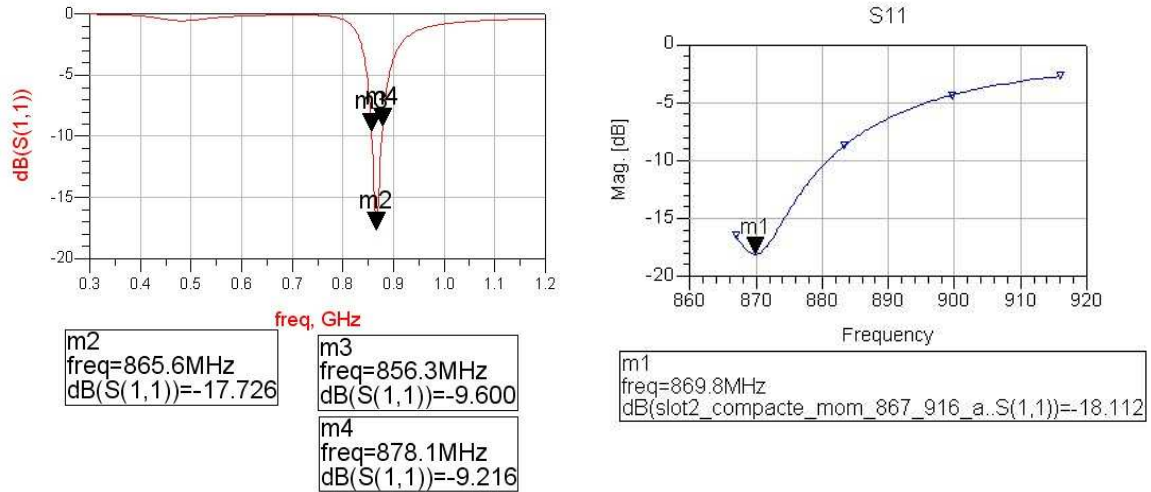


Figura 3.4. Gráfica S₁₁ del slot en condiciones ideales

Para confirmar el correcto funcionamiento del tag en las frecuencias deseadas, realizamos la misma operación, pero especificando en el programa que analice únicamente estas, de forma individual, obteniendo así más precisión.

Como podemos observar (Figura 3.5), a 867 MHz, el tag queda adaptado, con un nivel de -12,5 dBs. También nos ofrece en la carta de Smith la impedancia del tag.

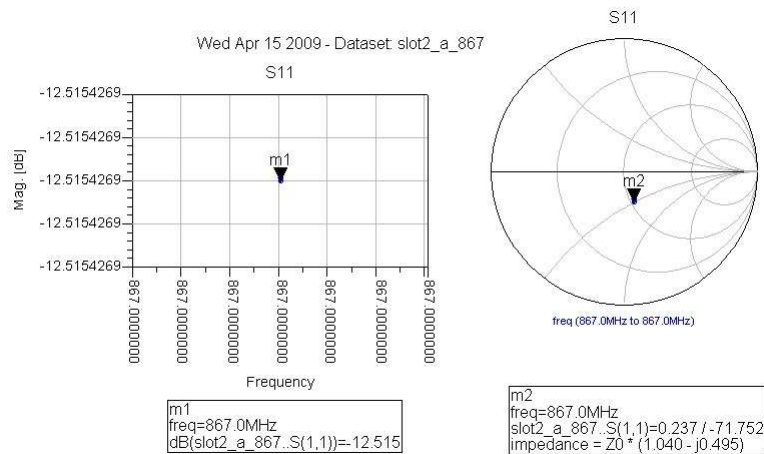


Figura 3.5. Parámetro S₁₁ e impedancia a 867 MHz

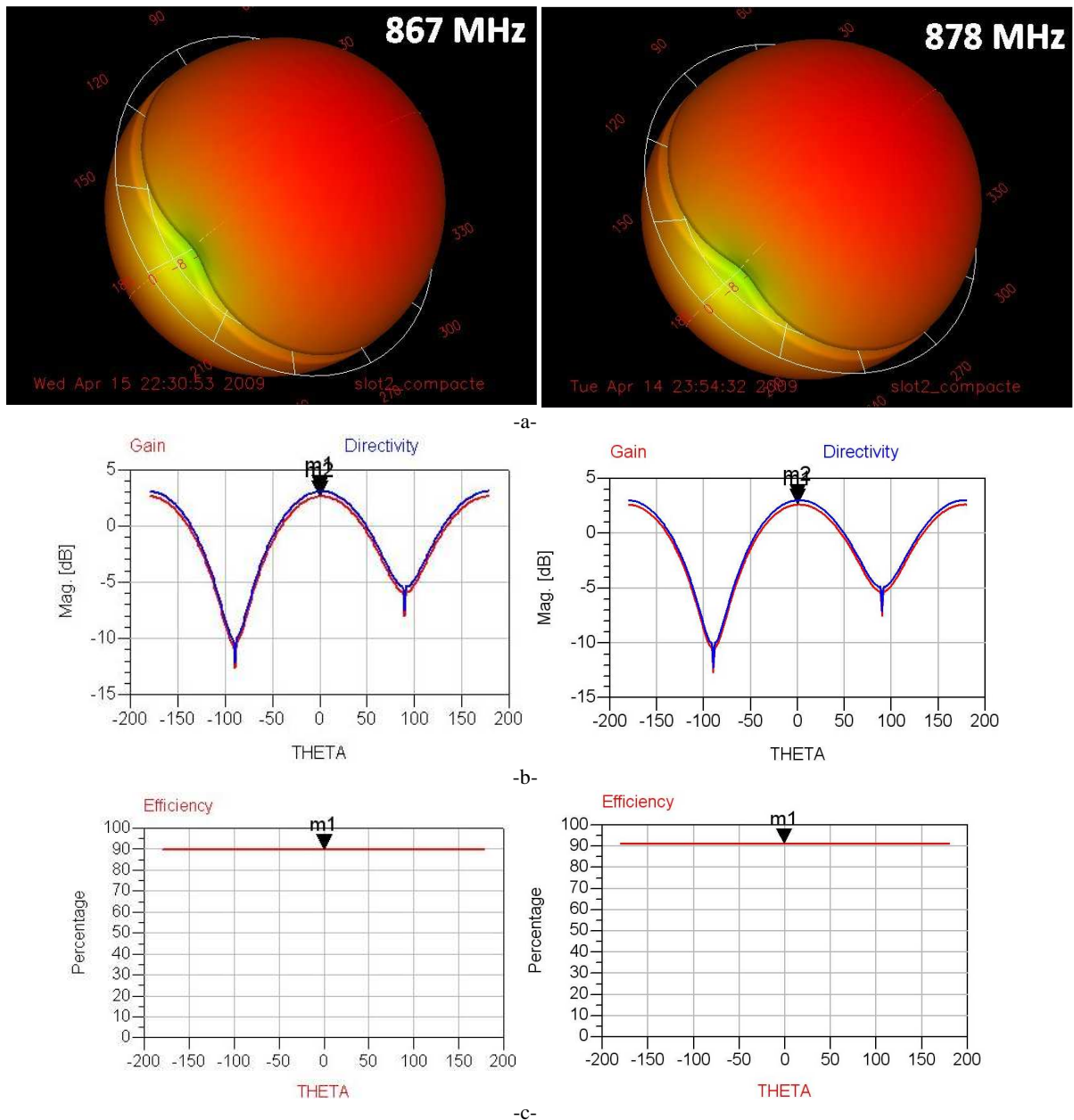


Figura 3.6. Diagramas y gráficas de post procesado

El software permite realizar un post procesado de los datos simulados, de esta forma podemos analizar la antena de forma más profunda. De las opciones que ofrece la aplicación, Como podemos observar en la *Figura 3.6 –a-*, el diagrama de radiación del tag diseñado, tanto a 867 MHz como a 878 MHz es óptimo. En dichas representaciones, aparecen las zonas con niveles más altos de ganancia con colores más cálidos, y los de menores niveles con tonalidades más frías, en función de θ . Las gráficas obtenidas muestran que el tag radía de forma prácticamente omnidireccional.

En las gráficas *Figura 3.6 –b-* podemos ver que los niveles de ganancia y directividad son óptimos, tanto a 867 como 878 MHz. En la *Figura 3.6 –c-* podemos ver también que la eficiencia de la antena es superior al 90%, lo que significa que la antena funciona prácticamente como en condiciones ideales a las frecuencias estudiadas.

3.2.- Estudio del Comportamiento del Tag

Una vez hemos conseguido diseñar el tag RFID dentro de la banda de frecuencias deseada, debemos proceder al análisis del mismo en diferentes circunstancias.

Como hemos comentado en varias ocasiones, el sistema de identificación por radiofrecuencia es muy utilizado en logística, sobre todo en almacenes. De esta forma, tomamos como materiales referentes sobre los que irá situado el tag, los más comunes en empaquetado o envase de productos. Para ello, analizaremos el comportamiento del tag simulándolo sobre madera, cartón, cristal, cristal con líquido en su interior y sobre una zona metálica. En el análisis de cada una de estas situaciones, también tendremos en cuenta el grosor de los materiales o distancia entre ellos.

3.2.1.- Simulación del Tag sobre Madera/Cartón

El comportamiento del tag sobre madera o cartón es muy importante, ya que es el material sobre el que estará situado en la mayoría de los casos. La mayoría de los productos se distribuyen empaquetados en cajas de cartón para su distribución y muchas veces interesa identificar estas cajas de forma independiente, cada una de ellas con un tag diferenciado. En otros casos, conviene más identificar los productos por palets, situando los tags directamente sobre ellos, en la mayoría de casos de madera.

Para realizar las simulaciones, hemos de especificar en la aplicación que debajo del tag situamos dicho material (*Figura 3.3*). Para especificar el material deseado, hemos de indicar su permitividad (ϵ_r) y pérdidas tangenciales. Tanto para la madera como para el cartón, estos parámetros son los mismos (*Tabla 3.1*).

<i>MADERA / CARTÓN</i>	
ϵ_r	<i>Tangente de pérdidas</i>
1,7	0,036

Tabla 3.1. Propiedades de la madera y el cartón

Dado que el tag puede estar situado en una gran infinidad de productos diferentes en los que su material exterior será madera o cartón, también hemos de contemplar la variación del grosor de dicho material para las simulaciones. Para ello, tomamos diferentes grosores (1, 5, 10, 15 y 20 mm) y simulamos el comportamiento del tag en la banda de frecuencia comprendida entre 300 MHz y 1,2 GHz.

Como podemos ver en la *Figura 3.7 –a-*, a medida que aumentamos el grosor de la madera o el cartón, la frecuencia de resonancia se va desplazando hacia abajo (datos anotados de las simulaciones en *Anexo A, Tabla A.2*). En la gráfica tomamos como referencia el primer valor con un grosor de 0 mm, lo que significa que es el comportamiento del tag en condiciones ideales (sin la madera o el cartón debajo de él), y luego añadimos el material y vamos aumentando su grosor. Se observa que entre grosores de 1 y 5 mm, la frecuencia de resonancia desciende notoriamente, pero a grosores más grandes, vemos que su variación es menor, casi llegando a estabilizarse.

Si observamos la diferencia de ganancia a nuestras frecuencias de interés, vemos el grado de desadaptación del tag (*Figura 3.7 –b-*). Podemos observar que la diferencia de ganancia disponible (G_{disp}) es inmediata en cuanto situamos 1 mm de madera o cartón

debajo del tag, pero, a grosores mayores (entre 10 y 20 mm), la diferencia de ganancia disponible sigue aumentando pero de una forma más suave, no siendo directamente proporcional el aumento del grosor del tag con su desadaptación. Este valor tomado como ganancia disponible es el que ofrece directamente ADS en la gráfica mostrada (*Anexo A, Tabla A.4*). El cálculo empleado por el software para la obtención de dichos valores no tiene en cuenta el coeficiente de desadaptación de la antena. De esta forma, la ganancia que obtenemos es la resultante del cálculo de la directividad (D) más la eficiencia de la antena (η), en dB (3.1).

(3.1)

Por otro lado, en la misma gráfica (*Figura 3.7 –b-*) podemos ver la directividad de la antena a 867 MHz como, aún variando el grosor del material, se estabiliza.

En la *Figura 3.7 –c-* podemos observar la evolución de las pérdidas de retorno de la antena en función de la variación del grosor del material (datos anotados de las simulaciones en *Anexo A, Tabla A.3*). Las pérdidas de retorno (*Return Loss, RL*) representan la cantidad de energía perdida debido a la señal reflejada y se expresa de la siguiente manera

(3.2)

Donde el coeficiente de reflexión ρ se obtiene de

$$\rho = \frac{Z_{chip} - Z_{antena}}{Z_{chip} + Z_{antena}}$$

(3.3)

Dado que Z_{chip} es la propia impedancia del chip que contiene la información ($40+j95$) y Z_{antena} es la impedancia de la antena obtenida en cada una de las simulaciones correspondientes (*Anexo A, Tabla A.1*).

En el caso de que el material situado bajo el tag sea madera o cartón, observamos que las pérdidas de retorno aumentan considerablemente de forma muy rápida en cuanto situamos el material (de grosor 1-5 mm), pero que si variamos su grosor de 5 a 20 mm, las pérdidas de retorno se mantienen prácticamente estables (*Figura 3.7 –c-*).

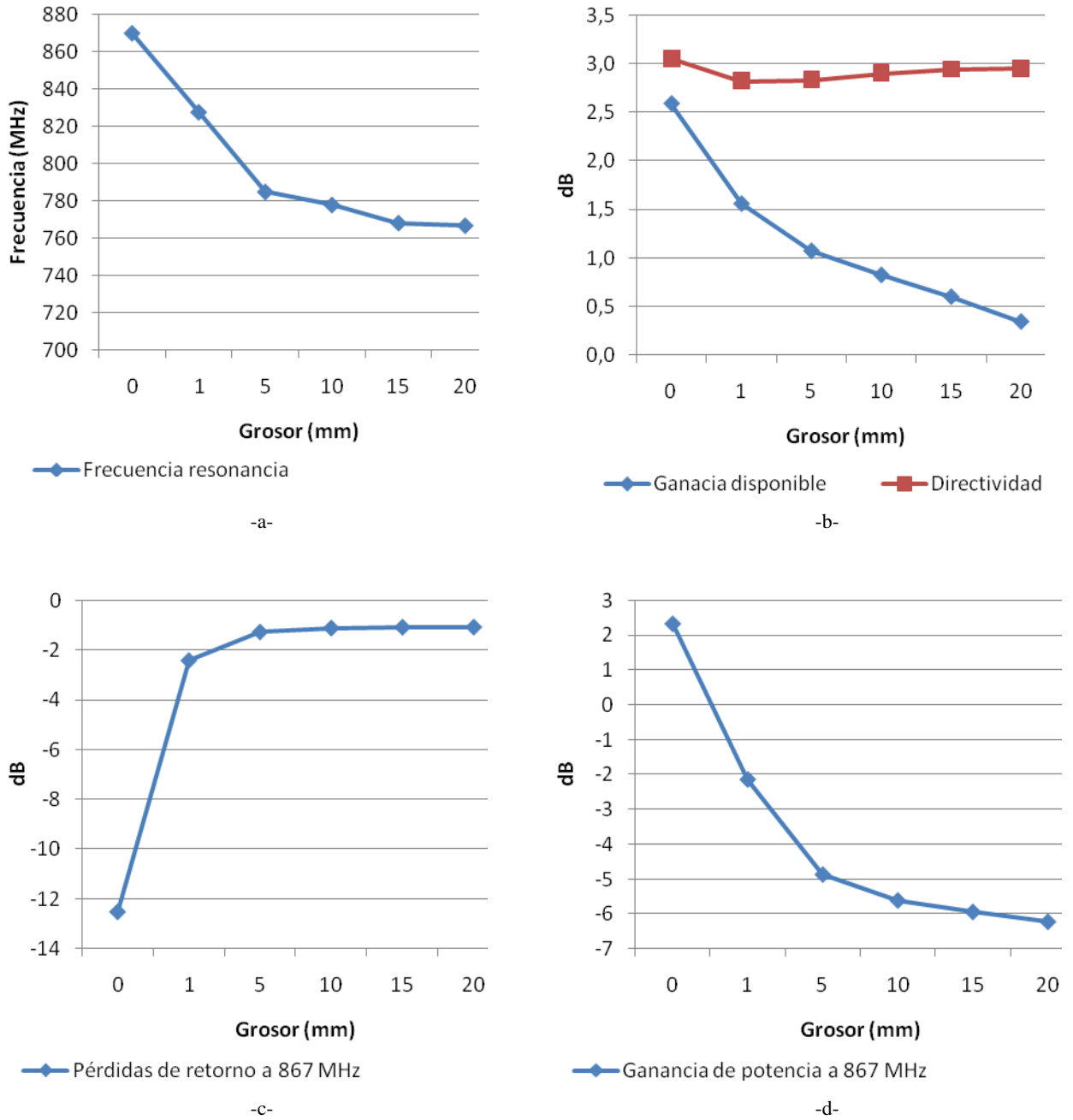


Figura 3.7. Comportamiento del tag con diferentes grosores de madera/cartón; (a) variación frecuencia de resonancia; (b) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz ; (c) Variación de pérdidas de retorno a 867 MHz; (d) Ganancia de potencia a 867 MHz

En último lugar, exponemos de nuevo la ganancia del tag simulado a los diferentes grosores, pero esta vez, tomamos el valor de la ganancia de potencia (G_{pot}) como referencia; esto quiere decir que, tomado el valor de ganancia de ADS (que representa la ganancia disponible G_{disp} (3.1), hemos de tener en cuenta el coeficiente de desadaptación (3.4).

$$(3.4)$$

De esta forma, tenemos en cuenta las pérdidas producidas en el tag, obtendremos el valor de ganancia total que se aplicará a las potencias de RF que maneje el tag. Podemos observar (*Figura 3.7 –d-*) como las pérdidas de potencia del tag son mucho más altas, de tal forma que desde el primer momento en que el material está presente, la antena pasa a tener pérdidas. De igual modo que con la frecuencia de resonancia o las pérdidas de retorno, podemos observar que a partir de añadir 5 mm de material bajo el tag, los valores tienden a estabilizarse. Si comparamos los valores con los proporcionados por ADS (*Figura 3.7 –c-*), vemos la gran importancia que tiene el coeficiente de desadaptación del tag.

3.2.2.- Comportamiento del Tag sobre Cristal

Como comentábamos, debido al amplio abanico de productos en los que puede ser adherido el tag, debemos contemplar varios materiales a la hora de estudiar el comportamiento del tag. En el siguiente punto, analizamos el comportamiento del tag sobre diferentes grosores de cristal. Este estudio es importante ya que el tag puede estar colocado sobre algunos tipos de envases, como botellas o bidones, de cristal.

Para ellos, recurrimos de nuevo al editor de puertos del programa (*Figura 3.3*) y añadimos bajo el tag un material con las características de permitividad del cristal (*Tabla 3.2*).

<i>CRISTAL</i>	
ϵ_r	<i>Tangente de pérdidas</i>
3,8	0,003

Tabla 3.2.Propiedades del cristal

Podemos observar en la *Figura 3.8 –a-* (anotaciones mostradas en el *Anexo B, Tabla B.2*) como, al ir añadiendo bajo el tag diferentes grosores de cristal, la frecuencia de resonancia varía notablemente. Cuando el cristal pasa de grosores superiores de 5 mm, vemos como, a pesar de estar el tag desadaptado, la frecuencia de resonancia permanece más o menos estable.

La ganancia de la antena también se ve muy afectada, ya que desciende rápidamente de forma proporcional al grosor del cristal. Por otro lado, la directividad de la misma se mantiene bastante estable independientemente del cristal bajo el tag (*Figura 3.8 –b-*). Los datos extraídos de las simulaciones se muestran en el *Anexo B, Tabla B.4* , y en la *Tabla B.5* se muestran los mismos resultados, pero simulando el tag a 878 MHz.

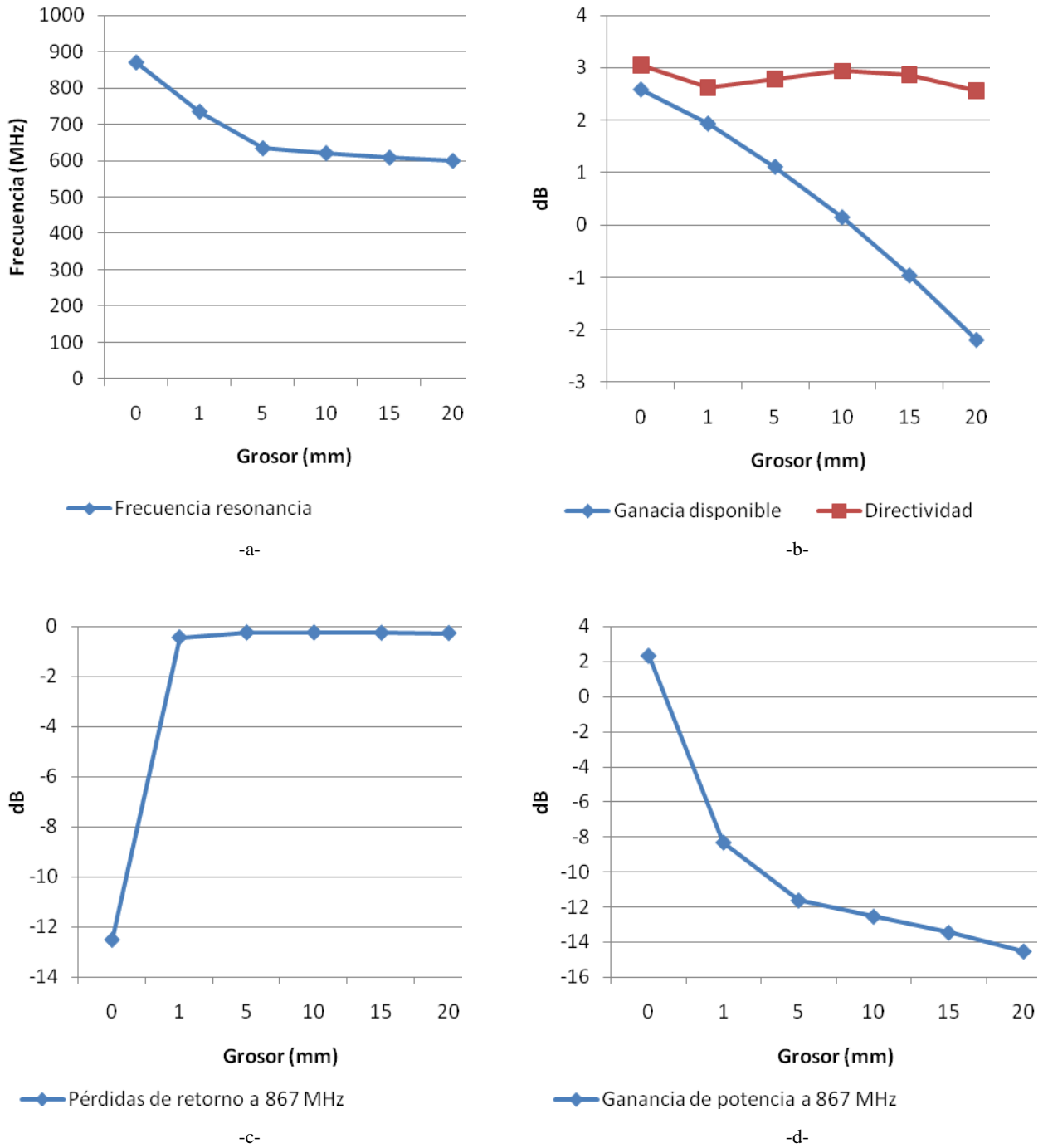


Figura 3.8. Comportamiento del tag con diferentes grosores de cristal; (a) variación frecuencia de resonancia; (b) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz ; (c) Variación de pérdidas de retorno a 867 MHz ; (d) Ganancia de potencia a 867 MHz

Las pérdidas de retorno de la antena (*Figura 3.8 –c-*) también son bastante malas en cuanto añadimos el cristal bajo el tag, aunque, una vez asumidos esos valores, se mantienen bastante estables independientemente del grosor del cristal. Ocurre algo similar, aunque no de forma tan estable, con la ganancia de potencia calculada (3.4). Vemos como, en cuanto aparece el material bajo el tag, la ganancia de potencia baja automáticamente, convirtiéndose en pérdidas. A medida que aumenta el grosor del cristal, dichas pérdidas van aumentando, aunque de forma más moderada.

3.2.3.- Comportamiento del Tag sobre Cristal y Agua

Otro de los casos interesantes a estudiar es el caso en que bajo el tag se encuentre cristal y un líquido. Esto es debido a que muchos productos sobre los que puede ir el tag adherido pueden ser botellas u otros tipos de recipientes de vidrio que contengan líquidos. En este apartado analizamos como varía el comportamiento del tag en estas condiciones.

Para ello, debemos indicar en el software de simulación los cambios del sustrato. Especificamos las propiedades del cristal y, bajo este, las del agua (*Tabla 3.3*).

<i>CRISTAL</i>		<i>AGUA</i>	
ϵ_r	<i>Tangente de pérdidas</i>	ϵ_r	<i>Tangente de pérdidas</i>
3,8	0,003	77	0,048

Tabla 3.3.Propiedades del cristal y del agua

Para abarcar una variedad de posibilidades más amplias, estudiamos el comportamiento del tag sobre diferentes grosores de cristal y, en cada uno de los casos, con 10 ó 20 mm de agua bajo este. De esta forma, comparando resultados en ambos casos con los mismos grosores de cristal, analizamos la influencia del agua en las variaciones del comportamiento que puedan ocurrir.

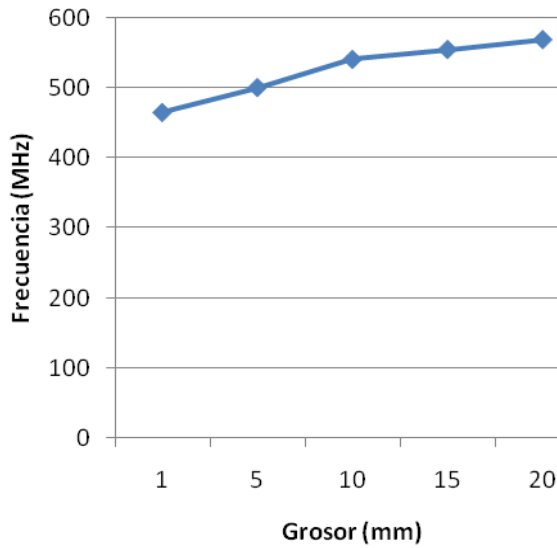
Podemos observar como al añadir estos dos elementos bajo el tag, la frecuencia de resonancia del mismo baja inmediatamente. En el caso en que exponemos 10 mm de agua bajo el cristal, vemos que cuando únicamente existe 1 mm de cristal, la frecuencia de resonancia baja de los 500 MHz (*Figura 3.9 -a-*) y a medida que vamos aumentando el grosor del cristal, va aumentando. En el caso en que colocamos el tag sobre cristal y 20 mm de agua, vemos que el comportamiento es similar (*Figura 3.10 -a-*), solo que con valores menores para grosores bajos de cristal. Cuando simulamos con 20 mm de cristal, independientemente del grosor de agua, vemos que los resultados obtenidos son prácticamente idénticos (*Anexo C, Tabla C.1 ,y Tabla C.2*).

Al obtener los datos referentes a directividad y ganancia disponible (*Anexo C, Tabla C.5 y Tabla C.6*) vemos como en ambos casos, la ganancia va en aumento a medida que aumentamos el grosor del cristal (*Figura 3.9 -b-* y *Figura 3.10 -b-*), con la diferencia que en el caso en que el agua tiene un grosor de 20 mm, los valores obtenidos son mucho menores, sobre todo si comparamos el caso en que el cristal llega a valores de 20 mm, en los que, cuando bajo este hay 10 mm de agua, los valores de ganancia disponible son positivos, pero cuando hay 20 mm de agua, los valores siguen siendo de pérdidas.

En lo que a pérdidas de retorno se refiere (*Figura 3.9 -c-* y *Figura 3.10 -c-*), vemos que en ambos casos, la presencia de estos materiales afecta de un modo casi similar, independientemente de la cantidad de agua simulada. Vemos que para valores altos de grosor de cristal, el resultado obtenido se mantiene casi constante en ambos casos.

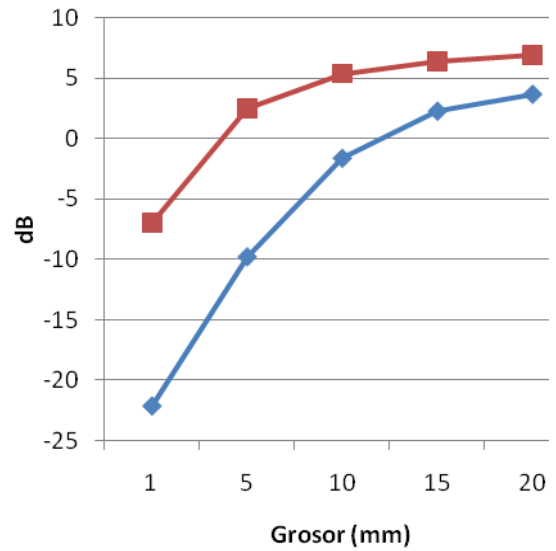
Cuando calculamos la ganancia de potencia en ambos casos, vemos como los valores obtenidos son muy bajos, aún más considerables en el caso de los 20 mm de agua bajo el cristal (*Figura 3.9 -d-* y *Figura 3.10 -c-*). Al igual que en el caso de la ganancia disponible, observamos que a medida que aumenta el grosor del cristal, la ganancia de

potencia va aumentando de casi de forma proporcional en el caso de 10 mm de agua, pero vemos que en el caso de 20 mm de agua, los valores prácticamente se estabilizan a partir de 5 mm de cristal.



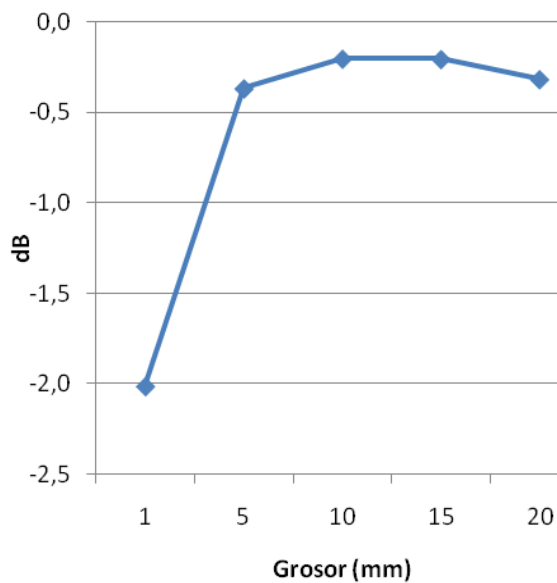
—◆— Frecuencia resonancia

-a-



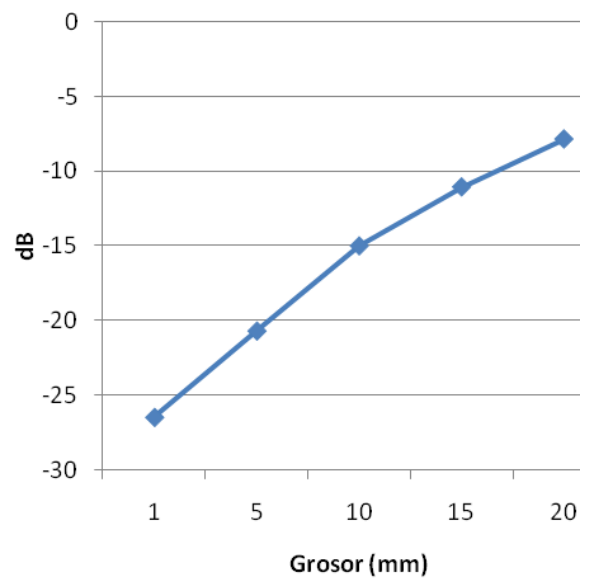
—◆— Ganancia disponible —■— Directividad

-b-



—◆— Pérdidas de retorno a 867 MHz

-c-



—◆— Ganancia de potencia a 867 MHz

-d-

Figura 3.9. Comportamiento del tag con diferentes grosores de cristal sobre 10 mm de agua; (a) variación frecuencia de resonancia; (b) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz ; (c) Variación de pérdidas de retorno a 867 MHz ; (d) Ganancia de potencia a 867 MHz

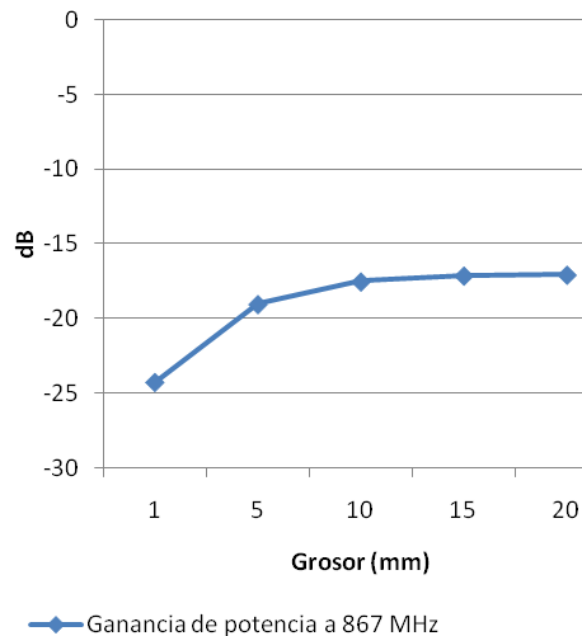
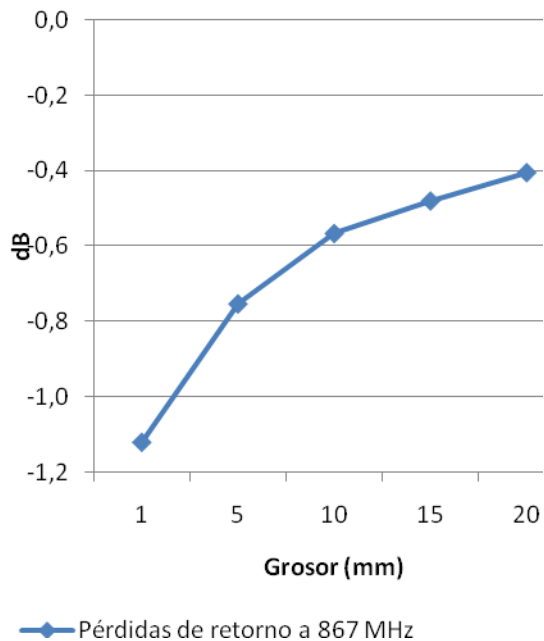
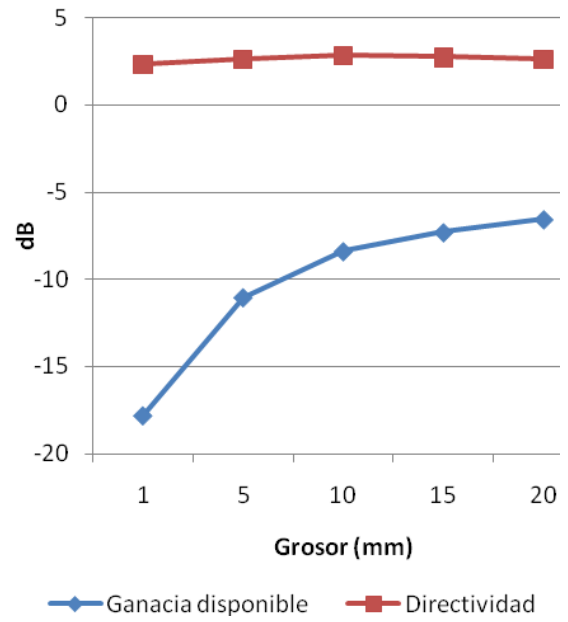
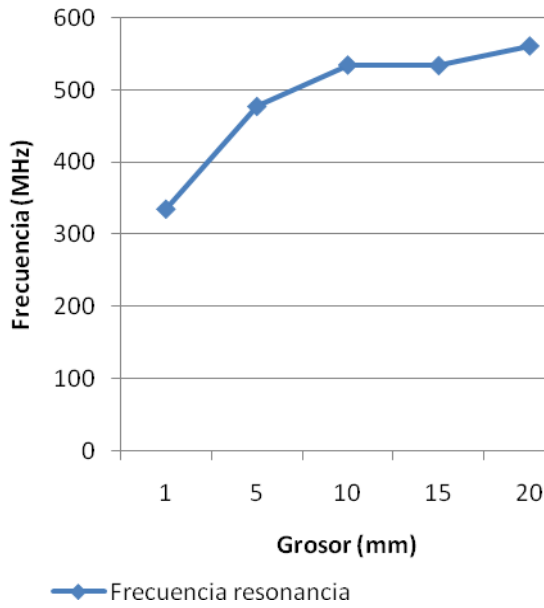


Figura 3.10. Comportamiento del tag con diferentes grosores de cristal sobre 20 mm de agua; (a) variación frecuencia de resonancia; (b) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz ; (c) Variación de pérdidas de retorno a 867 MHz ; (d) Ganancia de potencia a 867 MHz

Podemos observar también como en los diagramas de radiación del tag 3D (*Anexo C, Tabla C.1.1*) en los casos que el grosor del cristal es mínimo, la antena radía más hacia el teórico lado opuesto (sobre todo en el caso en que hay 10 mm de agua). En el resto de casos, vemos como el efecto de los materiales provoca unos lóbulos muy diferenciados en ambos sentidos, llegando incluso a actuar el agua prácticamente como reflector en el caso de grosores de cristal más amplios.

3.2.4.- Comportamiento del Tag sobre Masa con Spacer

Otro de los casos propuestos para estudio es el de simular el comportamiento del tag sobre un plano de masa separado por un aislante (que llamaremos spacer).

Esta es sistema empleado por muchos fabricantes para mejorar el comportamiento de sus tags en determinados casos. En este apartado veremos como afectan estas condiciones al tag de slot diseñado. Para esto, especificamos en el software las propiedades del separador (*Tabla 3.4*) y después indicaremos que bajo este existe un plano de masa. Después, para realizar las diferentes simulaciones, únicamente debemos ir incrementando el grosor del aislante. Para mostrar el efecto que causa el aislante entre el tag y el plano de masa, también tomamos anotaciones de su comportamiento sin este (*Anexo D, TablaD.1*).

SPACER	
ϵ_r	<i>Tangente de pérdidas</i>
2,6	0,0061

Tabla 3.4.Propiedades del aislante

Tomamos las frecuencias de resonancia del tag con diferentes grosores del aislante (*Anexo D, Tabla D.1*) y observamos como la respuesta del tag es inmediata. Con una separación mínima entre tag y el plano de masa vemos como la frecuencia de resonancia aparece a poco más de 500 MHz, pero también es cierto que, a medida que la separación entre ambos va aumentando (aumentamos el grosor del aislante), la frecuencia de resonancia aumenta levemente. También observamos que, en la respuesta del tag, nos aparece una segunda frecuencia de resonancia (*Anexo D, Tabla D.2*) con un comportamiento idéntico al de su primera resonancia, pero, a unos valores más próximos a nuestra banda de interés (*Figura 3.11 –a-*).

En lo que se refiere a directividad, observamos que el comportamiento del tag es prácticamente el mismo en todas las situaciones, pero por otro lado, vemos como la ganancia disponible aumenta a medida que aumentamos el grosor del aislante. Si bien es cierto que, en el caso en que el tag está directamente sobre el plano de masa, la ganancia del mismo es bajísima (como era de esperar), notamos que justo en el momento en que aparece el separador aumenta notablemente (*Figura 3.11 –b-*).

Las pérdidas de retorno obtenidas de las simulaciones (*Figura 3.11 –c-*) también notamos que mejoran a 867 MHz a medida que aumenta el grosor del aislante, pero de forma mínima.

Respecto a la ganancia de potencia calcula con los datos anotados, vemos que la curva de comportamiento es igual que la de ganancia disponible, solo que a valores mucho menores (*Figura 3.11 –d-*), lo que provoca que el tag no pueda ser leído.

En las gráficas de radiación del tag 3D, vemos como el plano de masa actúa como reflector e impide la radiación omnidireccional.

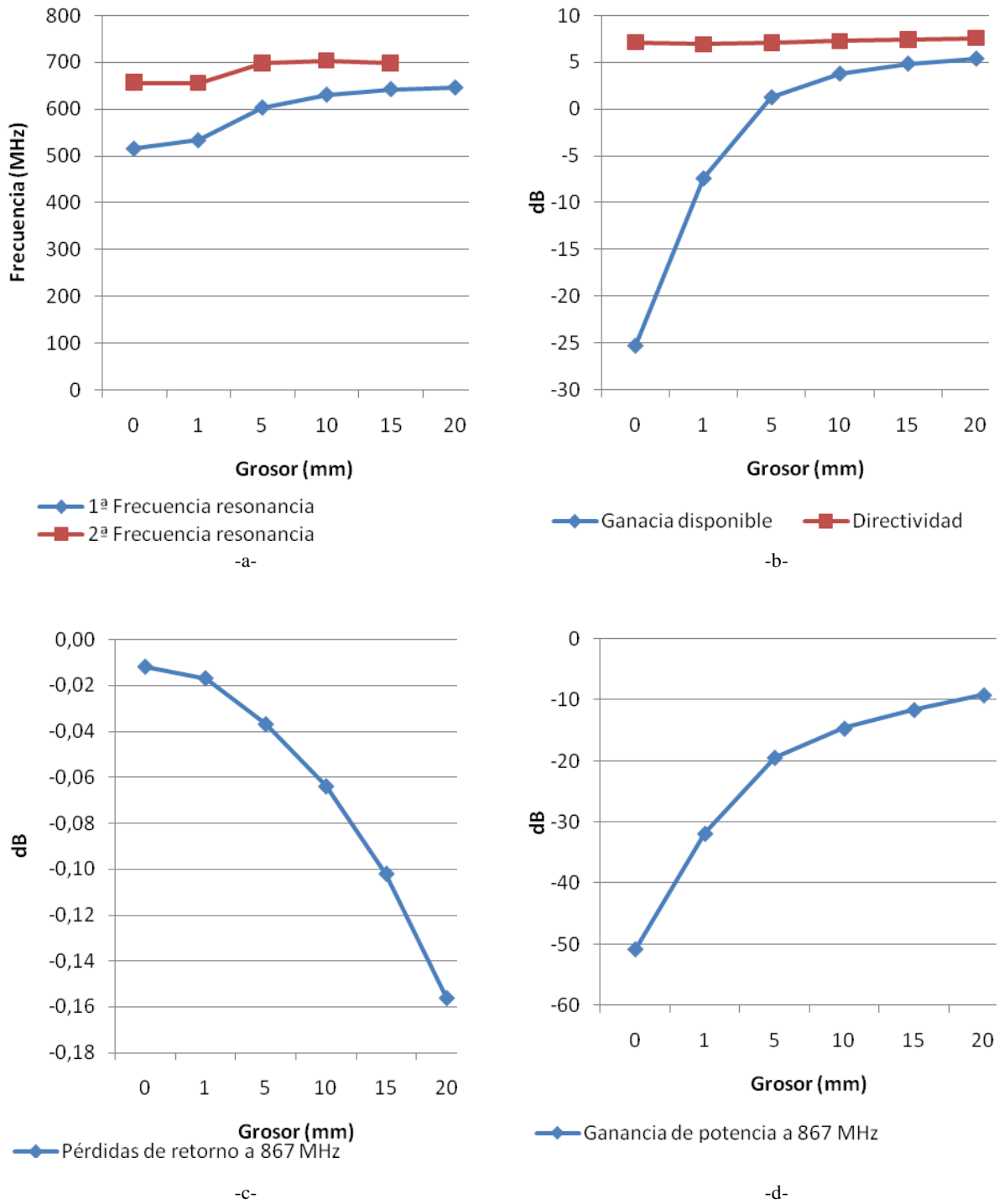


Figura 3.11. Comportamiento del tag con diferentes grosores de separación del spacer; (a) variación frecuencia de resonancia; (b) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz ; (c) Variación de pérdidas de retorno a 867 MHz; (d) Ganancia de potencia a 867 MHz

3.2.5.- Comportamiento con diferentes ϵ_r y grosores de material

Para obtener unos resultados de su comportamiento en términos más generales, exponemos el tag en diferentes condiciones, con el fin de obtener resultados de su respuesta adaptables a posibles materiales en los que pudiese ser colocado.

Para esto, añadimos bajo el tag un material al que iremos aumentando su permitividad relativa (ϵ_r) pasando por los valores mostrados en la *Tabla 3.5.* y manteniendo la tangente de pérdidas constante. Después, analizaremos la respuesta del tag simulando con diferentes grosores de dicho material para cada caso (a 0, 1, 5 y 10 mm).

VARIACIÓN ϵ_r							
ϵ_r						Tangente de pérdidas	
1	1,7	2	3	3,8	4	5	0,003

Tabla 3.5. Variación de permitividad relativa

Analizando los datos obtenidos (Anexo E) observamos que el comportamiento del tag va directamente relacionado con la permitividad relativa y el grosor del material añadido. A medida que va aumentando la permitividad del material situado bajo el tag, vemos como el diagrama de radiación del mismo se va reduciendo. En la *Figura 3.12* podemos observar dicho efecto, extrayendo con MATLAB los diferentes diagramas de radiación con diferentes valores de permitividad relativa y manteniendo constante el grosor a 5 mm.

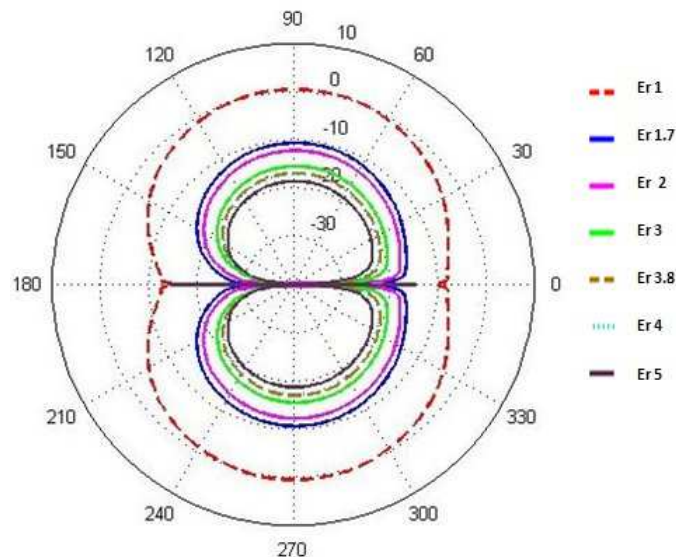


Figura 3.12. Comportamiento del tag con los diferentes valores de permitividad y con un grosor de 5 mm

En lo que se refiere a la frecuencia de resonancia del tag, vemos que también está directamente relacionada con la permitividad relativa del material y su grosor. A medida que aumentamos dichas propiedades del sustrato, vemos como el tag se va desintonizando de nuestra frecuencia de interés, de tal forma que va disminuyendo. En la *Figura 3.13*

podemos ver dicho efecto, donde confrontamos dichos valores para extraer una gráfica tridimensional para poder comparar la tendencia del tag. Vemos que los colores más cálidos indican valores de frecuencia más altos y los colores más fríos corresponden a valores de frecuencia más bajos. Si analizamos los dos extremos, por un lado tenemos el caso en que el material tiene una permitividad relativa de 1 y un grosor de 1 mm: en esta situación vemos que la frecuencia de resonancia prácticamente no a variado. Por otro lado, en el otro extremo, tenemos el caso en que el material bajo el tag tiene una permitividad relativa de 5 y un grosor de 10 mm: en estas condiciones vemos como la frecuencia de resonancia del tag baja alrededor de 550 MHz. Si vemos la forma general de la gráfica vemos como, la frecuencia de resonancia disminuye rápidamente a medida que los valores de grosor o permitividad aumentan pero, llegado un punto tienden a estabilizarse.

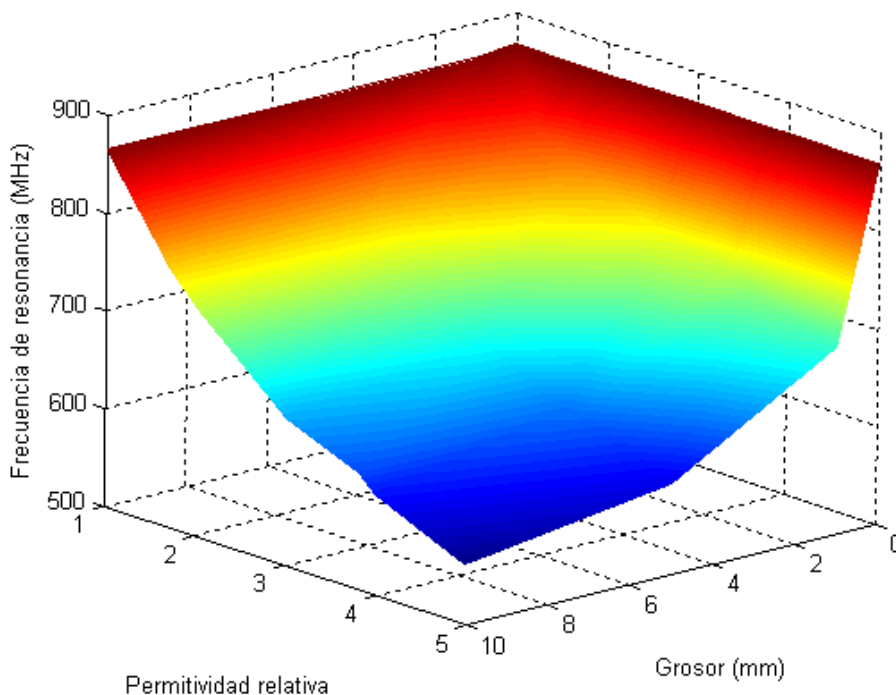


Figura 3.13. Relación entre la permitividad relativa del material y la frecuencia de resonancia respecto a su grosor

Si vemos como responde el tag en lo que a directividad se refiere a 867 MHz, vemos que se mantiene de forma relativamente estable, independientemente de la permitividad relativa del material del sustrato ya que vemos que la tendencia es a la baja, pero en intervalos muy pequeños. En lo que a ganancia disponible se refiere, vemos que disminuye notablemente a medida que aumentamos la permitividad relativa y el grosor del material, agravándose los datos obtenidos a mayores valores (*Figura 3.14 -a-*).

En lo que se refiera a la ganancia de potencia del tag en estas condiciones, calculamos sus valores (3.4), tomando como referencia para todos los casos de permitividad relativa analizados un grosor de material de 5 mm. Vemos (*Figura 3.14 -b-*) que al igual que con la ganancia disponible, la tendencia del tag es que va empeorando, pero en este caso con intervalos mucho mayores, ya que el aumento de la permitividad relativa de 1 a 5, provoca una reducción de la ganancia de potencia de 12 dB.

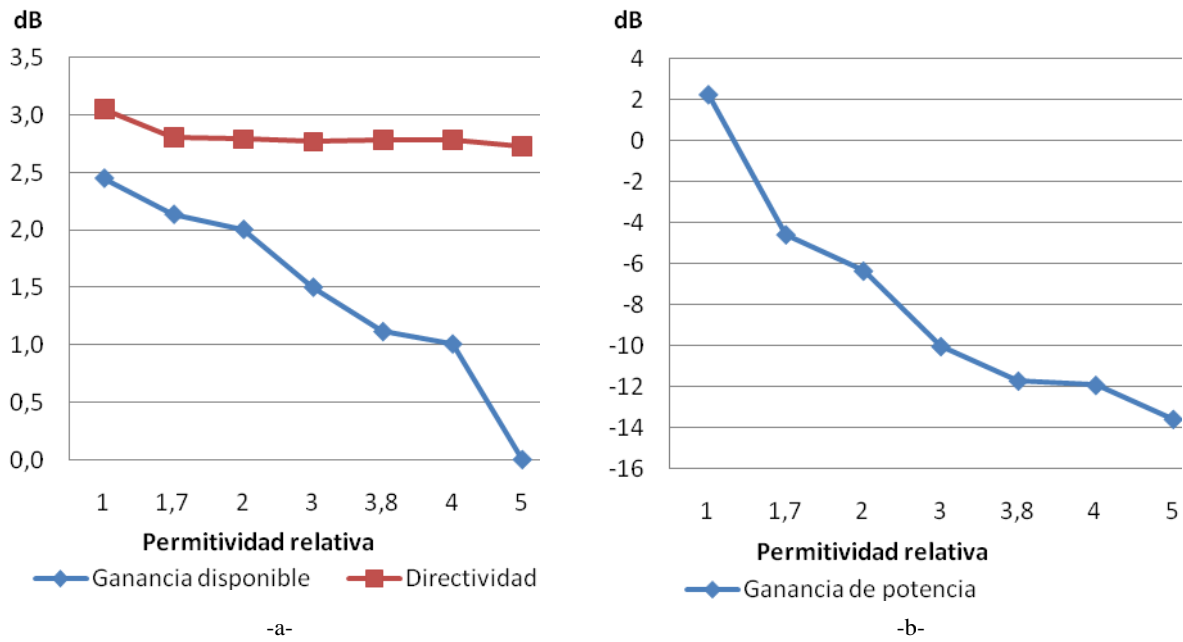


Figura 3.14. Comportamiento del tag con los diferentes materiales con un grosor de 5 mm; (a) Ganancia disponible y directividad a 867 MHz; (b) Ganancia de potencia a 867 MHz

Para constatar el efecto del cambio de grosor del material en la desintonización del tag, podemos ver la variación en las pérdidas de retorno del tag con diferentes valores de permitividad relativa, variando el grosor del material (*Figura 3.15*). Excepto en el caso en que la permitividad del material es de 1, en el resto de casos podemos ver que el resultado es prácticamente el mismo, llegando a estabilizarse más rápidamente a medida que el valor de la permitividad aumenta.

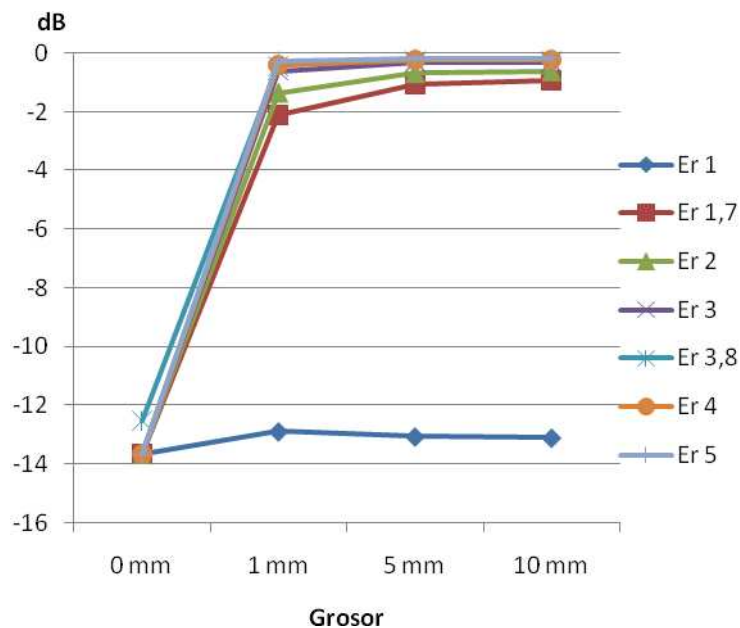


Figura 3.15. Variación de pérdidas de retorno con varios Er y modificando el grosor del material

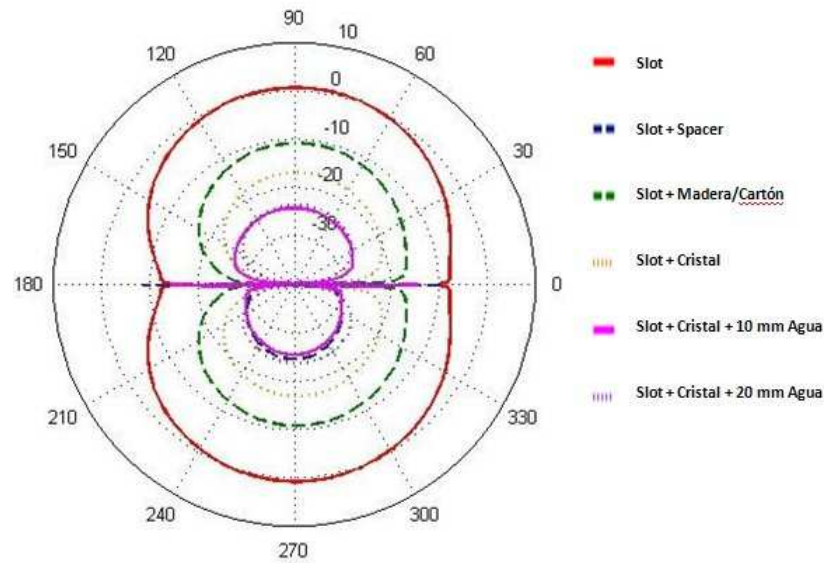


Figura 3.16. Comportamiento del tag con los diferentes materiales con un grosor de 5 mm

Para terminar de constatar la influencia de la variación de la permitividad relativa del material situado bajo el tag, realizamos otra gráfica de radiación en 2D en relación de ganancia disponible frente a θ , tomando esta vez los casos estudiados en los apartados anteriores (madera, cristal, etc), todos con un grosor de 5 mm (*Figura 3.16*). Como observamos, la radiación del tag es cada vez menor a medida que empeoran las condiciones del material sobre el que está situado. Los peores casos los encontramos en las situaciones en que el tag se sitúa sobre 5 mm de cristal y bajo este hay 10 ó 20 mm de agua. Como caso especial, resaltar el caso en que el tag se sitúa sobre el plano de masa separado por 5 mm de aislante, en el que únicamente radia en el sentido contrario al que se sitúa el plano de masa (de 180° a 360° en la *Figura 3.15*).

3.3.- Referencias

- [1] Daniel M. Dobkin, Enigmatics, Sunnyvale, CA., Steven M. Weigand, WJ Communications Inc., San Jose CA. UHF RFID and Tag Antenna Scattering. Technical Feature, May 5, 2006.
- [2] A. Lázaro, D. Girbau and D. Salinas. Radio Link Budgets for UHF RFID on Multipath Environments. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, VOL. 57, No 4, April 2009

4.- Conclusiones y Líneas Futuras

Tras realizar el trabajo, podemos llegar a diversas conclusiones en lo que respecta a la antena lectora de portal y al diseño de tags de slot.

La antena lectora de portal, muestra un comportamiento óptimo en todo momento en las simulaciones realizadas con los diferentes cálculos y programas. Los parásitos diseñados para actuar como reflectores realizan su función perfectamente al entrar en contacto con el plano de masa, reconfigurando el diagrama de radiación en cada caso en el sentido deseado. En las medidas de la antena real en laboratorio obtenemos unos diagramas de radiación no del todo satisfactorios. Para salvar la probabilidad de que el circuito diseñado para realizar la alternancia de parásitos no funcione correctamente, se realizan simulaciones, soldando directamente los parásitos a masa. En estos últimos casos, los resultados obtenidos tampoco son satisfactorios, por lo que se concluye que los problemas a los que nos enfrentamos están referidos a la infraestructura del laboratorio. Los diagramas obtenidos muy parecidos con diferentes configuraciones, delatan unos problemas de rebotes de la señal en la sala de medida, que interfieren en la medida de la antena, y que son debidas a que no se ha realizado la medida en sala anecoica.

Para poder seguir investigando con el desarrollo de una antena lectora de portal sintonizable, se propone, primero que todo, realizar de nuevo las medidas de los prototipos realizados en el presente proyecto dentro de una sala anecoica para evitar el problema de los rebotes. Otra de las vías de investigación es la de probar nuevos diseños de antena, así como el de mejorar la configuración de la propuesta en este proyecto, como por ejemplo aumentando el número de parásitos alrededor de la antena o añadiendo parásitos por la parte frontal de la antena que realicen la función de directores.

De las simulaciones realizadas con el tag slot se pueden extraer dos importantes conclusiones. Por un lado vemos que el tag se desintoniza rápidamente prácticamente al situarlo sobre cualquier material, pero también notamos que, una vez desintonizado, su comportamiento es bastante estable. Esto es debido a que el ancho de banda de trabajo de este tipo de tag es mucho más estrecho que el de los tags basados en microstrip. Cualquier pequeña modificación el sustrato provoca que se desintonice fácilmente.

Las vías de investigación posibles en lo que al tag de slot se refieren, deberían de ir encaminadas en el estudio de realizar tags específicos dependiendo de sobre que material se vayan a situar. Debido a que, una vez desintonizado, su comportamiento es bastante estable a partir de grosores por encima de los 5 mm (independientemente de la permitividad relativa del material), podríamos estudiar la posibilidad de diseñar un tag de slot para que funcione correctamente, directamente sobre una superficie con unas determinadas características específicas (ya que en el presente proyecto, se ha diseñado el tag para funcionar en condiciones ideales y luego se ha estudiado su comportamiento sobre diferentes materiales).

5.- Anexos

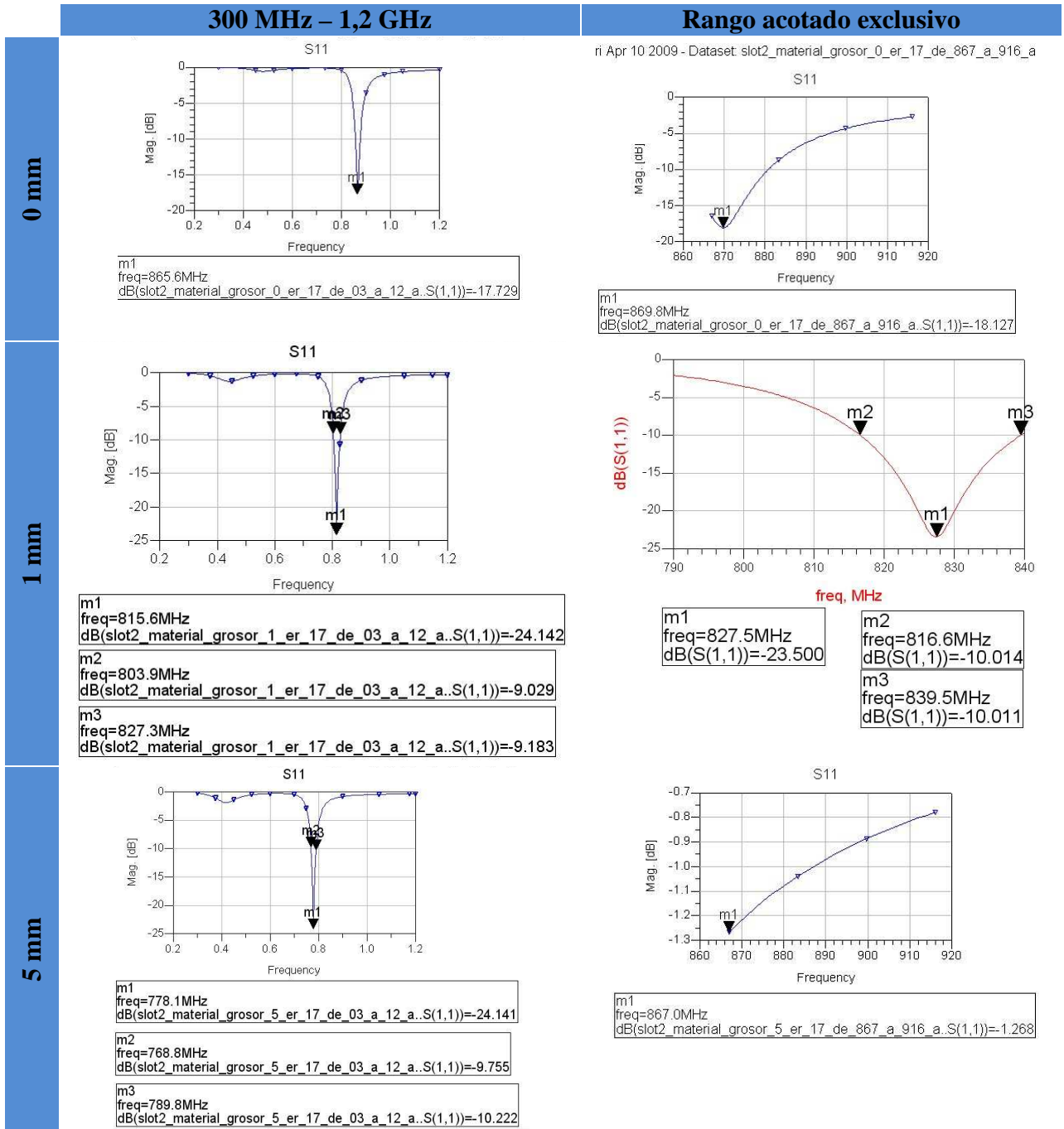
A.-Simulación de Tag con Madera/Cartón

A continuación se presentan los datos obtenidos y las gráficas de cada una de las simulaciones con Momentum obtenidas al añadir madera o cartón debajo del tag.

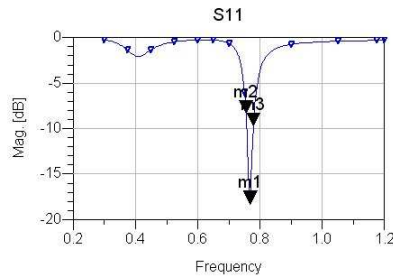
	867 MHz					878 MHz					freq reso MHz
	dBs	Gain	Directividad	Eficiencia %	Impedance	dBs	Gain	Directividad	Eficiencia %	Impedance	
0 mm	-12,515	2,589	3,05	89,935	$Z_0^*(1,040-j0,495)$	-13,653	2,613	3,012	91,23	$Z_0^*(0,677+j0,134)$	869,800
1 mm	-2,425	1,558	2,820	74,780	$Z_0^*(0,323+j1,127)$	-1,895	1,618	2,807	76,060	$Z_0^*(0,287+j1,262)$	827,500
5 mm	-1,281	1,072	2,835	66,634	$Z_0^*(0,253+j1,548)$	-1,109	1,131	2,820	67,592	$Z_0^*(0,236+j1,630)$	784,800
10 mm	-1,122	0,824	2,901	61,986	$Z_0^*(0,247+j1,669)$	-0,997	0,875	2,902	62,705	$Z_0^*(0,233+j1,738)$	777,800
15 mm	-1,090	0,600	2,941	58,339	$Z_0^*(0,250+j1,714)$	-0,979	0,644	2,944	58,888	$Z_0^*(0,237+j1,779)$	768,100
20 mm	-1,085	0,344	2,948	55,051	$Z_0^*(0,253+j1,736)$	-0,977	0,393	2,951	55,496	$Z_0^*(0,241+j1,8)$	766,700

Tabla A.1. Tabla de propiedades del tag sobre diferentes grosores de madera/cartón

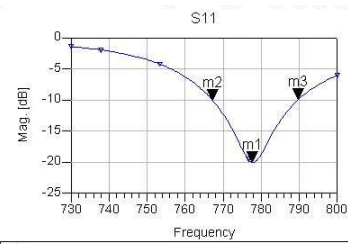
Gráfica de Propiedades



10 mm

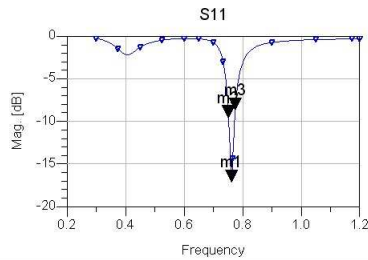


m1	freq=768.8MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-18.311
m2	freq=754.7MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-8.339
m3	freq=778.1MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-9.732

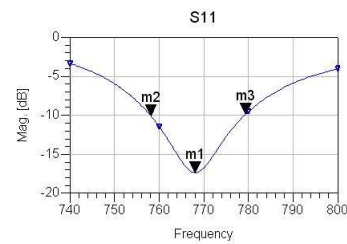


m1	freq=777.8MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_730_a_800_a..S(1,1))=-20.092
m2	freq=767.2MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_730_a_800_a..S(1,1))=-10.056
m3	freq=789.8MHz dB(slot2_material_grosor_10_er_17_de_730_a_800_a..S(1,1))=-9.960

15 mm

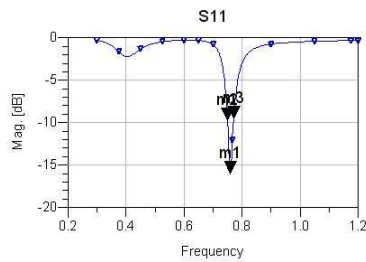


m1	freq=762.5MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-17.139
m2	freq=752.1MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-9.581
m3	freq=775.0MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-8.722

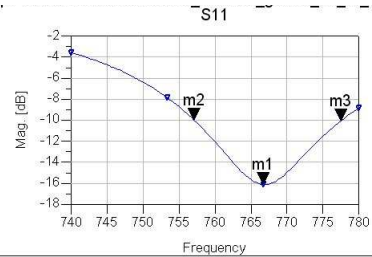


m1	freq=768.1MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_740_a_800_a..S(1,1))=-17.380
m2	freq=758.1MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_740_a_800_a..S(1,1))=-10.093
m3	freq=779.4MHz dB(slot2_material_grosor_15_er_17_de_740_a_800_a..S(1,1))=-9.868

20 mm



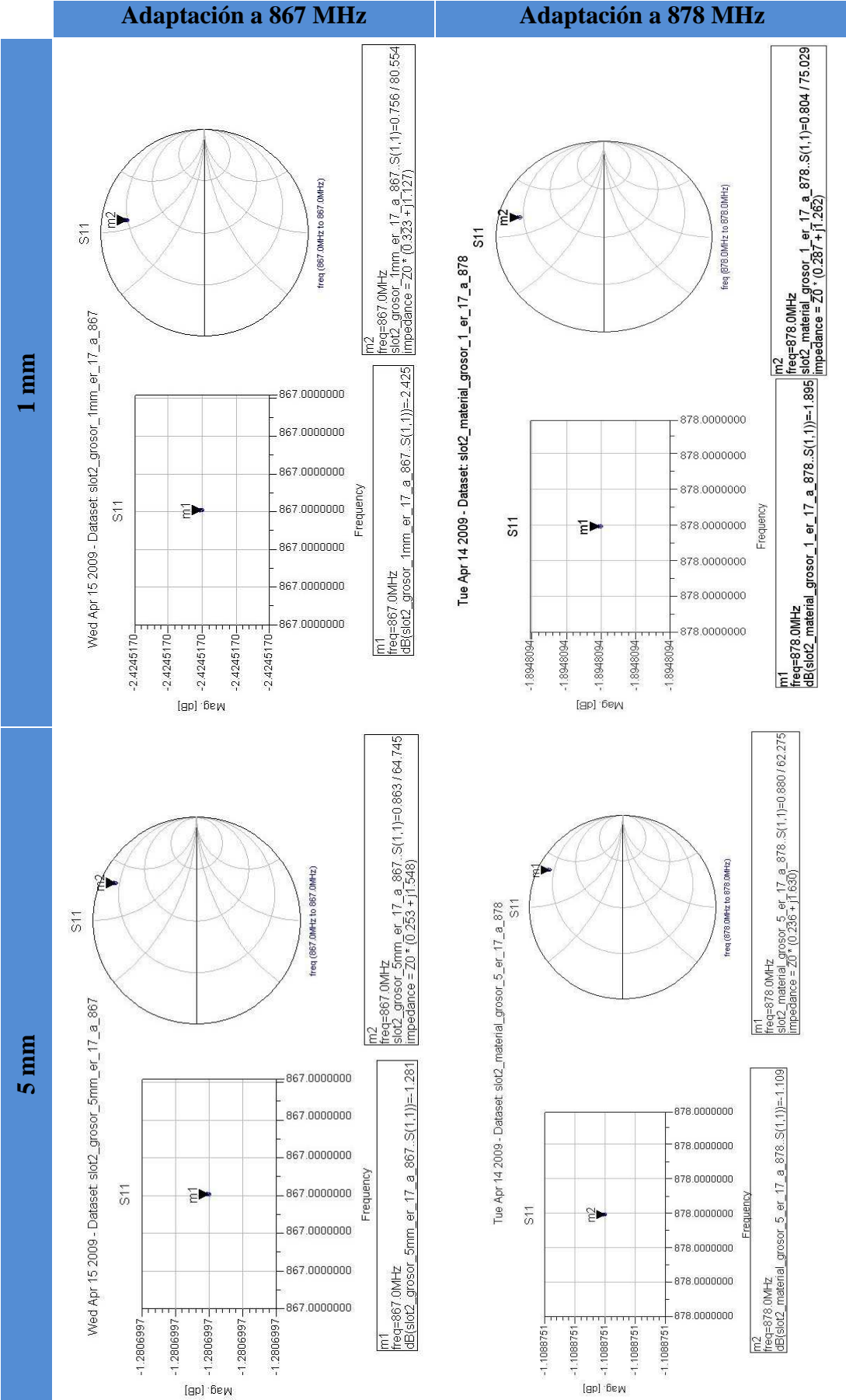
m1	freq=760.4MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-15.999
m2	freq=750.0MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-9.689
m3	freq=770.8MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_03_a_12_a..S(1,1))=-9.496



m1	freq=766.7MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_740_a_780_a..S(1,1))=-16.126
m2	freq=757.1MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_740_a_780_a..S(1,1))=-9.988
m3	freq=777.5MHz dB(slot2_material_grosor_20_er_17_de_740_a_780_a..S(1,1))=-10.054

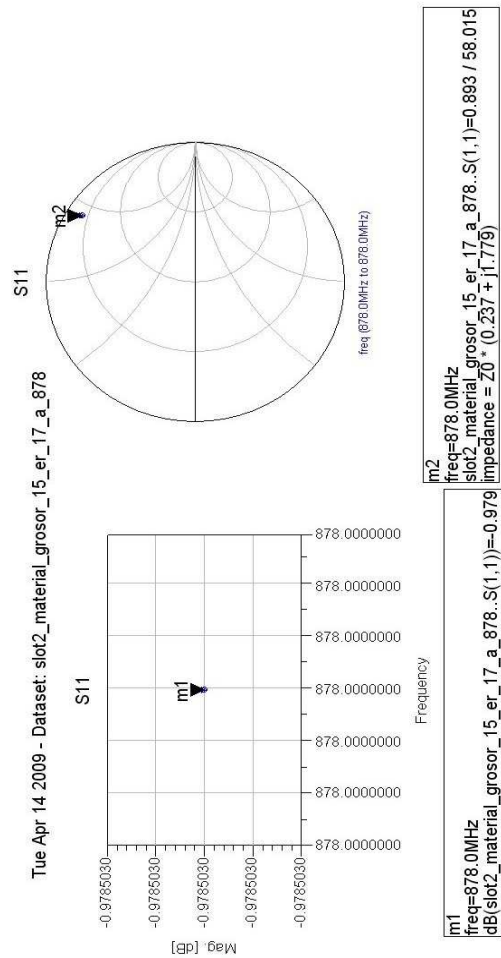
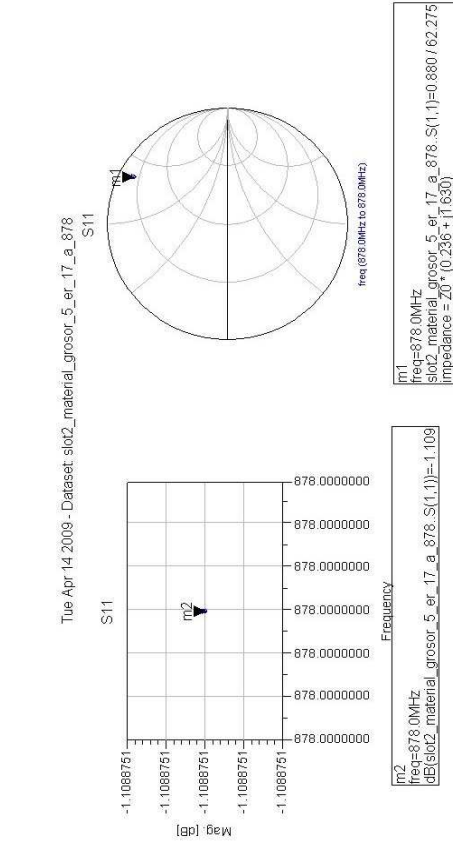
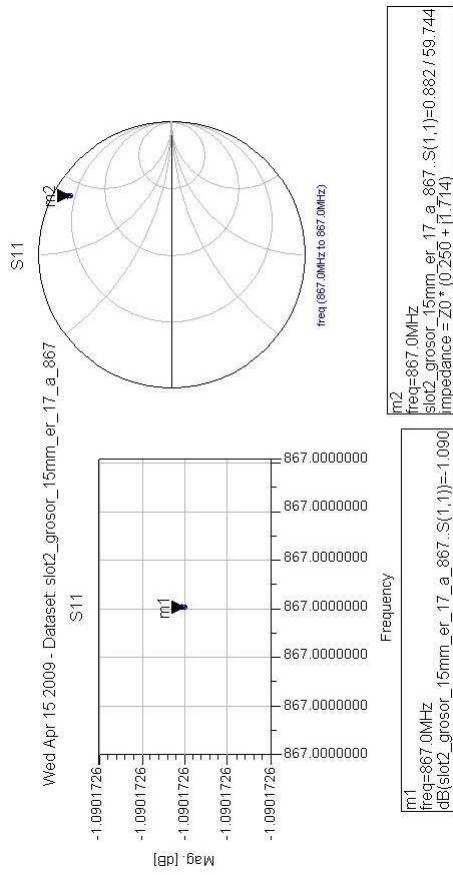
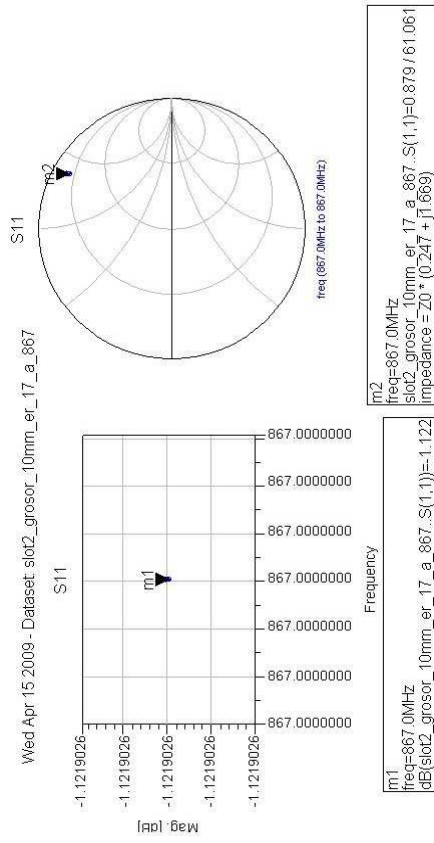
Tabla A.2.-Frecuencia de resonancia a diferentes grosores

Nivel de adaptación e impedancia a frecuencias de interés



10 mm

15 mm



20 mm

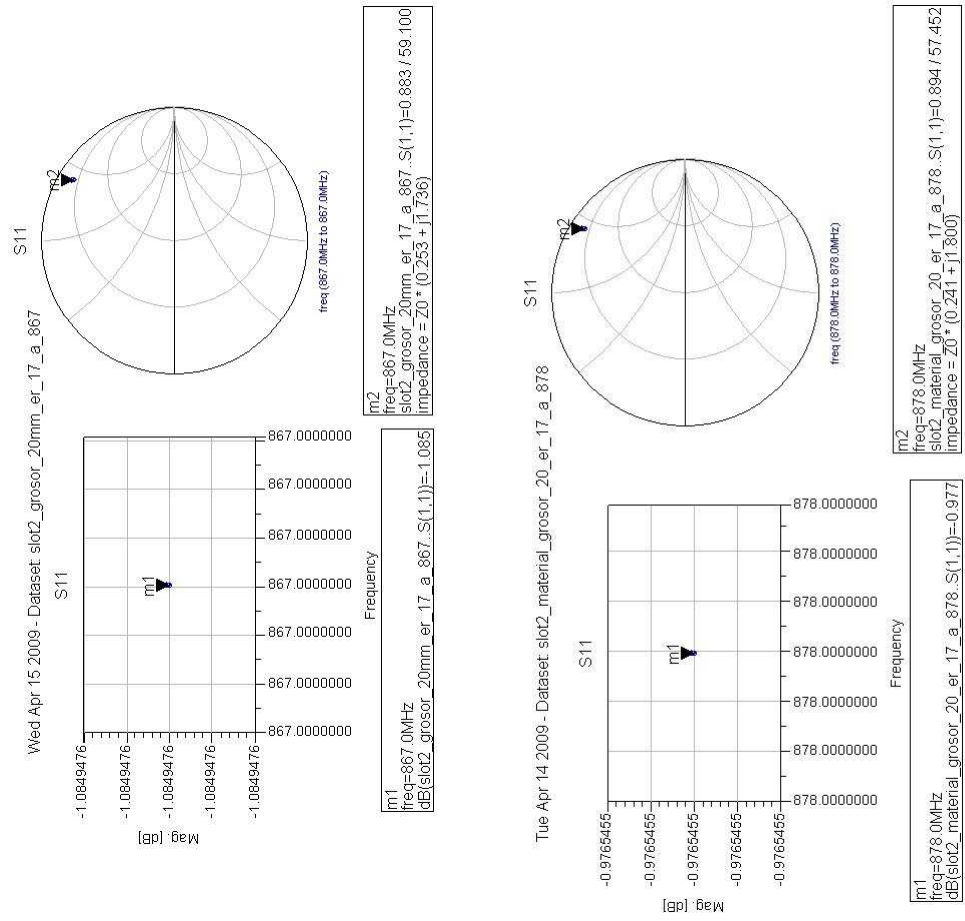
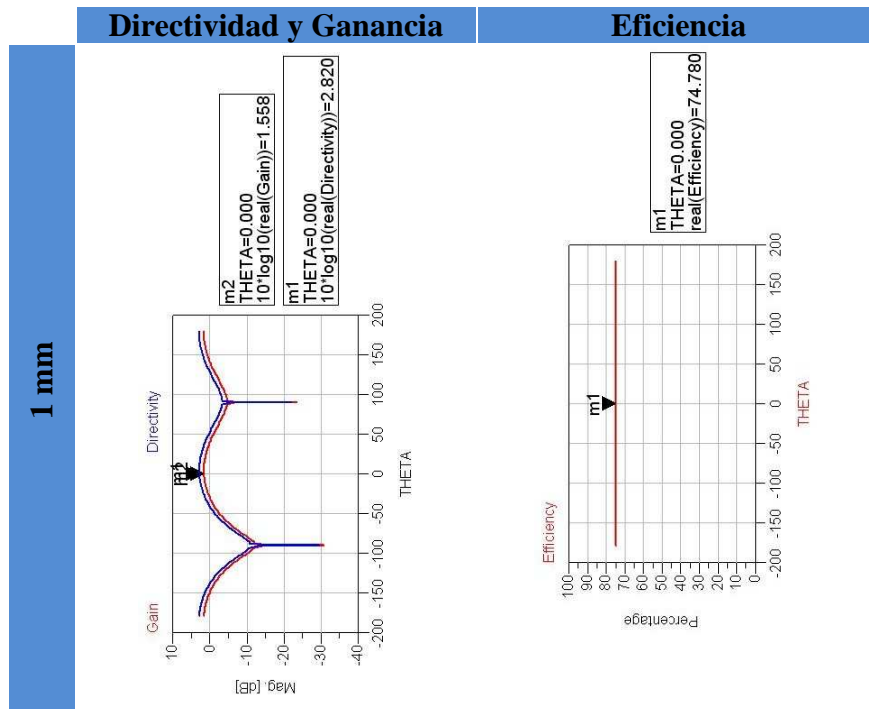


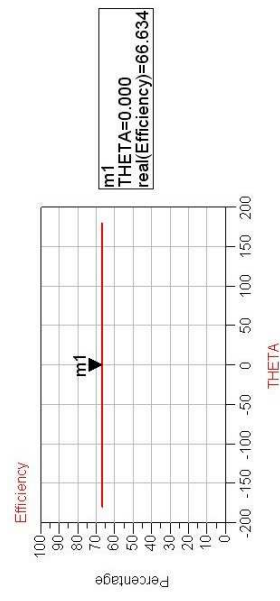
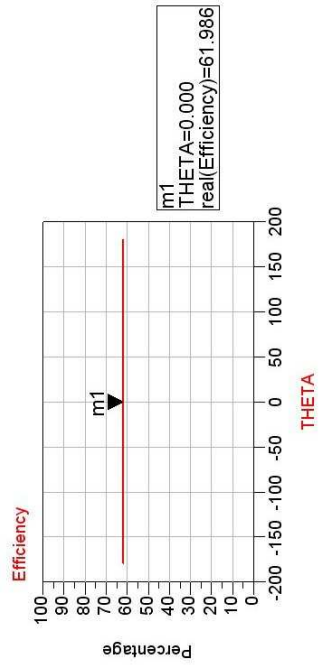
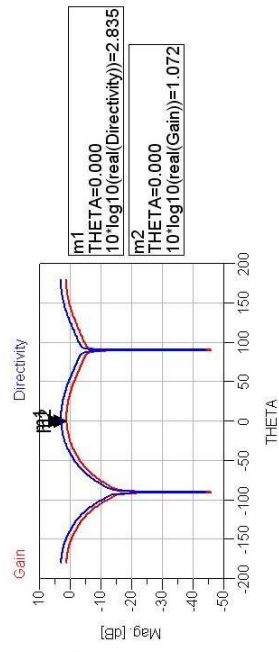
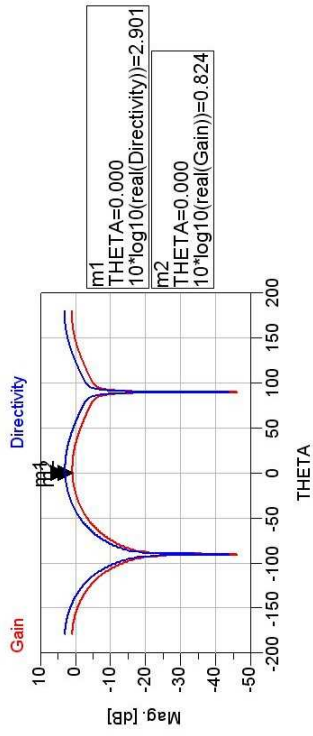
Tabla A.3. Nivel dBs a 867 y 878 MHz

Propiedades del tag a 867 MHz



10 mm

5 mm



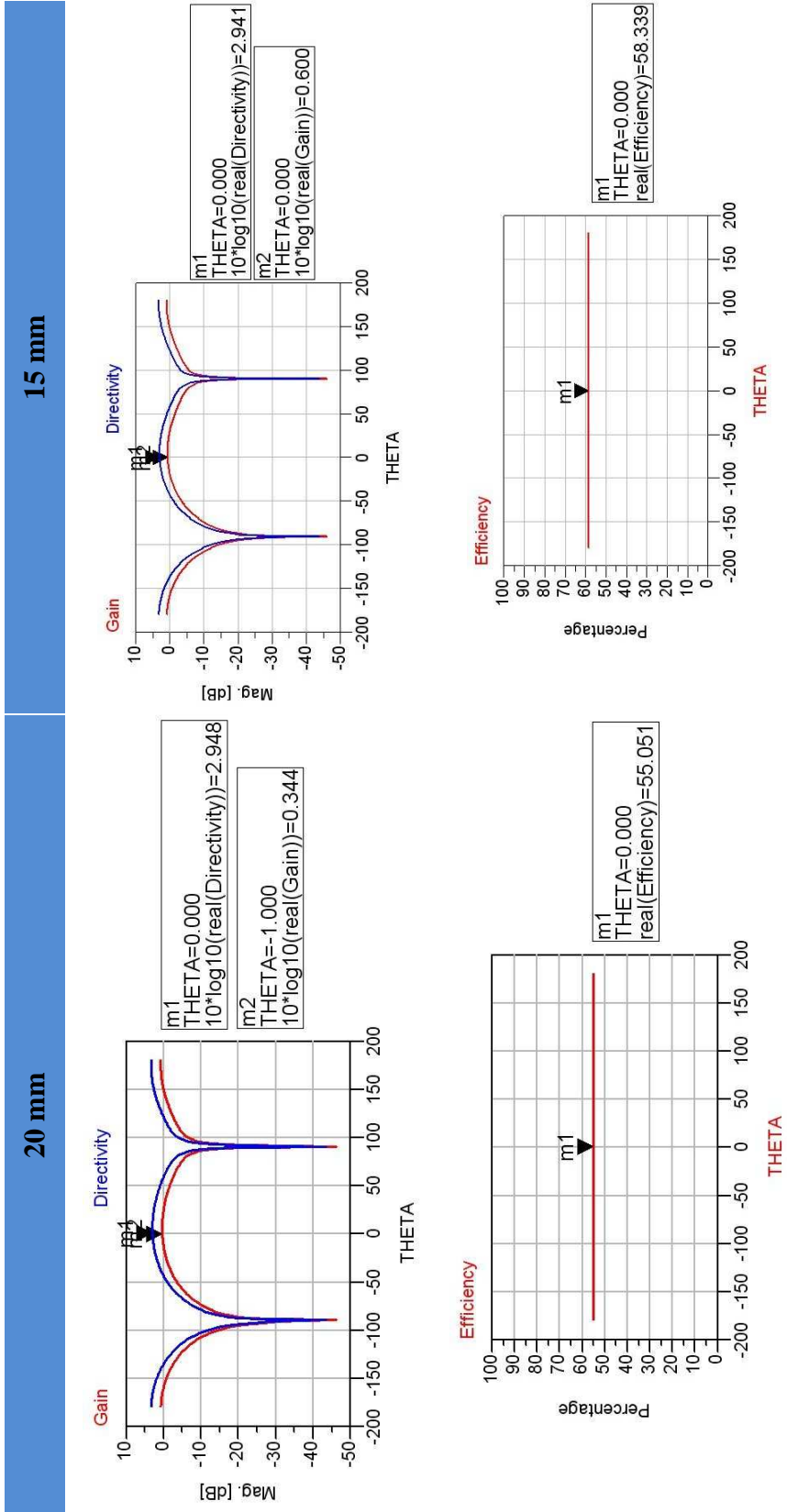
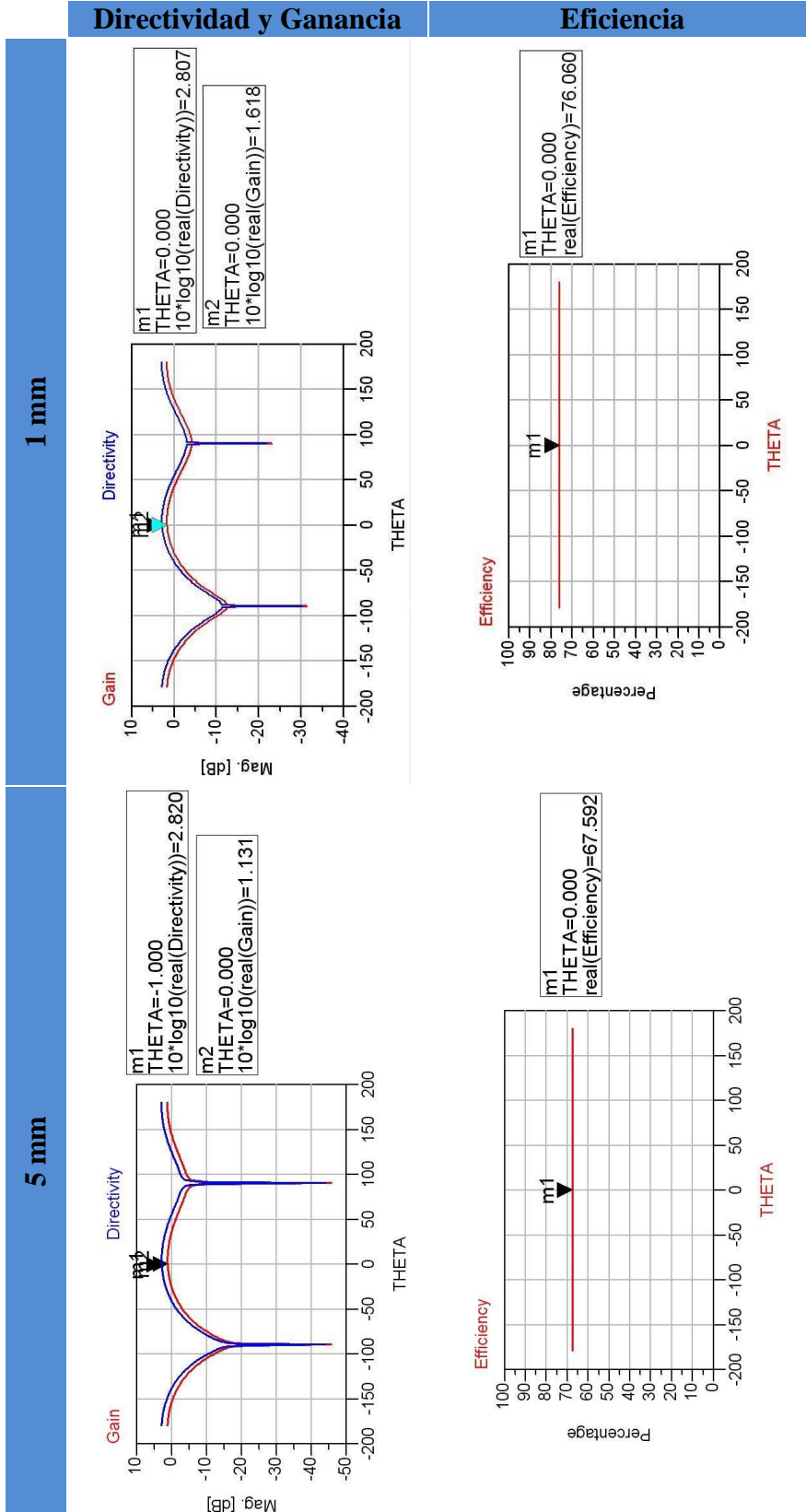
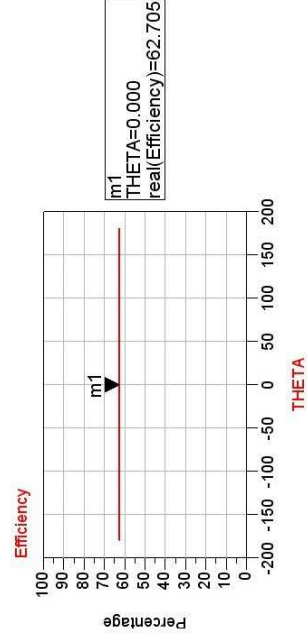
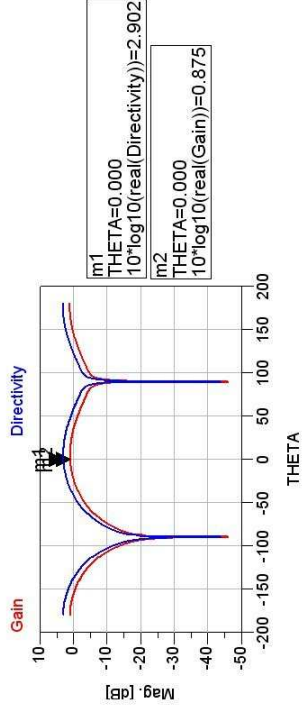
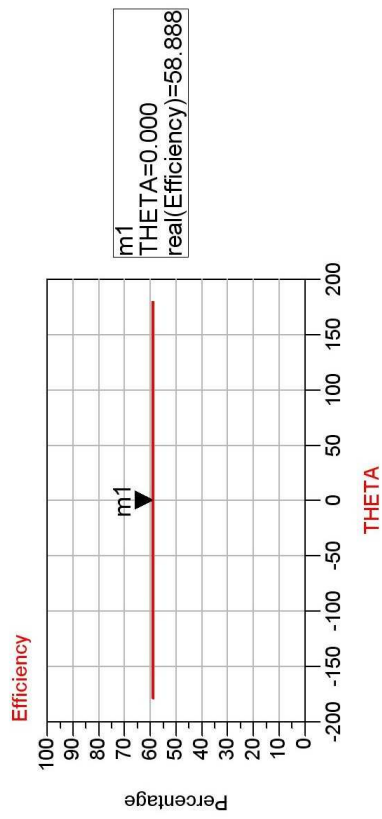
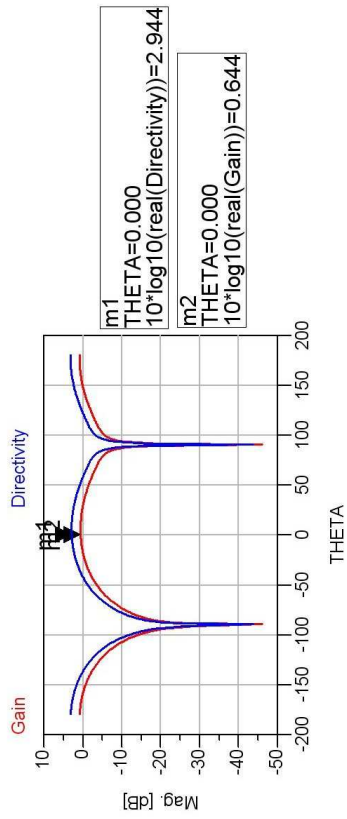


Tabla A.4. Niveles de directividad, ganancia y efectividad a 867 MHz

Propiedades del tag a 878 MHz



15 mm **10 mm**



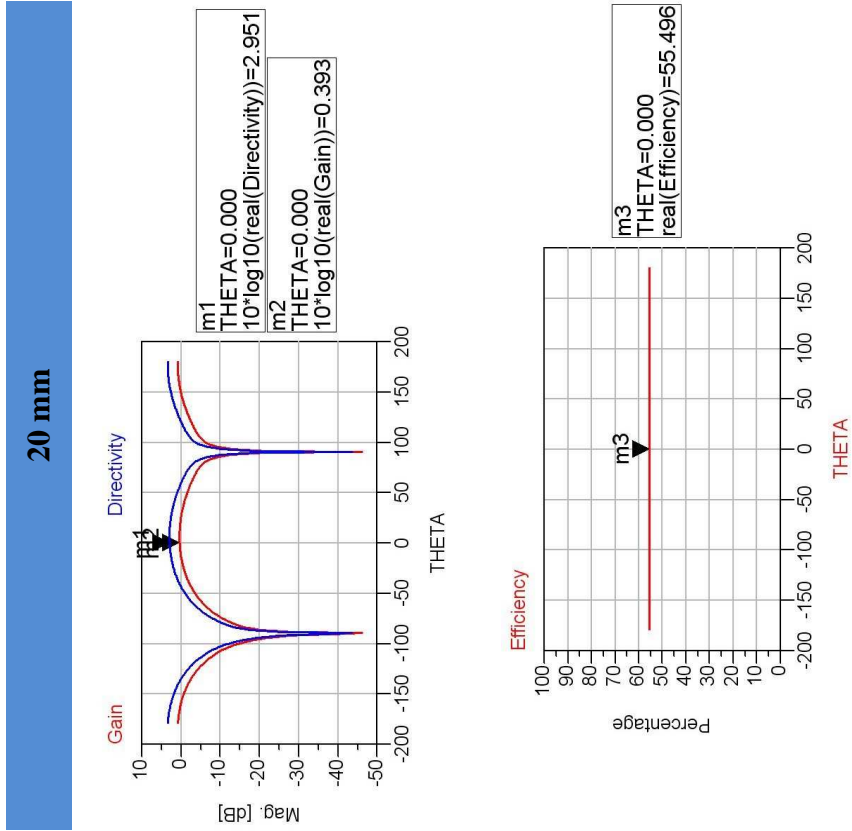


Tabla A.5. Niveles de directividad, ganancia y efectividad a 878 MHz

A.1.- Representación de Radiación

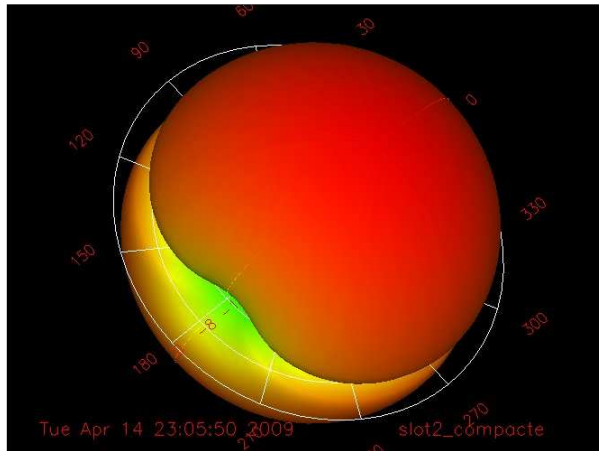


Figura A.1.1. Radiación a 878 MHz sobre 10 mm de madera/cartón

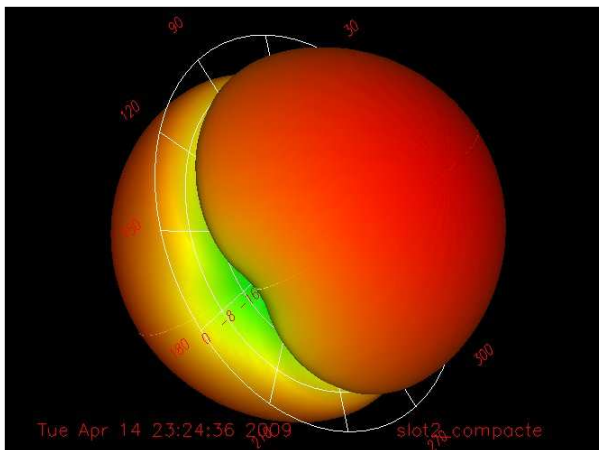


Figura A.1.2. Radiación a 878 MHz sobre 15 mm de madera/cartón

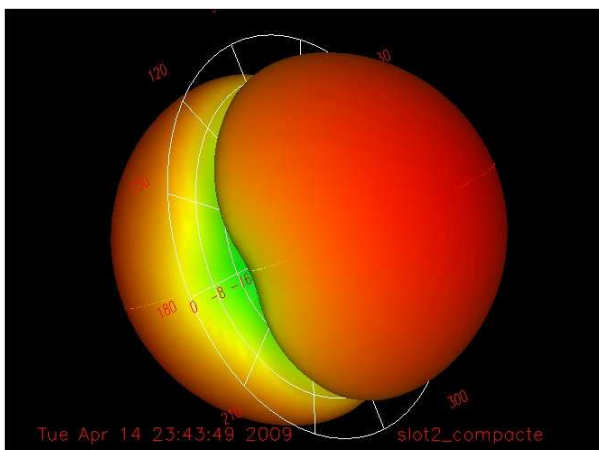


Figura A.1.3. Radiación a 878 MHz sobre 20 mm de madera/cartón

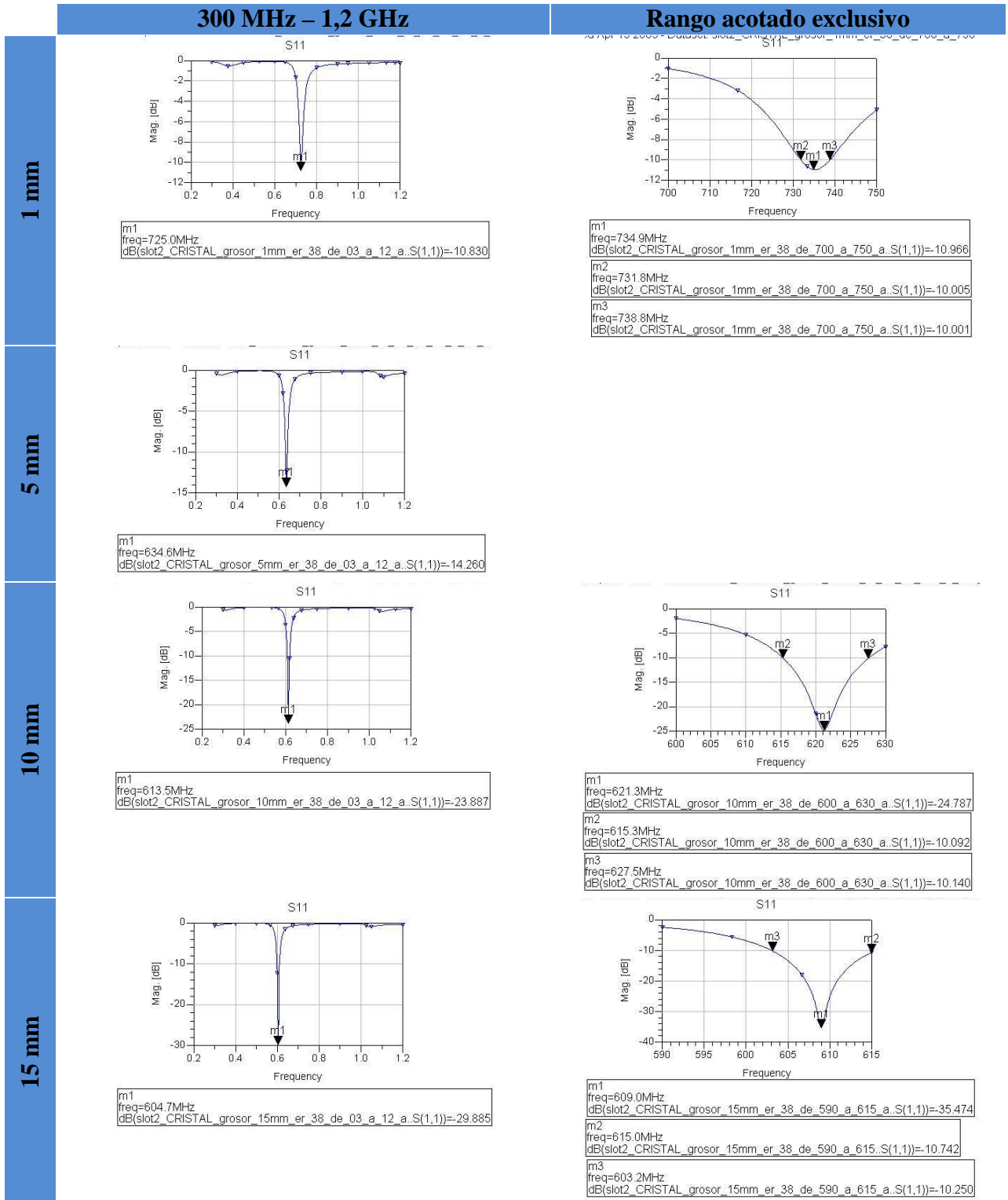
B.- Simulación de Tag con Cristal

A continuación se presentan los datos obtenidos y las gráficas de cada una de las simulaciones con Momentum obtenidas al añadir cristal debajo del tag.

	867 MHz						878 MHz						freq reso MHz
	dBs	Gain	Directividad	Eficiencia %	Impedance	dBs	Gain	Directividad	Eficiencia %	Impedance			
0 mm	-12,515	2,589	3,05	89,935	Z0*(1,040-j0,495)	-13,653	2,613	3,012	91,23	Z0*(0,677+j0,134)	869,800		
1 mm	-0,431	1,938	2,618	85,490	Z0*(0,115+j1,908)	-0,401	1,938	2,615	85,558	Z0*(0,112+j1,965)	734,900		
5 mm	-0,238	1,113	2,785	68,047	Z0*(0,091+j2,380)	-0,232	1,085	2,777	67,731	Z0*(0,091+j2,415)	634,600		
10 mm	-0,238	0,148	2,939	52,584	Z0*(0,100+j2,500)	-0,232	0,069	2,915	51,923	Z0*(0,099+j2,534)	621,300		
15 mm	-0,250	-0,961	2,868	41,410	Z0*(0,108+j2,546)	-0,234	-1,096	2,823	40,554	Z0*(0,107+j2,580)	609,000		
20 mm	-0,260	-2,194	2,559	33,478	Z0*(0,114+j2,569)	-0,253	-2,385	2,491	32,533	Z0*(0,114+j2,603)	600,200		

Tabla B.1. Tabla de propiedades del tag sobre diferentes grosores de cristal

Gráficas de Propiedades



20 mm

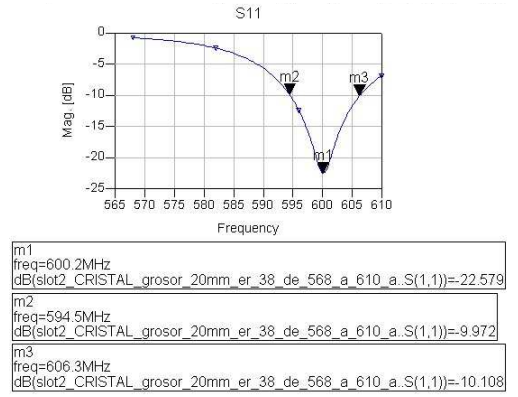
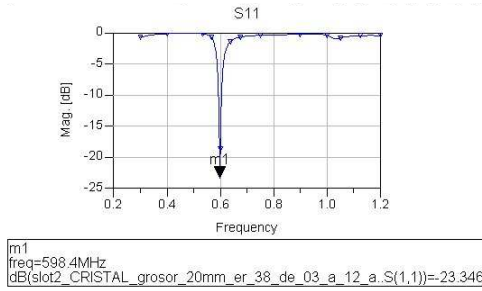


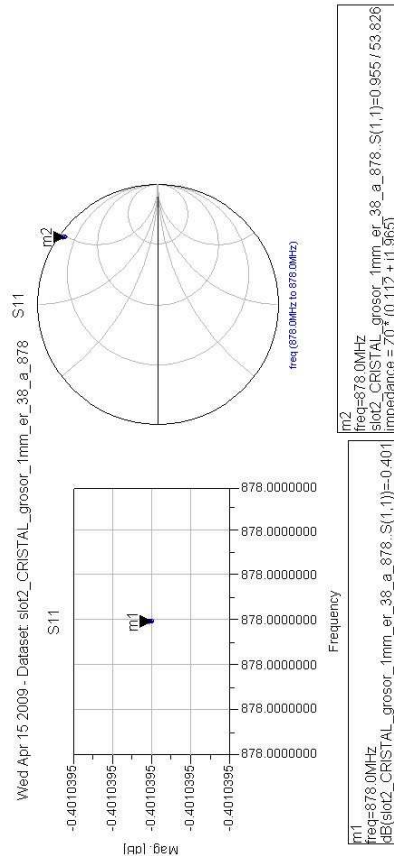
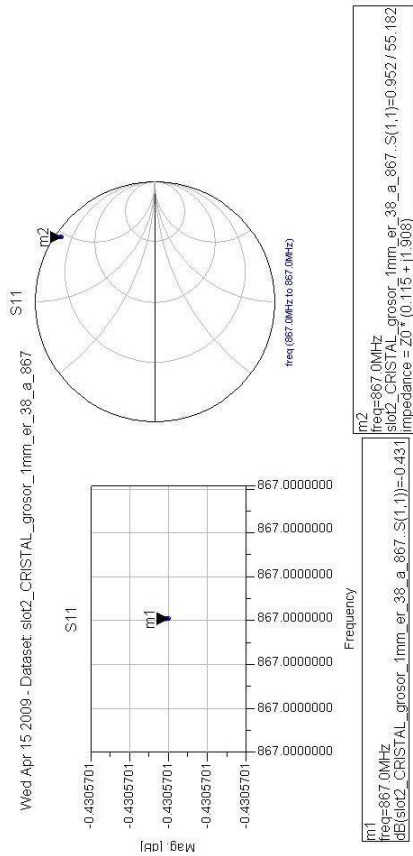
Tabla B.2.-Frecuencia de resonancia a diferentes grosores

Nivel de adaptación e impedancia a frecuencias de interés

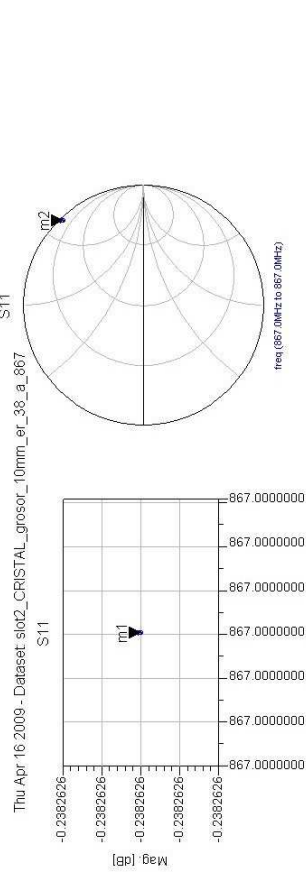
Adaptación a 867 MHz

Adaptación a 878 MHz

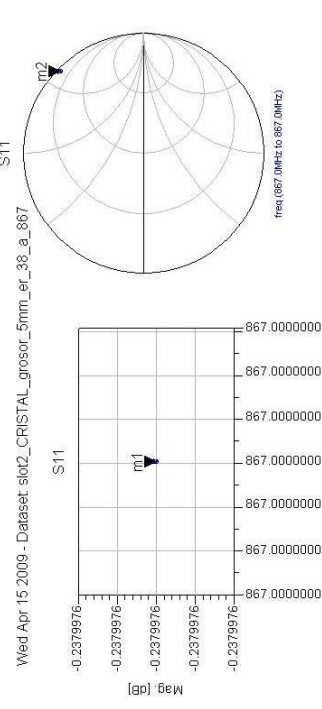
1 mm



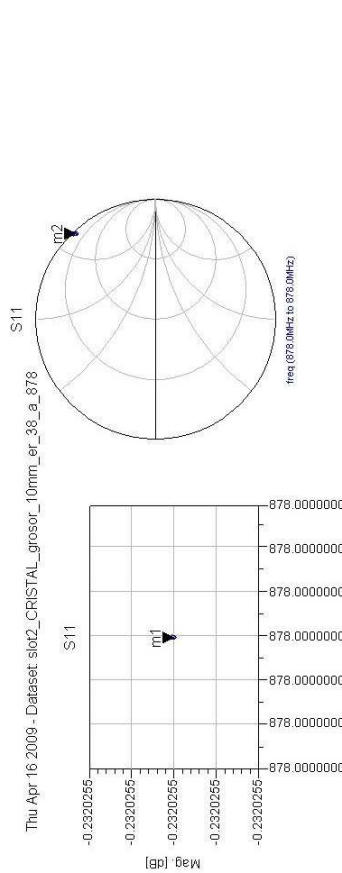
10 mm



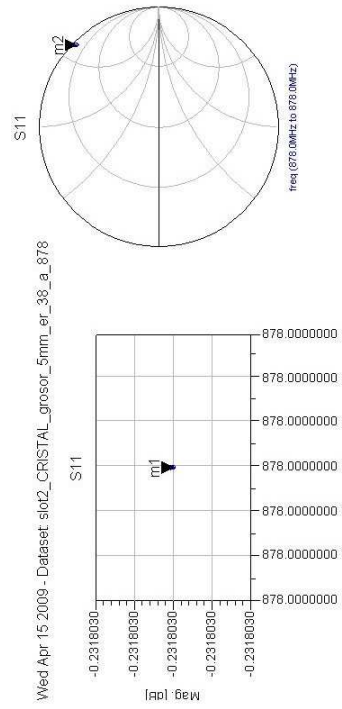
m1
freq=867.0MHz
dB(S11)= -0.2382626
m2
freq=867.0MHz
slot2_CRISTAL_grosor_10mm_er_38_a_867.S(1,1)=-0.973143546
impedance = Z0 * (0.100 + j2.500)



m1
freq=867.0MHz
dB(S11)= -0.2379976
m2
freq=867.0MHz
slot2_CRISTAL_grosor_5mm_er_38_a_867.S(1,1)=-0.973145526
impedance = Z0 * (0.091 + j2.380)



m1
freq=878.0MHz
dB(S11)= -0.2320265
m2
freq=878.0MHz
slot2_CRISTAL_grosor_10mm_er_38_a_878.S(1,1)=-0.974143024
impedance = Z0 * (0.098 + j2.534)



m1
freq=878.0MHz
dB(S11)= -0.2318030
m2
freq=878.0MHz
slot2_CRISTAL_grosor_5mm_er_38_a_878.S(1,1)=-0.974144941
impedance = Z0 * (0.091 + j2.415)

5 mm

20 mm **15 mm**

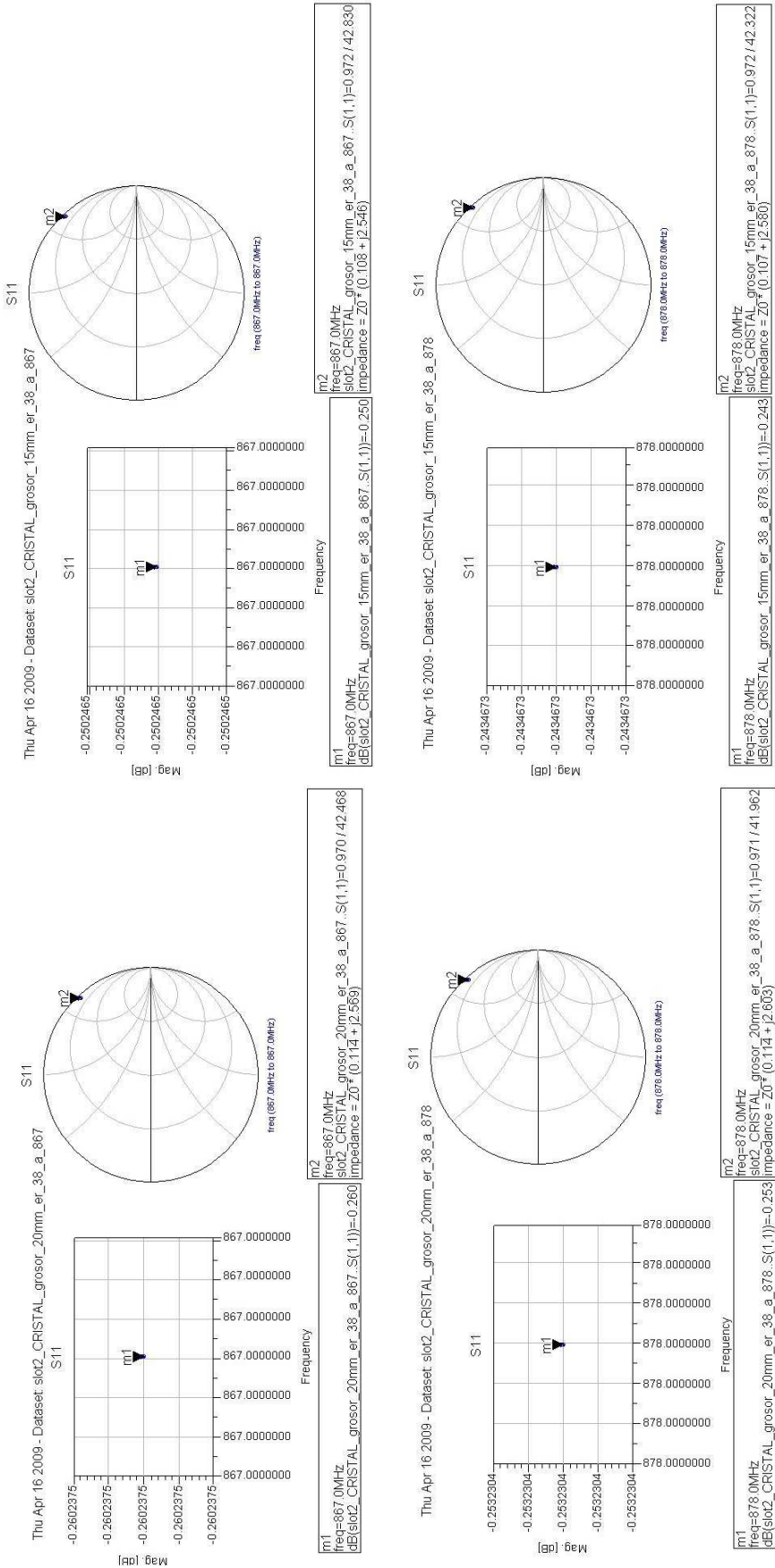
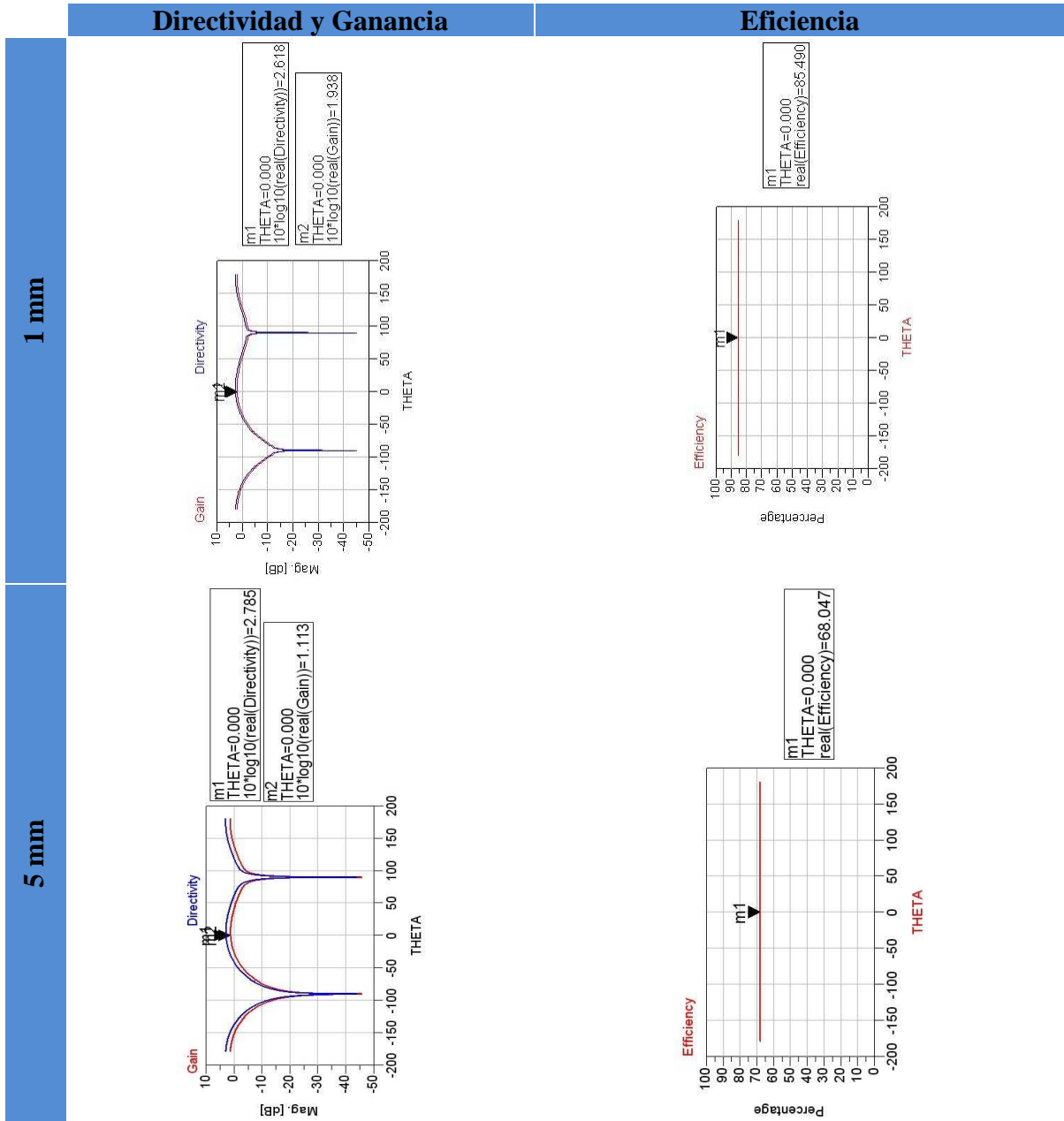
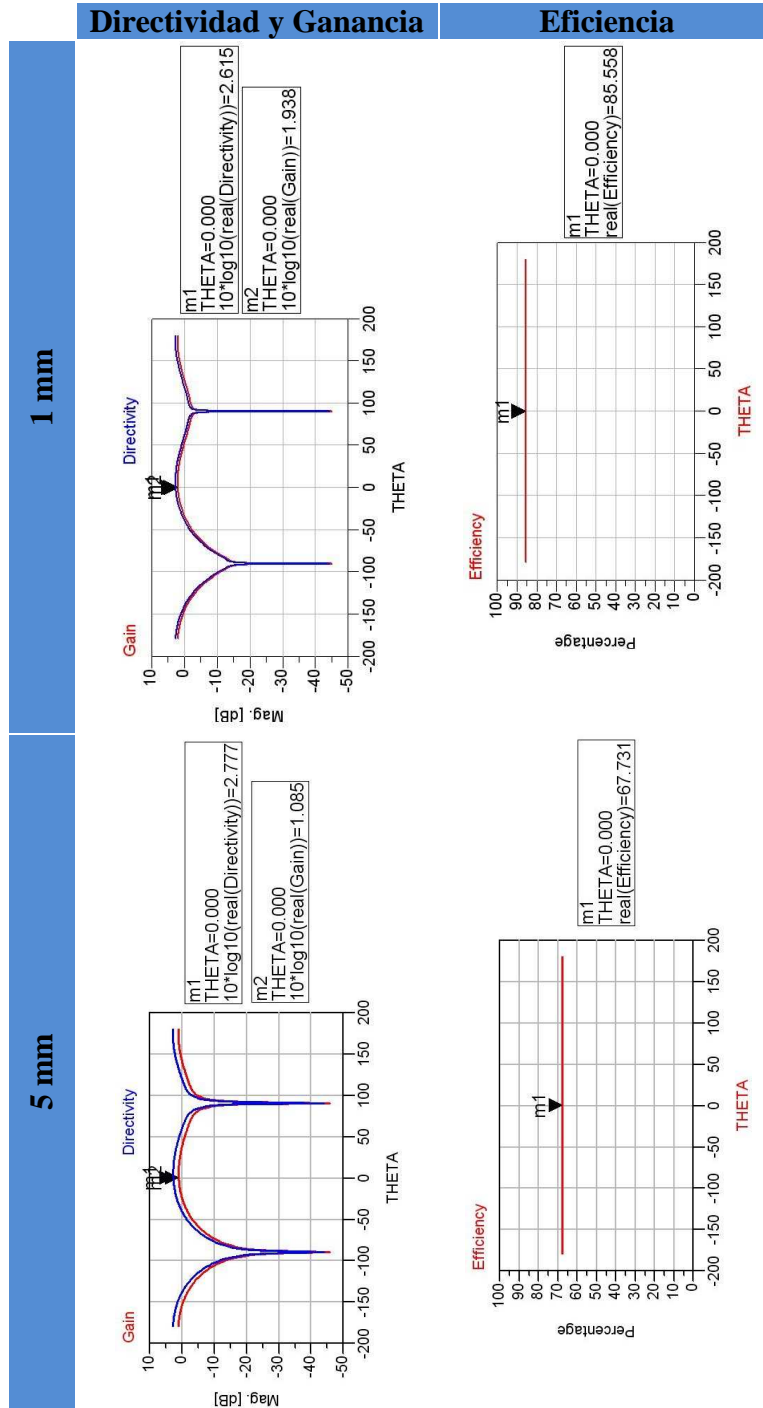


Tabla B.3. Nivel dBs a 867 y 878 MHz

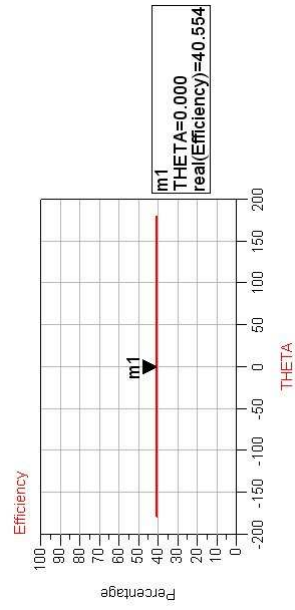
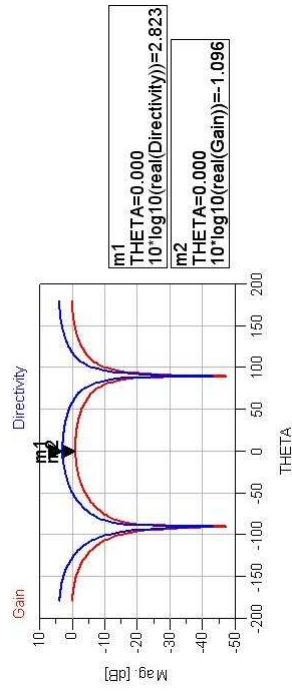
Propiedades del tag a 867 MHz



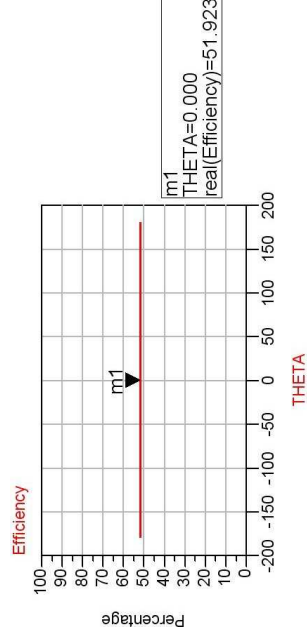
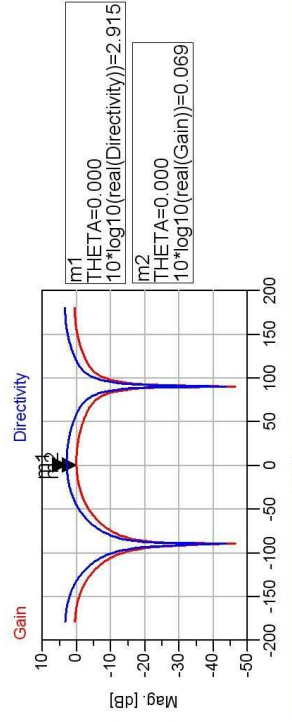
Propiedades del tag a 878 MHz



15 mm



10 mm



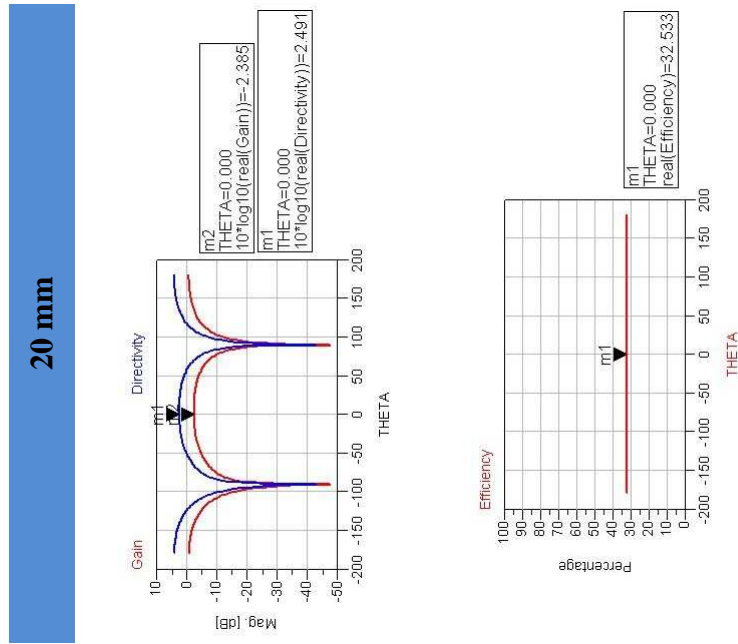
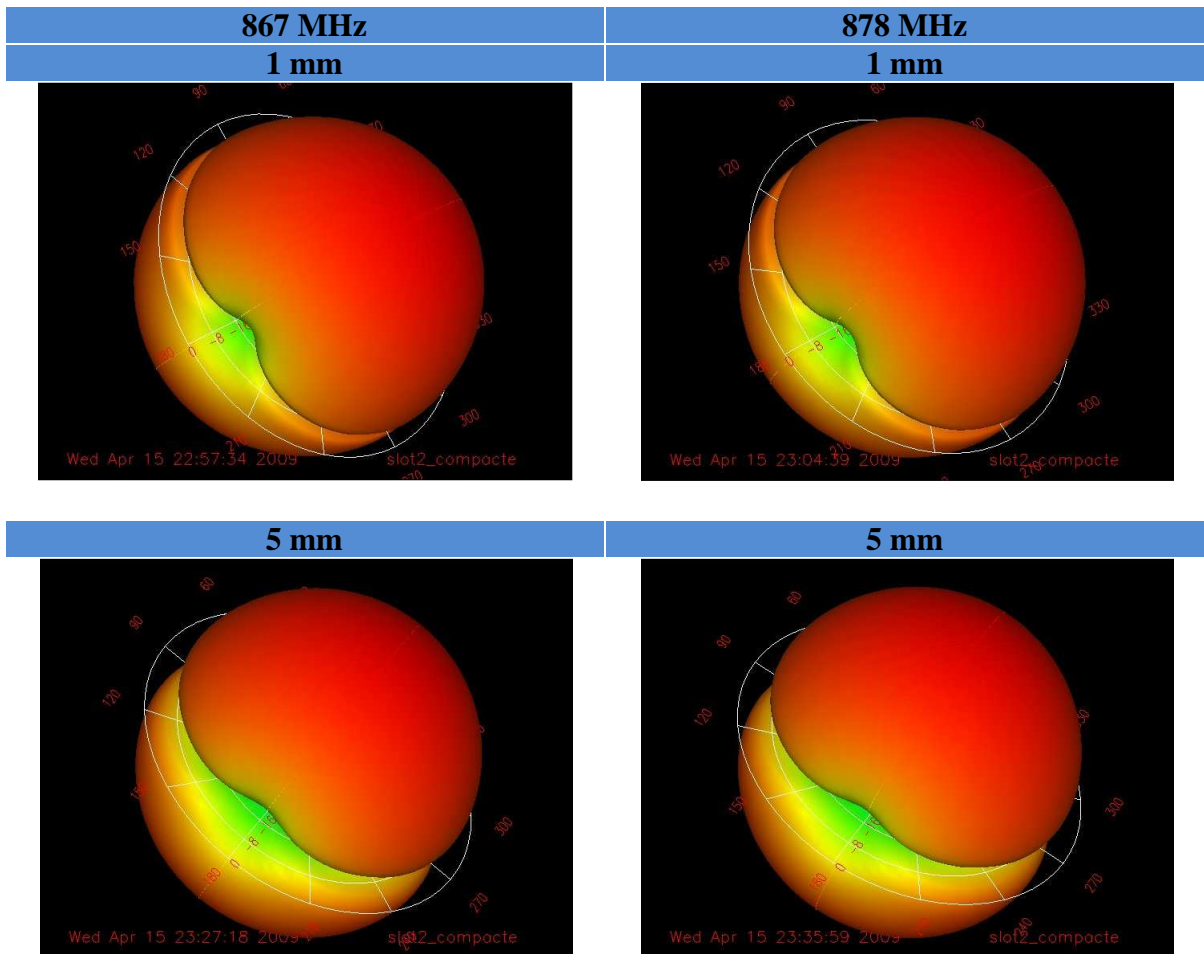


Tabla B.5. Niveles de directividad, ganancia y efectividad a 878 MHz

B.1.- Representación de Radiación



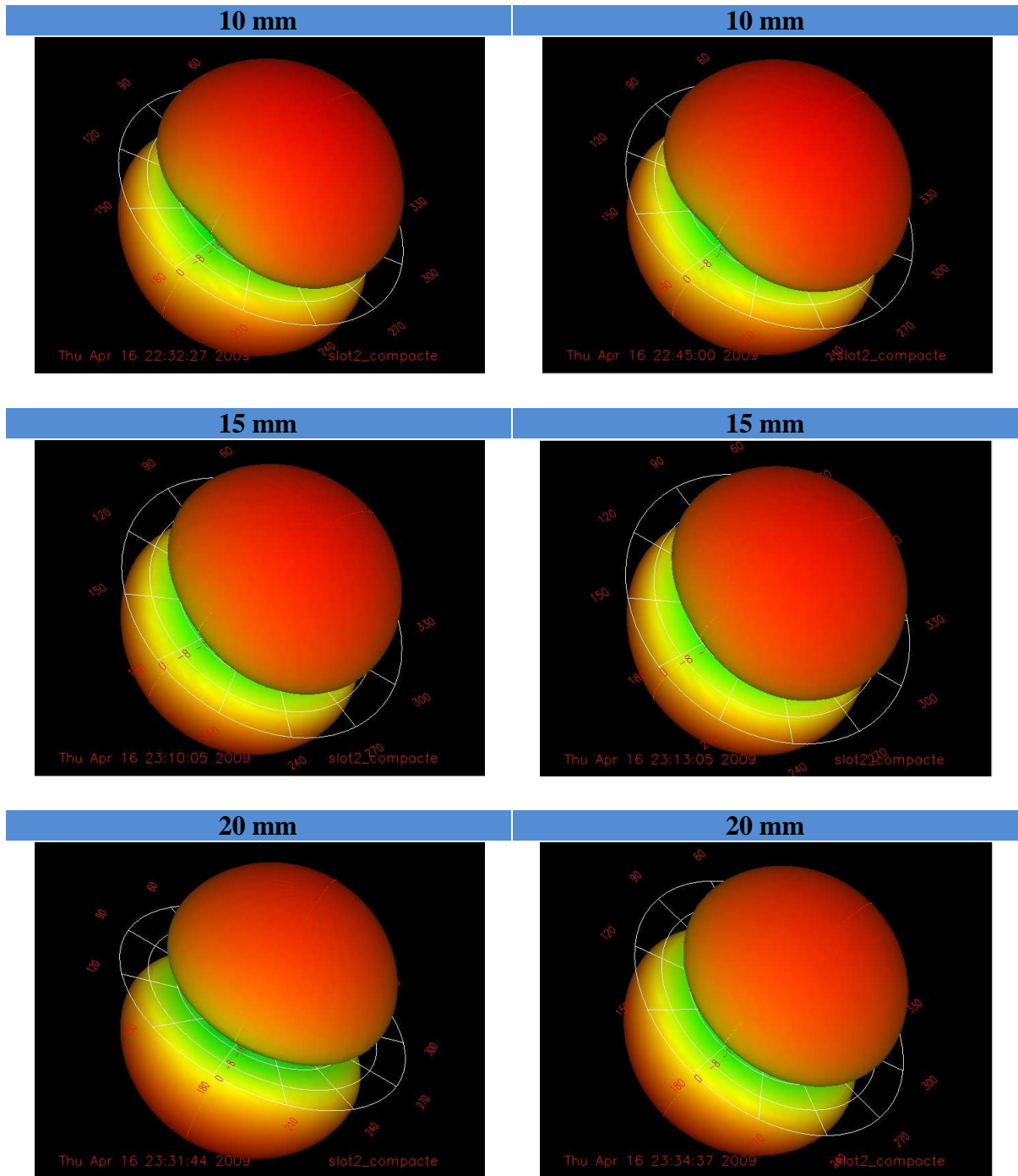


Figura B.1.1. Diagramas de radiación 3D

C.- Simulación de Tag con Cristal y Agua

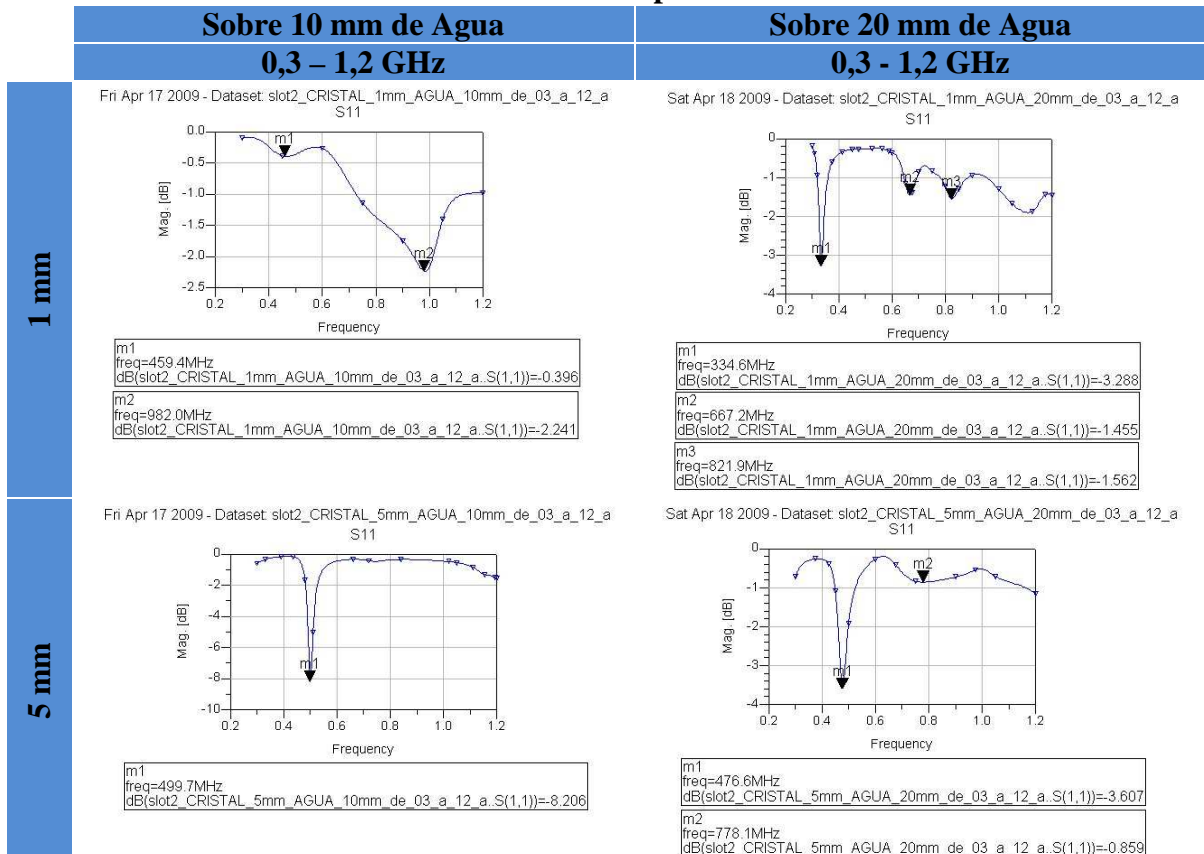
CON 10mm DE AGUA DEBAJO DEL CRISTAL							
867 MHz							
	freq reso MHz	dBs	Gain disp	Gain pot	Directividad	Eficiencia %	Impedance
1 mm	464,100	-2,015	-22,132	-26,4359	-6,999	3,067	Z0*(1,130+j2,764)
5 mm	499,700	-0,369	-9,801	-20,6798	2,472	5,926	Z0*(0,188+j2,792)
10 mm	540,000	-0,205	-1,652	-14,9995	5,347	19,961	Z0*(0,104+j2,788)
15 mm	554,200	-0,207	2,239	-11,0682	6,369	38,635	Z0*(0,106+j2,803)
20 mm	568,300	-0,318	3,638	-7,8717	6,898	47,205	Z0*(0,165+j2,826)

Tabla C.1. Datos recogidos del tag sobre diferentes grosores de cristal y 10 mm de agua

CON 20mm DE AGUA DEBAJO DEL CRISTAL							
867 MHz							
	dBs	Gain disp	Gain pot	Directividad	Eficiencia %	Impedance	freq reso MHz
1 mm	-1,119	-17,820	-24,2557	2,326	0,967	Z0*(0,544+j2,682)	334,600
5 mm	-0,753	-11,042	-19,0270	2,612	4,311	Z0*(0,365+j2,705)	476,600
10 mm	-0,567	-8,397	-17,5100	2,825	7,547	Z0*(0,251+j2,573)	533,900
15 mm	-0,481	-7,310	-17,1161	2,722	9,927	Z0*(0,211+j2,570)	533,100
20 mm	-0,406	-6,565	-17,0552	2,595	12,134	Z0*(0,179+j2,574)	560,200

Tabla C.2. Datos recogidos del tag sobre diferentes grosores de cristal y 20 mm de agua

Gráficas de Propiedades



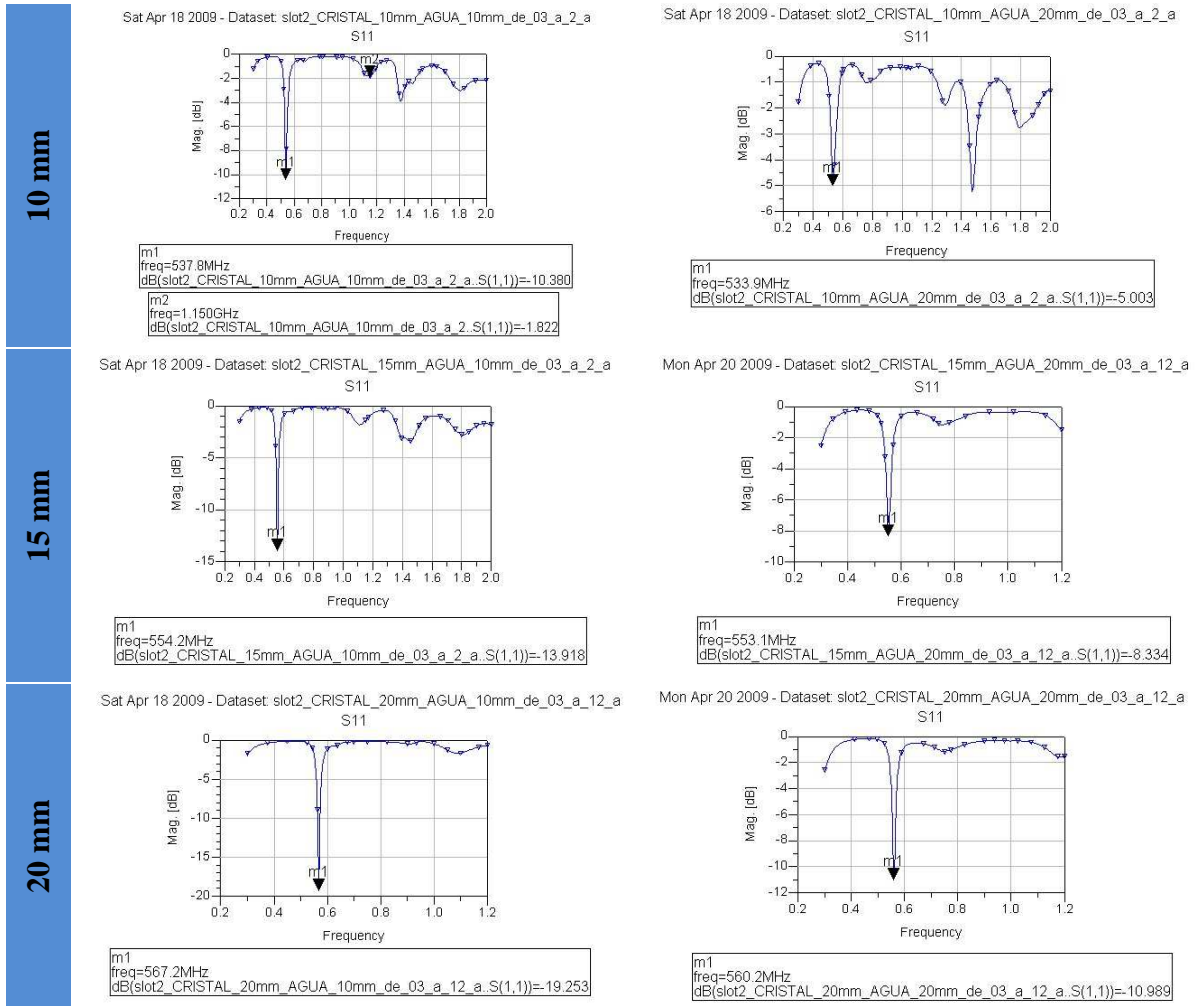
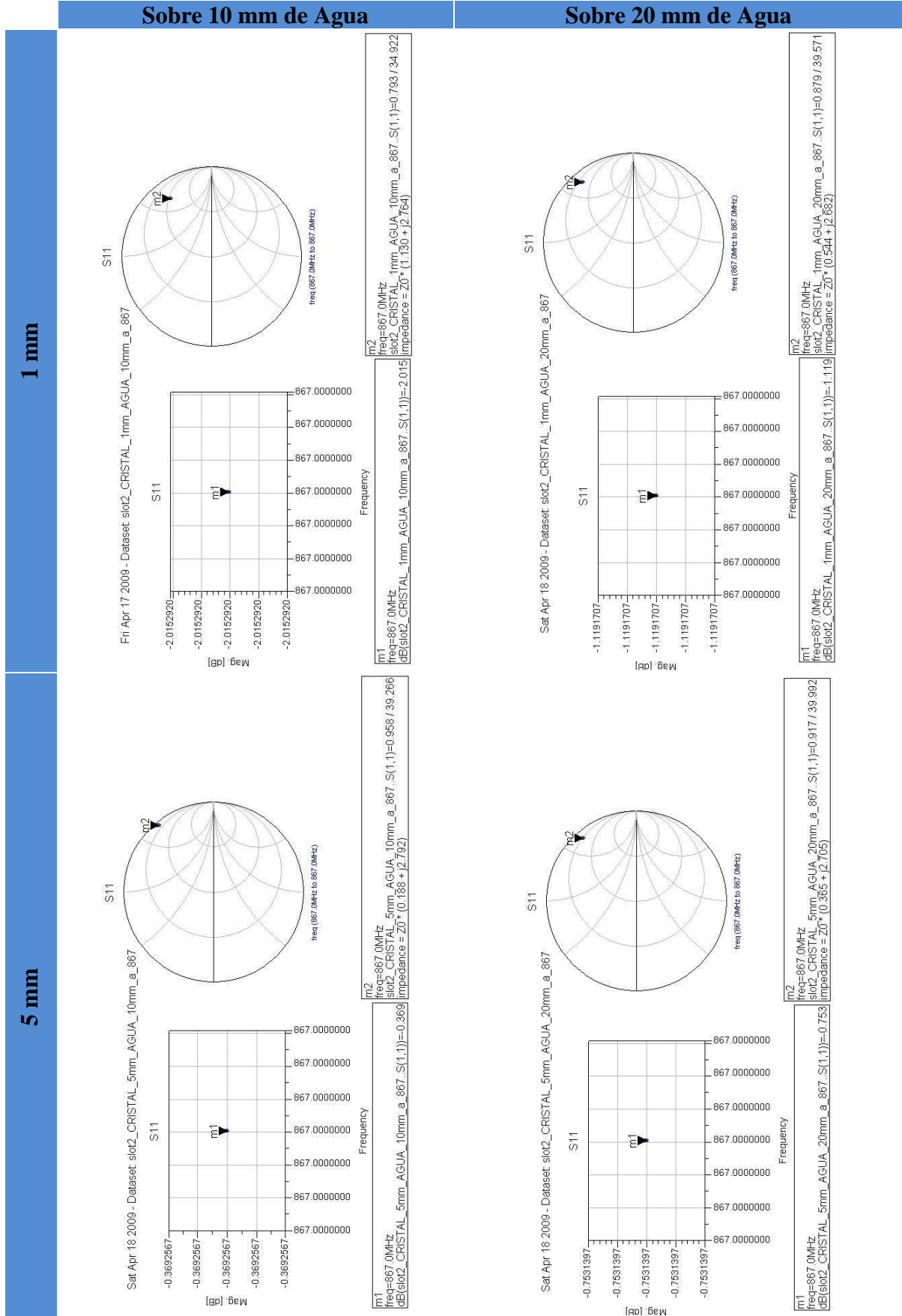
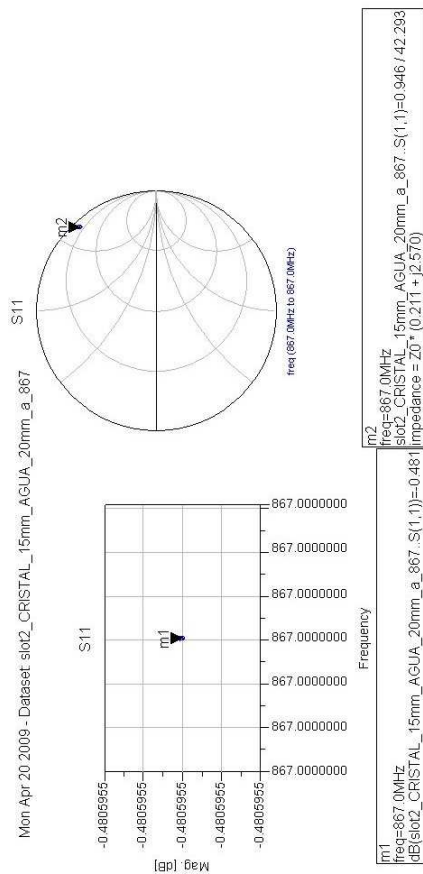
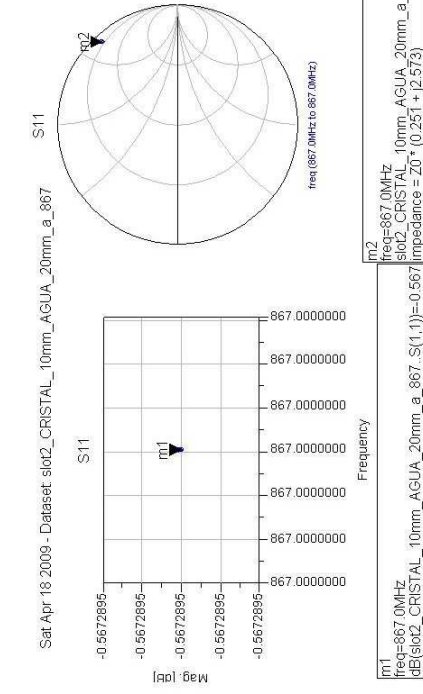
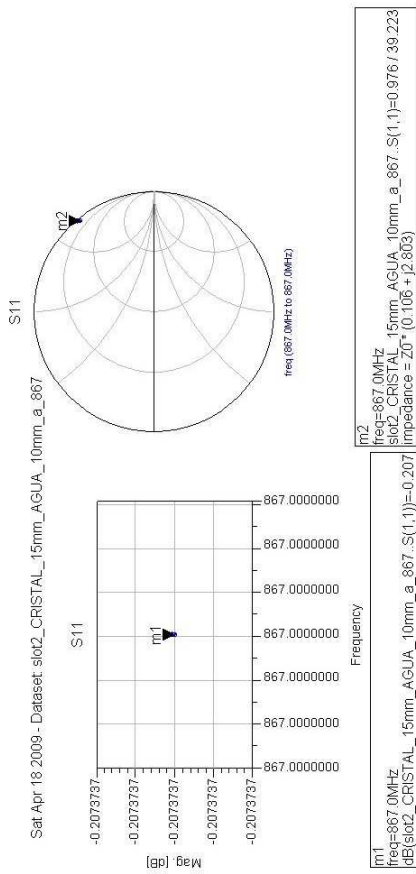
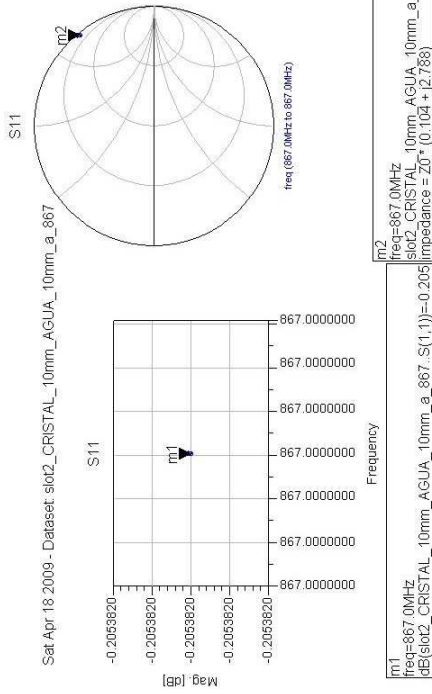


Tabla C.3. Niveles de directividad, ganancia y efectividad a 867 MHz

Nivel de adaptación e impedancia a 867 MHz



10 mm



20 mm

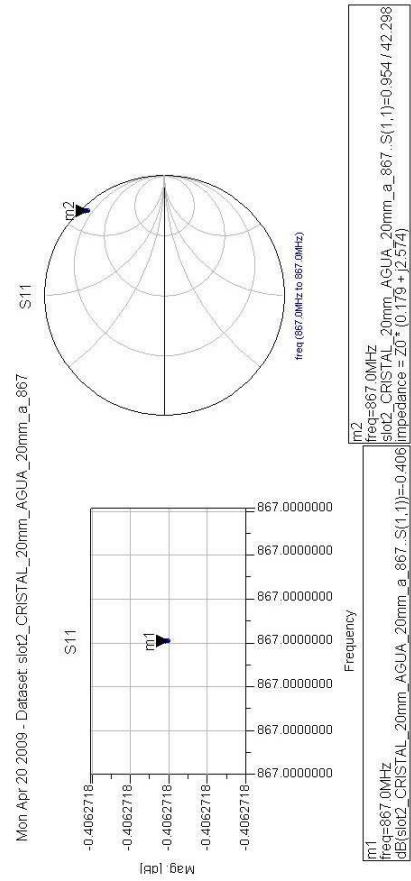
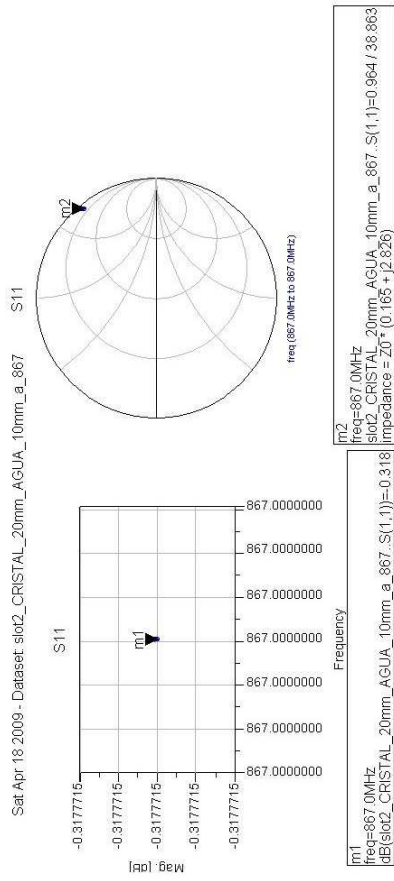
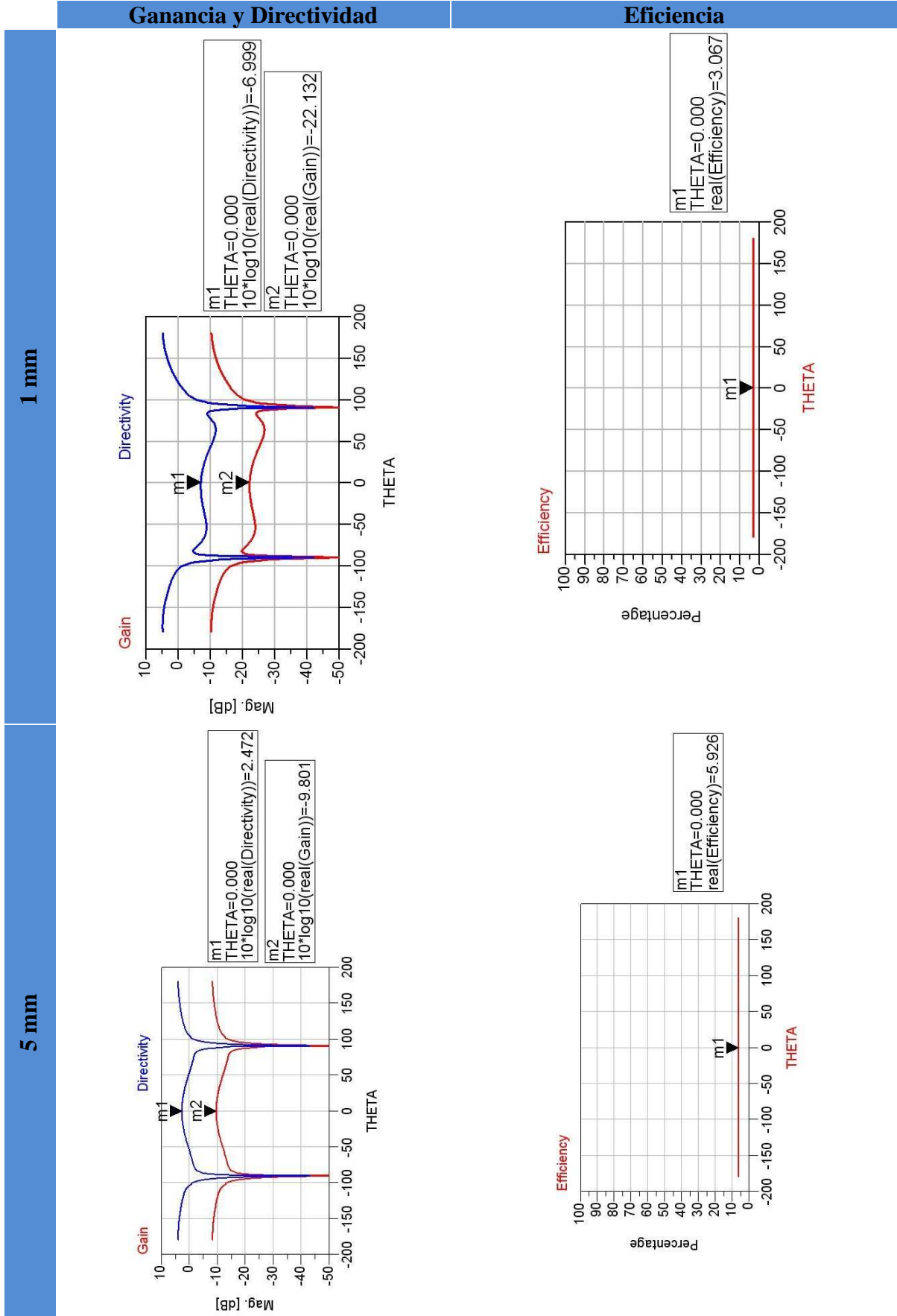
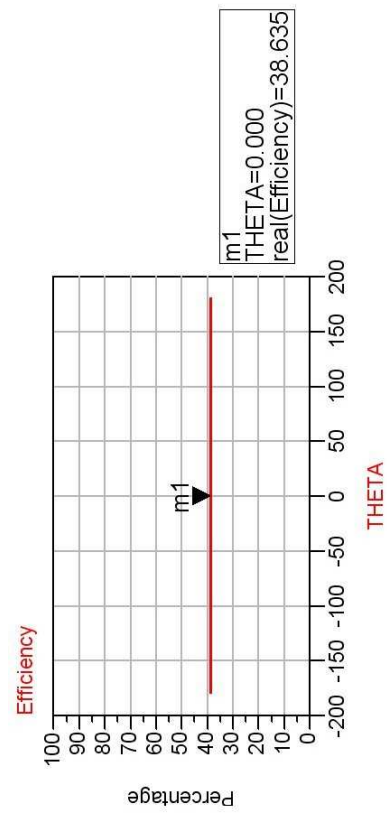
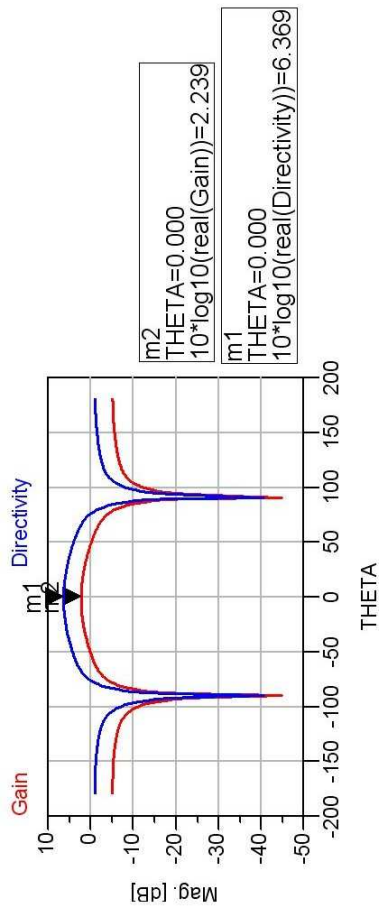


Tabla C.4. Niveles de directividad, ganancia y efectividad a 878 MHz

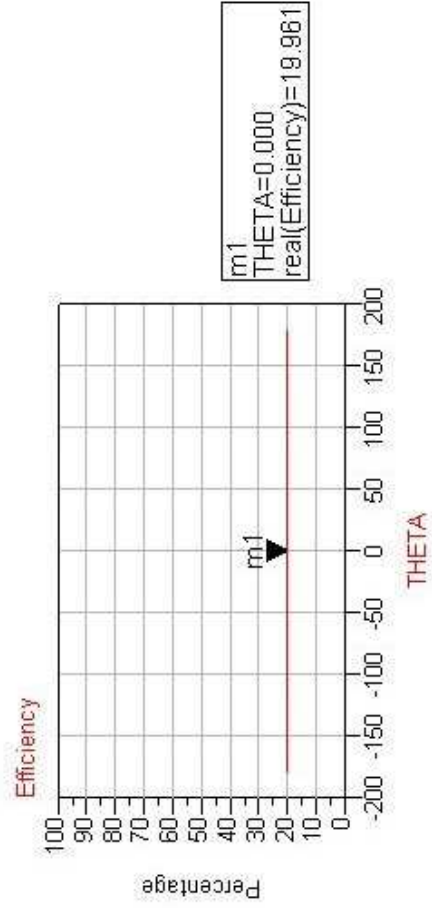
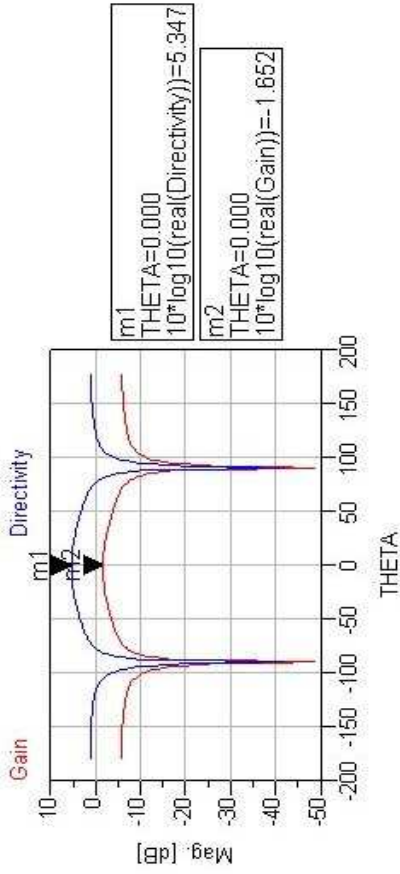
Propiedades del tag a 867 MHz sobre 10 mm de Agua



15 mm



10 mm



20 mm

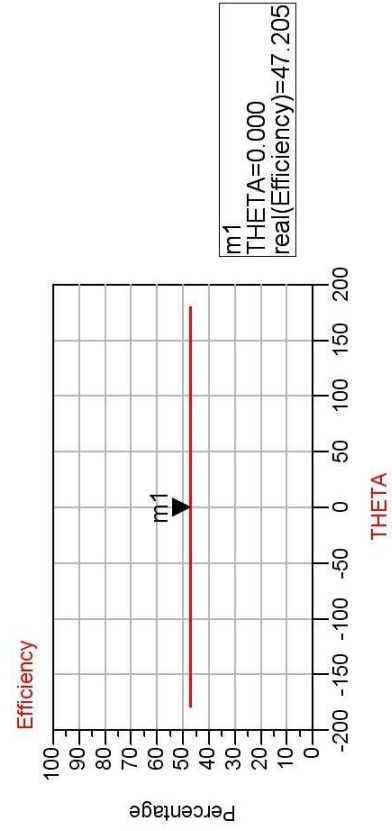
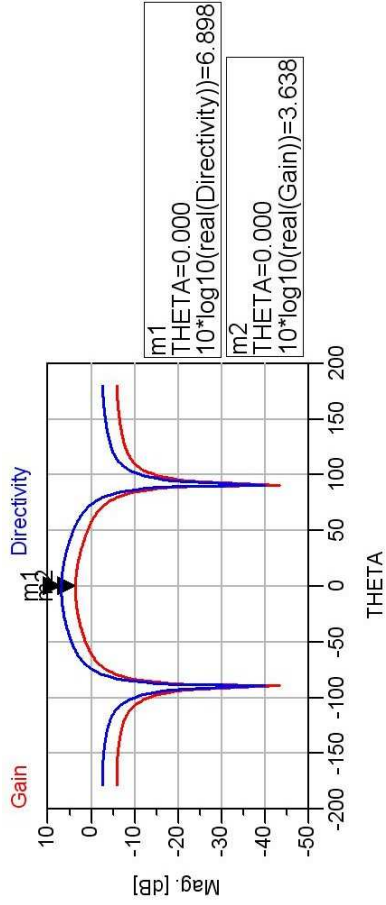
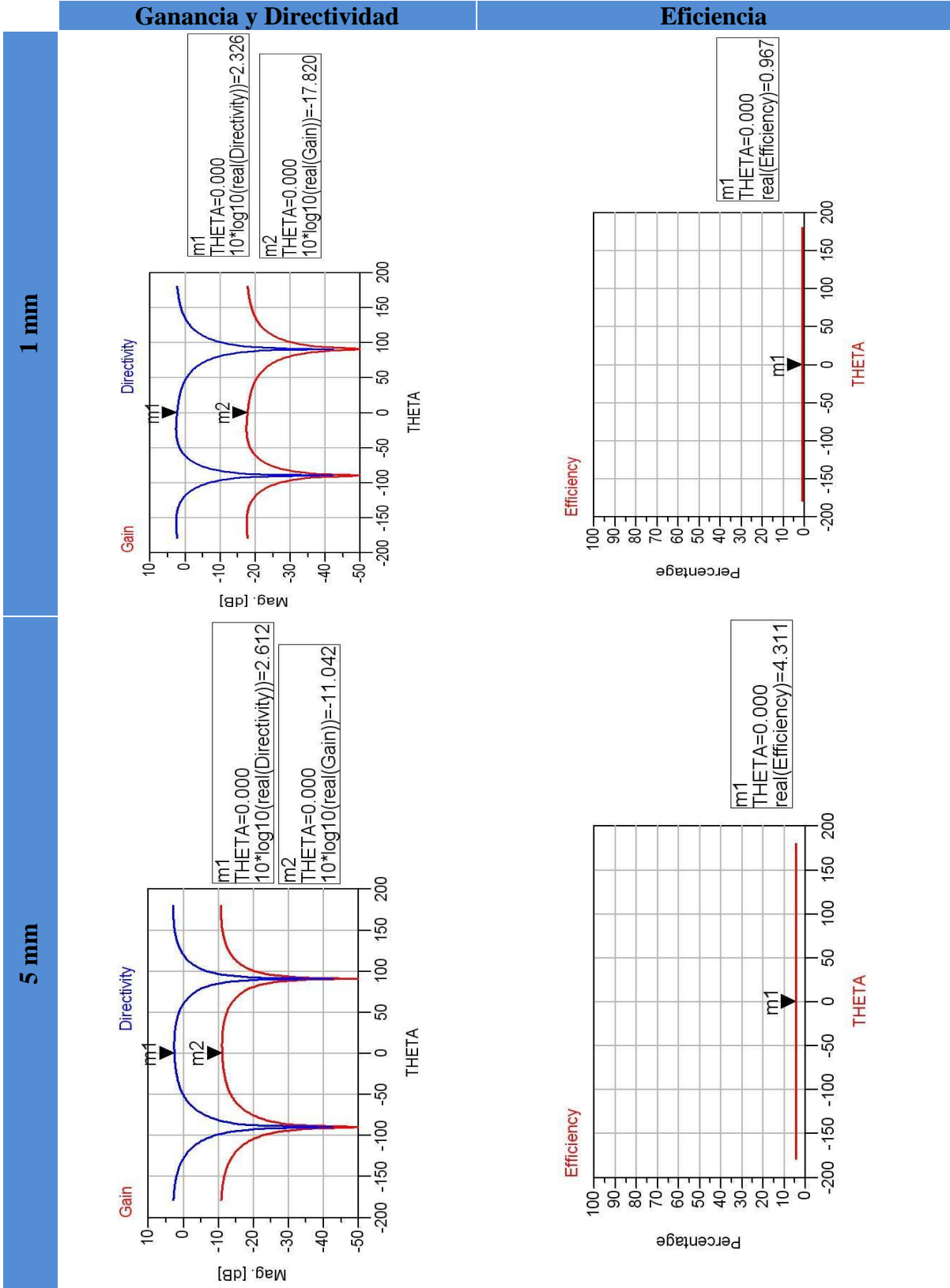
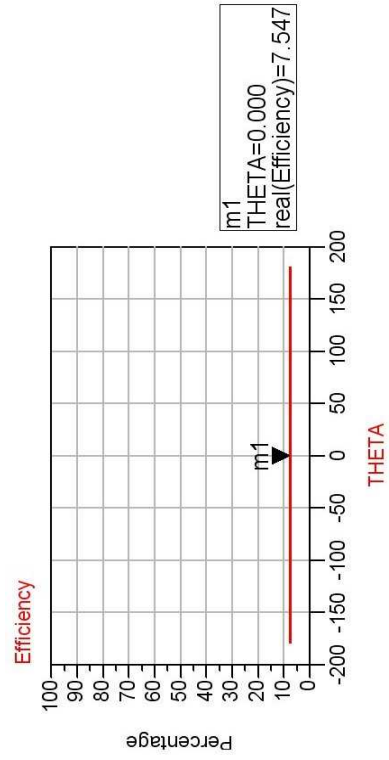
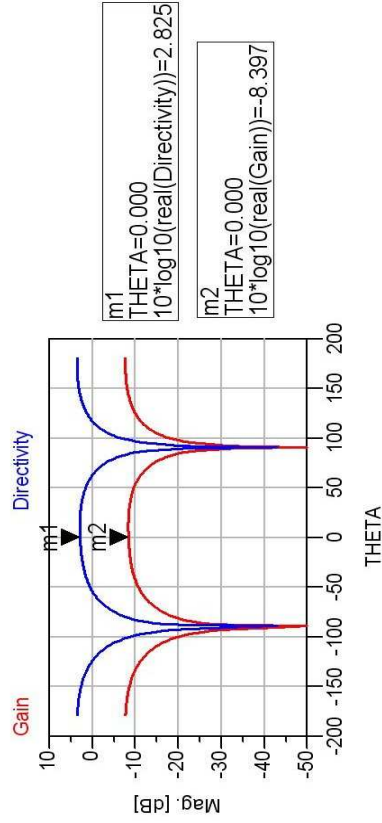


Tabla C.5. Propiedades del tag a 867 MHz sobre diferentes grosores de cristal y 10 mm de agua

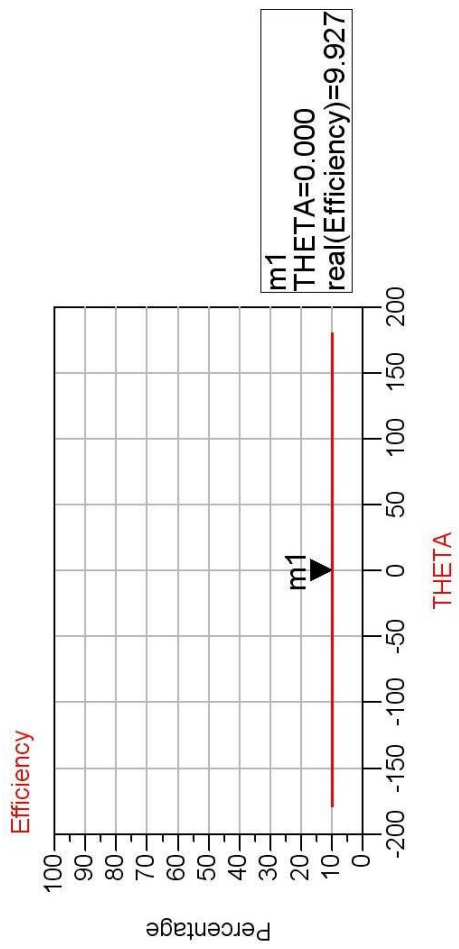
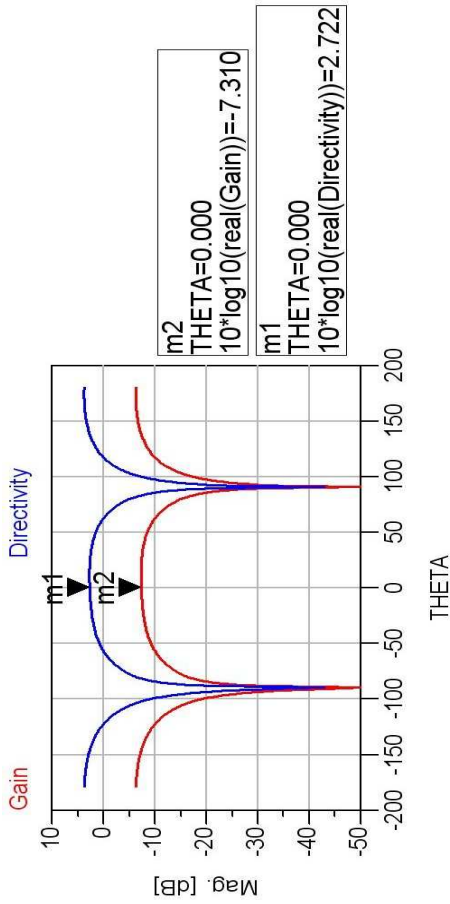
Propiedades del tag a 867 MHz sobre 20 mm de Agua



10 mm



15 mm



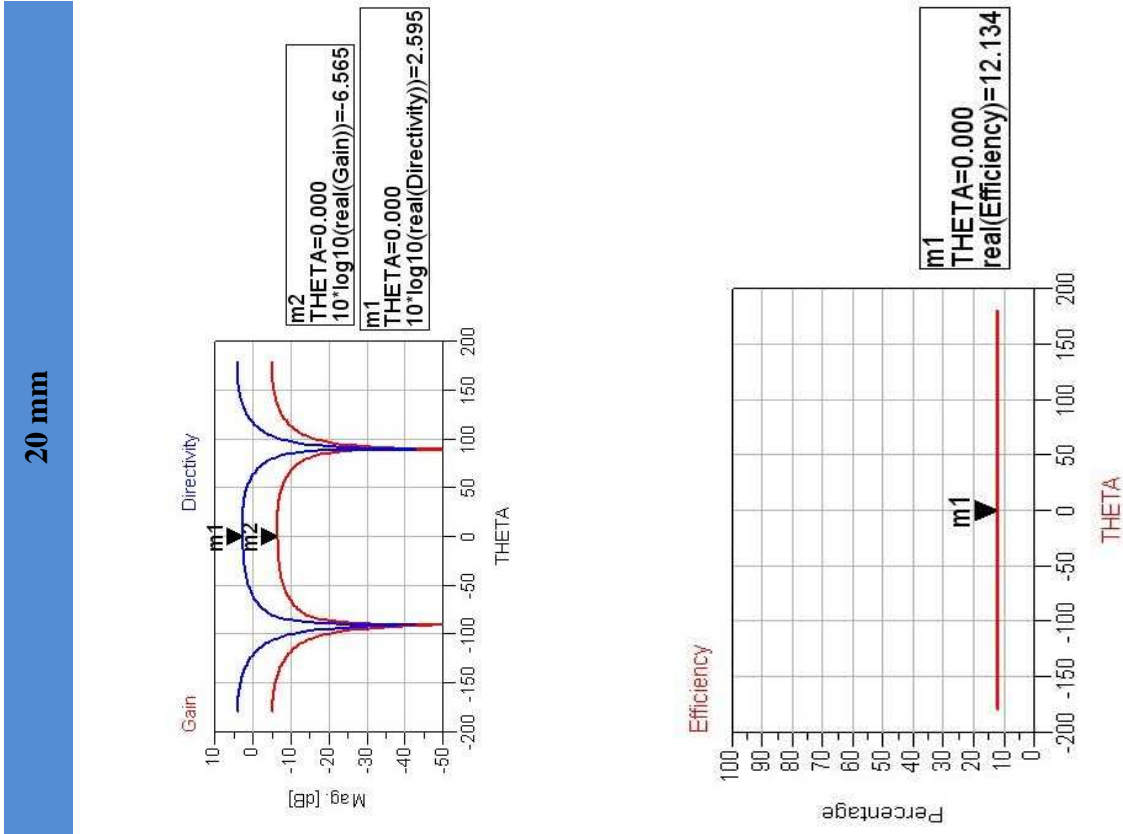
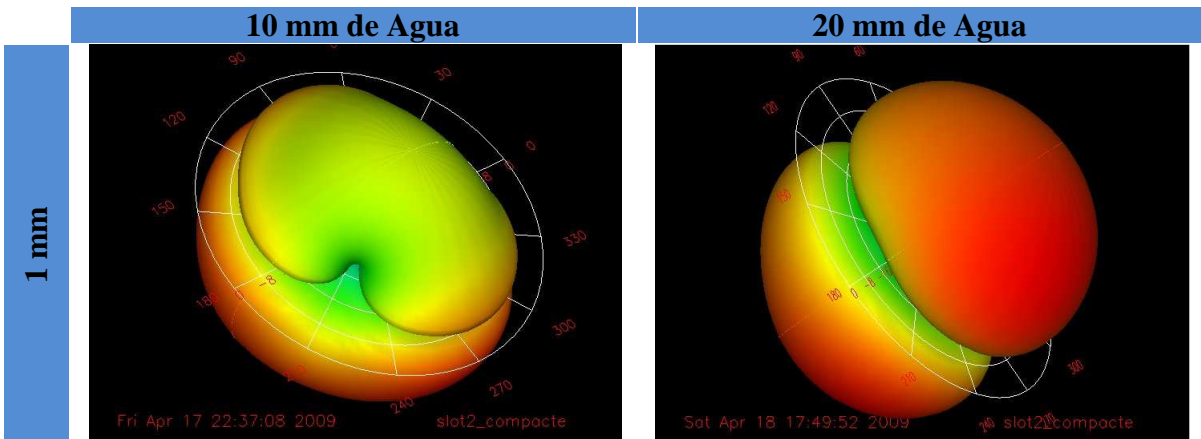


Tabla C.6. Propiedades del tag a 867 MHz sobre diferentes grosores de cristal y 10 mm de agua

C.1.- Representación de Radiación

Diagramas de radiación 3D



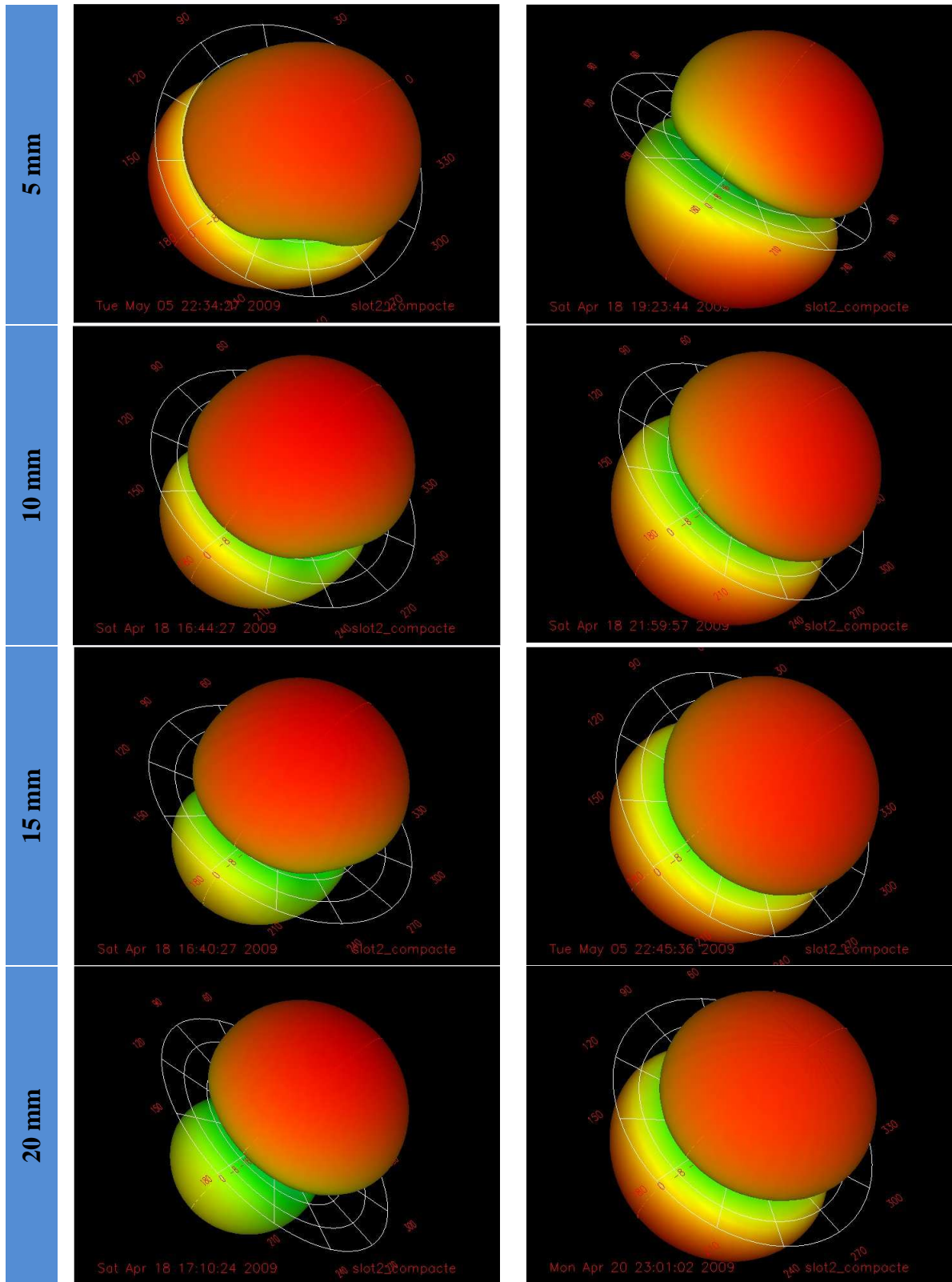


Tabla C.1.1. Diagramas de radiación 3D a 867 MHz sobre diferentes grosores de cristal y 10 y 20 mm de agua

D.- Simulación de Tag con Spacer y Masa

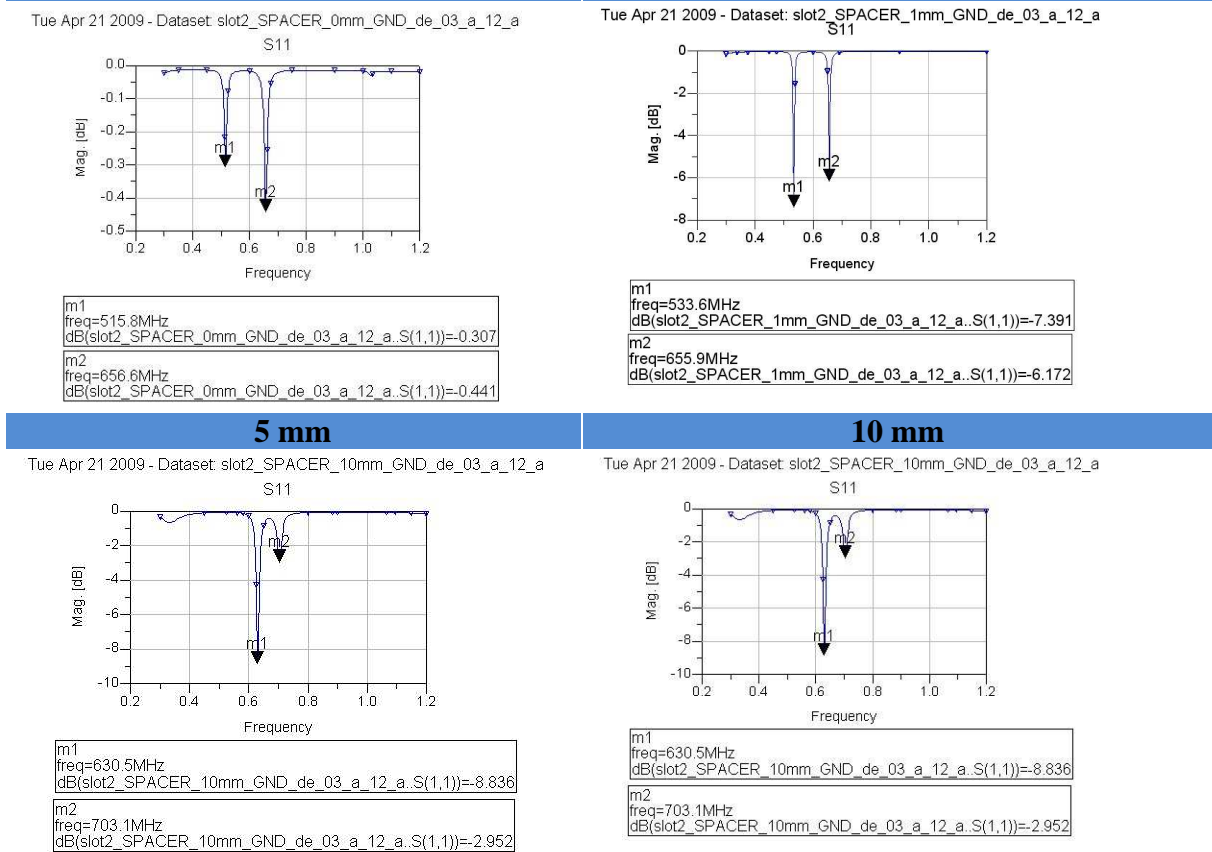
A continuación se presentan los datos obtenidos y las gráficas de cada una de las simulaciones con Momentum obtenidas al añadir diferentes grosores de un separador de plástico (*spacer*) sobre un plano de masa.

METAL (GND) & SPACER Er 2.6 tgδ 0.0061

867 MHz							
SPACE R	dBs	Gain disp	Gain pot	Directividad	Eficiencia %	Impedance	freq reso MHz
0 mm	-0,012	-25,304	-50,7676	7,105	0,057	Z0*(0,005+j2,455)	515,800
1 mm	-0,017	-7,449	-31,8373	6,914	3,662	Z0*(0,007+j2,584)	533,600
5 mm	-0,037	1,216	-19,3925	7,066	26,000	Z0*(0,016+j2,516)	603,200
10 mm	-0,064	3,743	-14,6109	7,245	44,649	Z0*(0,026+j2.463)	630,500
15 mm	-0,102	4,804	-11,5637	7,414	54,826	Z0*(0,041+j2,454)	642,300
20 mm	-0,156	5,343	-9,1500	7,574	59,831	Z0*(0,064+j2,464)	645,800

Tabla D.1. Tabla de datos obtenidos del tag tras las simulaciones de varios grosores de plástico sobre masa

Gráfica de Propiedades a 0,3 – 1,2 GHz



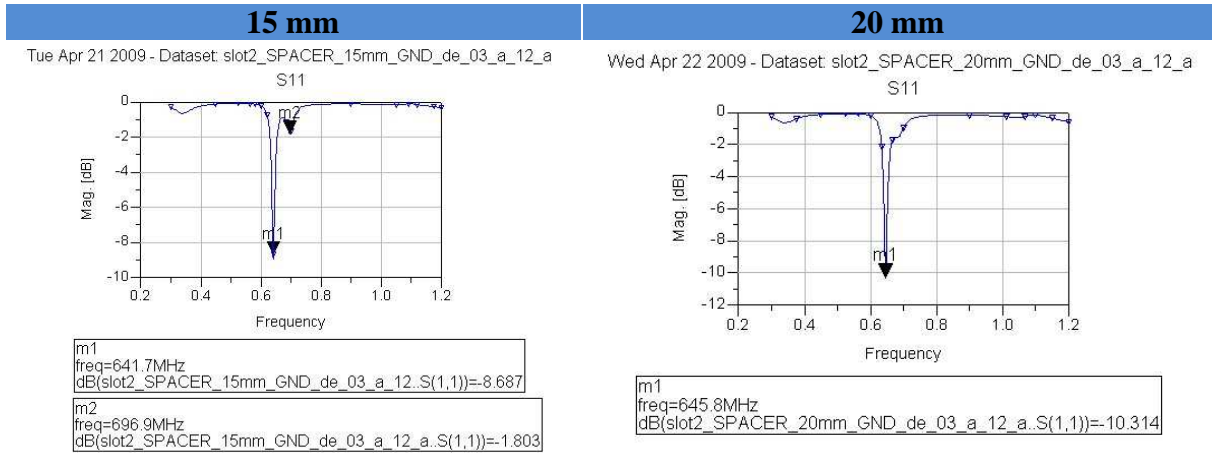
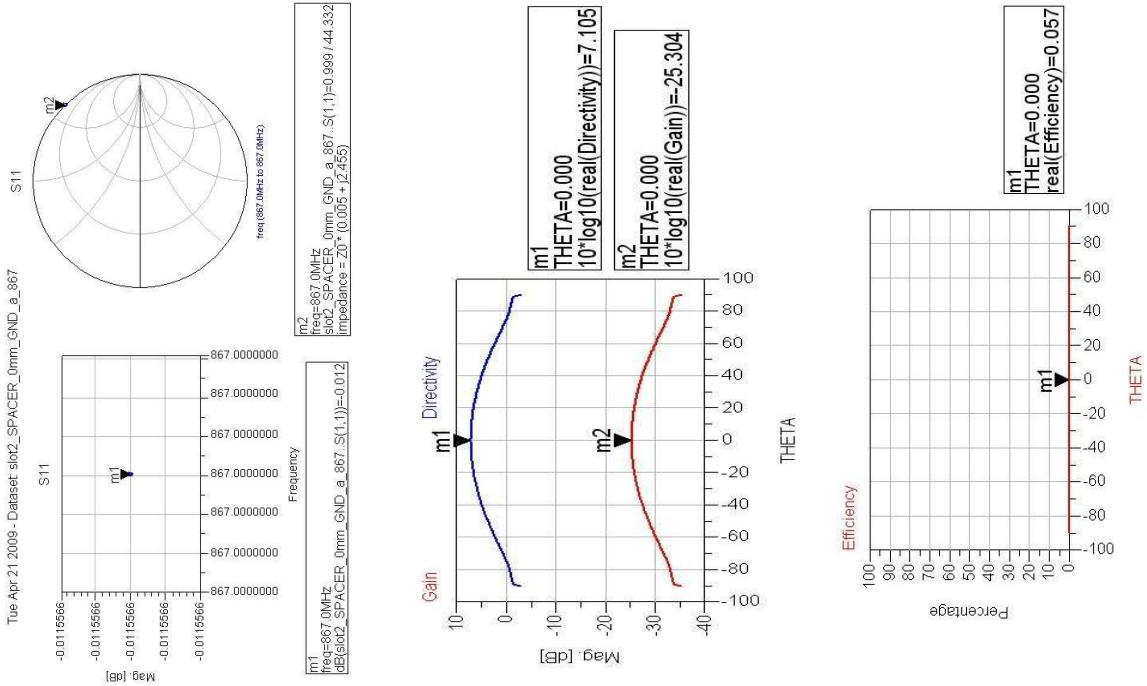


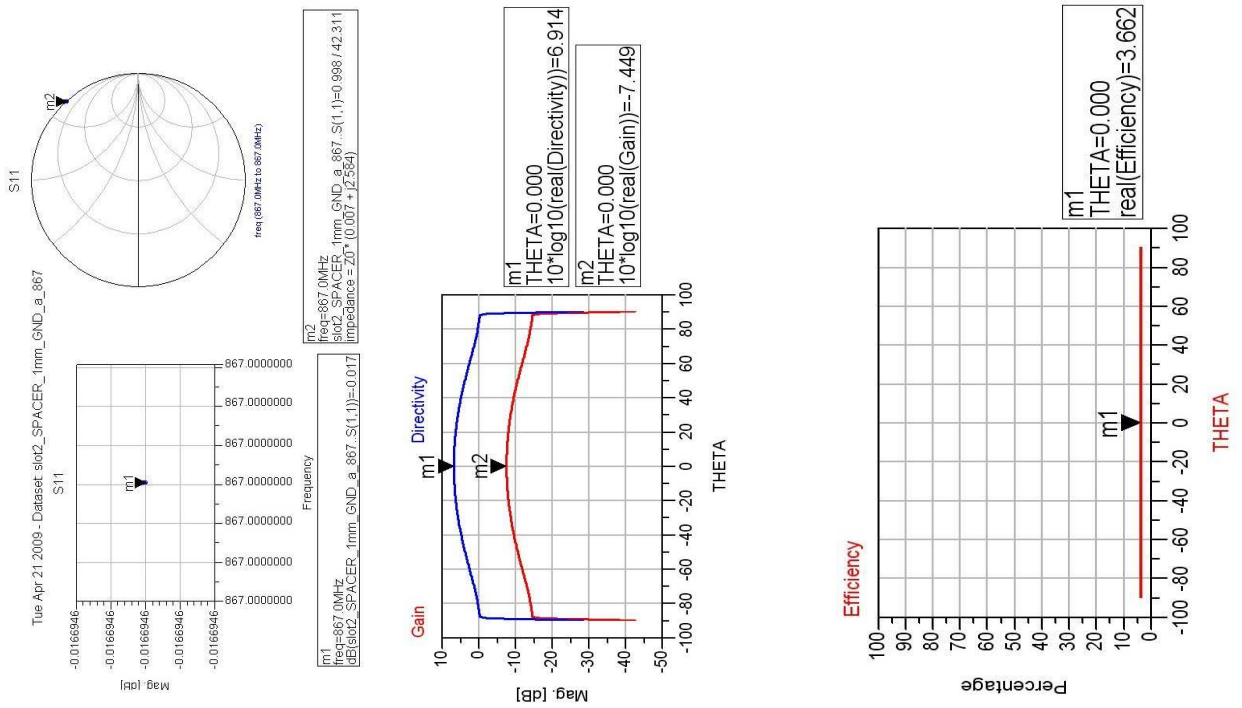
Tabla D.2. Comportamiento general del tag en amplio margen de frecuencias con diferentes distancias de spacer

Propiedades del tag a 867 MHz

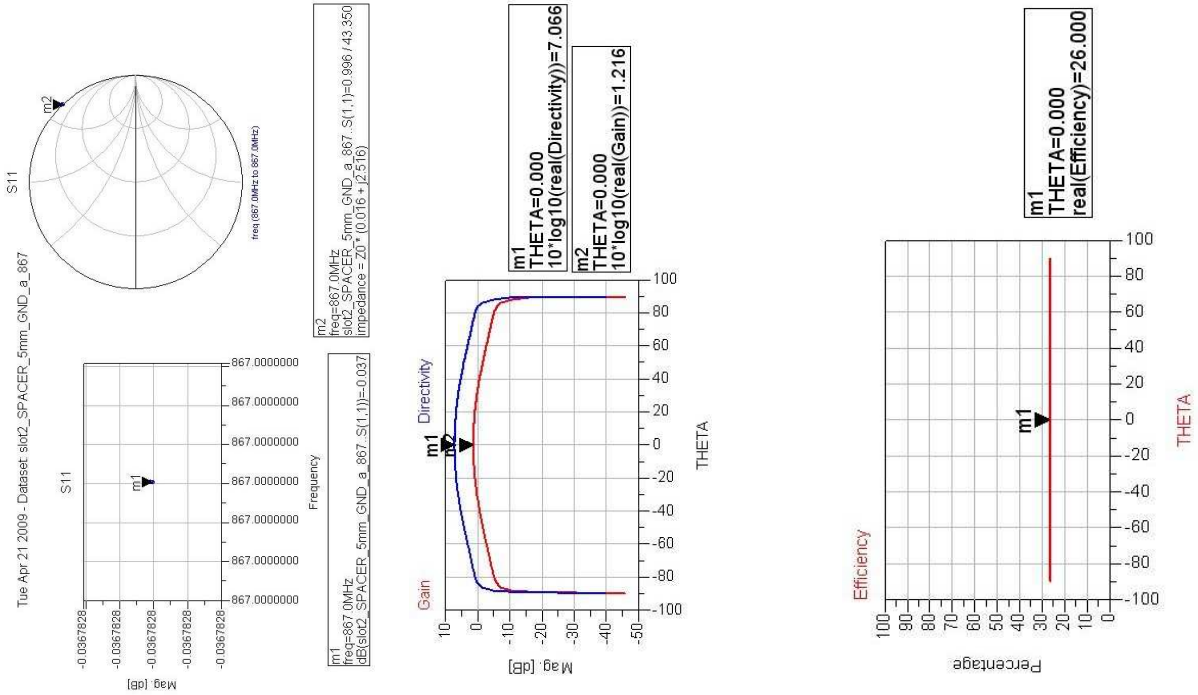
0 mm



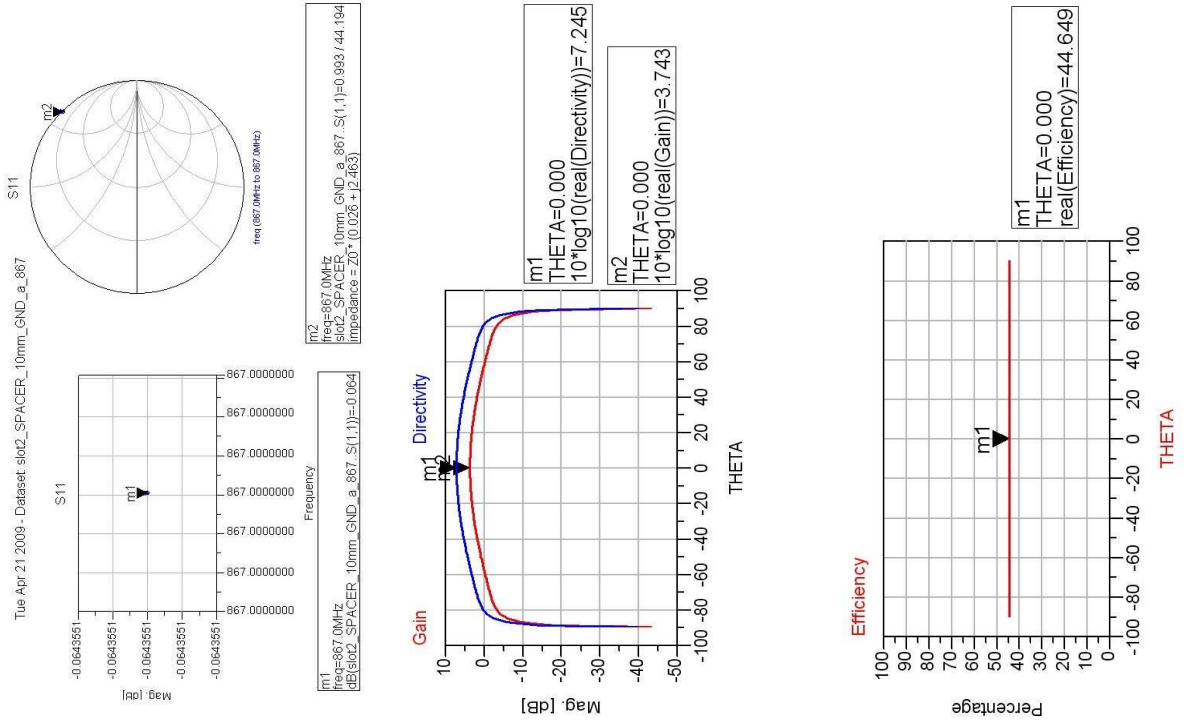
1 mm



5 mm



10 mm



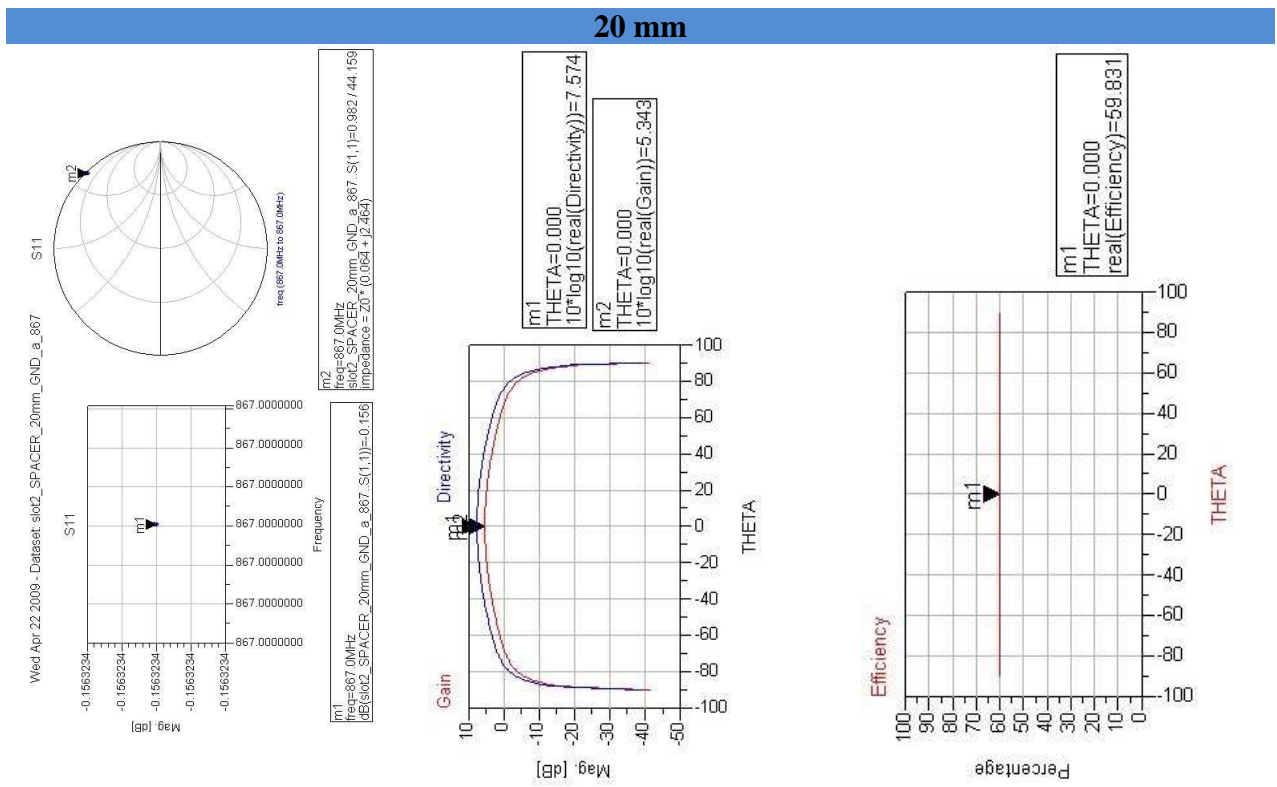
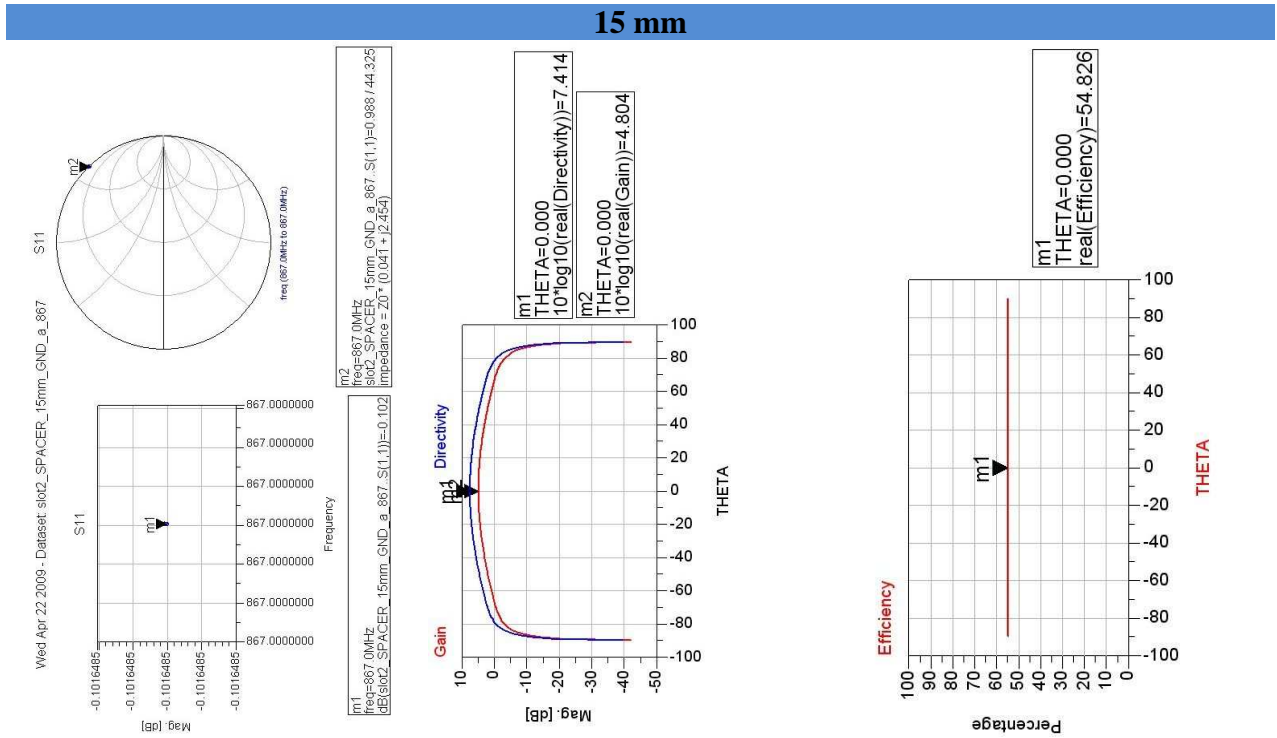


Tabla D.3. Comportamiento del tag a 867 MHz con diferentes grosores de spacer

D.1.- Representación de Radiación

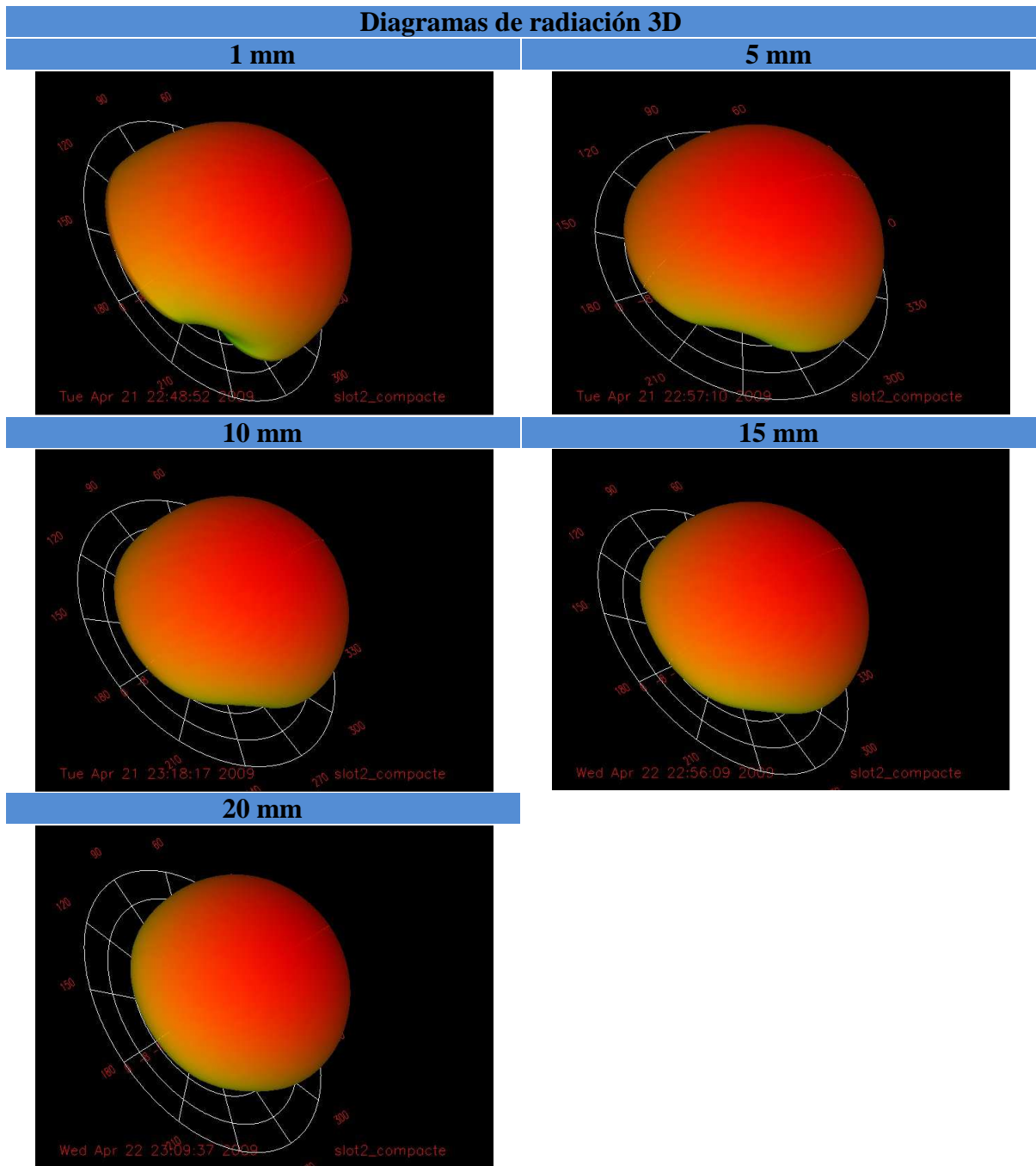


Tabla D.1.1. Diagramas de radiación 3D a 867 MHz sobre diferentes grosores de aislante entre tag y plano de masa

E.- Representación del Tag con Diferentes Permitividades Relativas

A continuación se presentan los datos obtenidos y las gráficas de cada una de las simulaciones con *Momentum* obtenidas al añadir diferentes grosores de diferentes materiales con diferentes permitividades relativas.

	1					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	865,600	-12,888	2,509	3,050	88,275	$Z_0^*(1,049-j0,474)$
5 mm	865,600	-13,060	2,447	3,054	86,958	$Z_0^*(1,062-j0,466)$
10 mm	865,600	-13,103	2,424	3,058	86,423	$Z_0^*(1,067-j0,464)$

Tabla E.1. Tabla de resultados con Er de 1

	1,7					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	815,600	-2,105	2,319	2,812	89,280	$Z_0^*(0,275+j1,111)$
5 mm	778,100	-1,039	2,133	2,809	85,583	$Z_0^*(0,202+j1,535)$
10 mm	766,700	-0,903	1,943	2,864	80,884	$Z_0^*(0,196+j1,657)$

Tabla E.2. Tabla de resultados con Er de 1,7

	2					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	799,200	-1,356	2,251	2,757	88,998	$Z_0^*(0,218+j1,330)$
5 mm	752,100	-0,686	2,002	2,790	83,395	$Z_0^*(0,162+j1,760)$
10 mm	735,400	-0,624	1,739	2,886	76,784	$Z_0^*(0,163+j1,878)$

Tabla E.3. Tabla de resultados con Er de 2

	3					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	753,100	-0,606	2,060	2,655	87,185	$Z_0^*(0,140+j1,732)$
5 mm	679,700	-0,315	1,499	2,769	74,637	$Z_0^*(0,106+j2,200)$
10 mm	651,600	-0,308	0,905	2,934	62,663	$Z_0^*(0,113+j2,315)$

Tabla E.4. Tabla de resultados con Er de 3

	3,8					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-12,515	2,589	3,050	89,935	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	734,900	-0,431	1,938	2,618	85,490	$Z_0^*(0,112+j1,965)$
5 mm	634,600	-0,238	1,113	2,785	68,047	$Z_0^*(0,091+j2,415)$
10 mm	621,300	-0,238	0,148	2,939	52,584	$Z_0^*(0,099+j2,534)$

Tabla E.5. Tabla de resultados con Er de 3,8

	4					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	718,800	-0,403	1,909	2,612	85,046	$Z_0^*(0,111+j1,944)$
5 mm	632,200	-0,225	1,006	2,784	66,405	$Z_0^*(0,089+j2,417)$
10 mm	603,500	-0,226	-0,080	2,923	50,089	$Z_0^*(0,097+j2,539)$

Tabla E.6. Tabla de resultados con Er de 4

	5					
	f reso	867	Gain-867	Dir-867	Ef-867	Imp
0 mm	869,800	-13,653	2,613	3,012	91,230	$Z_0^*(0,677+j0,134)$
1 mm	691,400	-0,282	1,678	2,535	82,100	$Z_0^*(0,090+j2,124)$
5 mm	593,000	-0,179	0,357	2,726	57,960	$Z_0^*(0,078+j2,573)$
10 mm	563,500	-0,177	-1,843	2,549	36,375	$Z_0^*(0,085+j2,721)$

Tabla E.7. Tabla de resultados con Er de 5

Comportamiento del tag sin ningún material

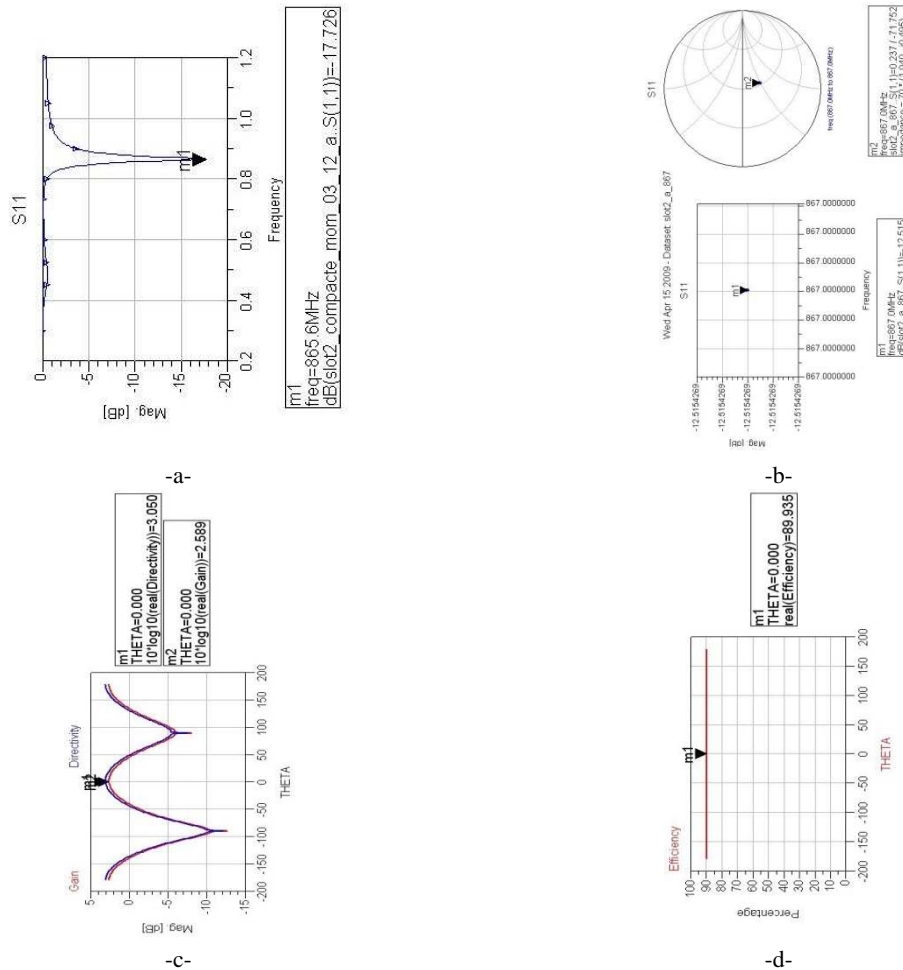


Tabla E.8. Comportamiento del tag sin material; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 1

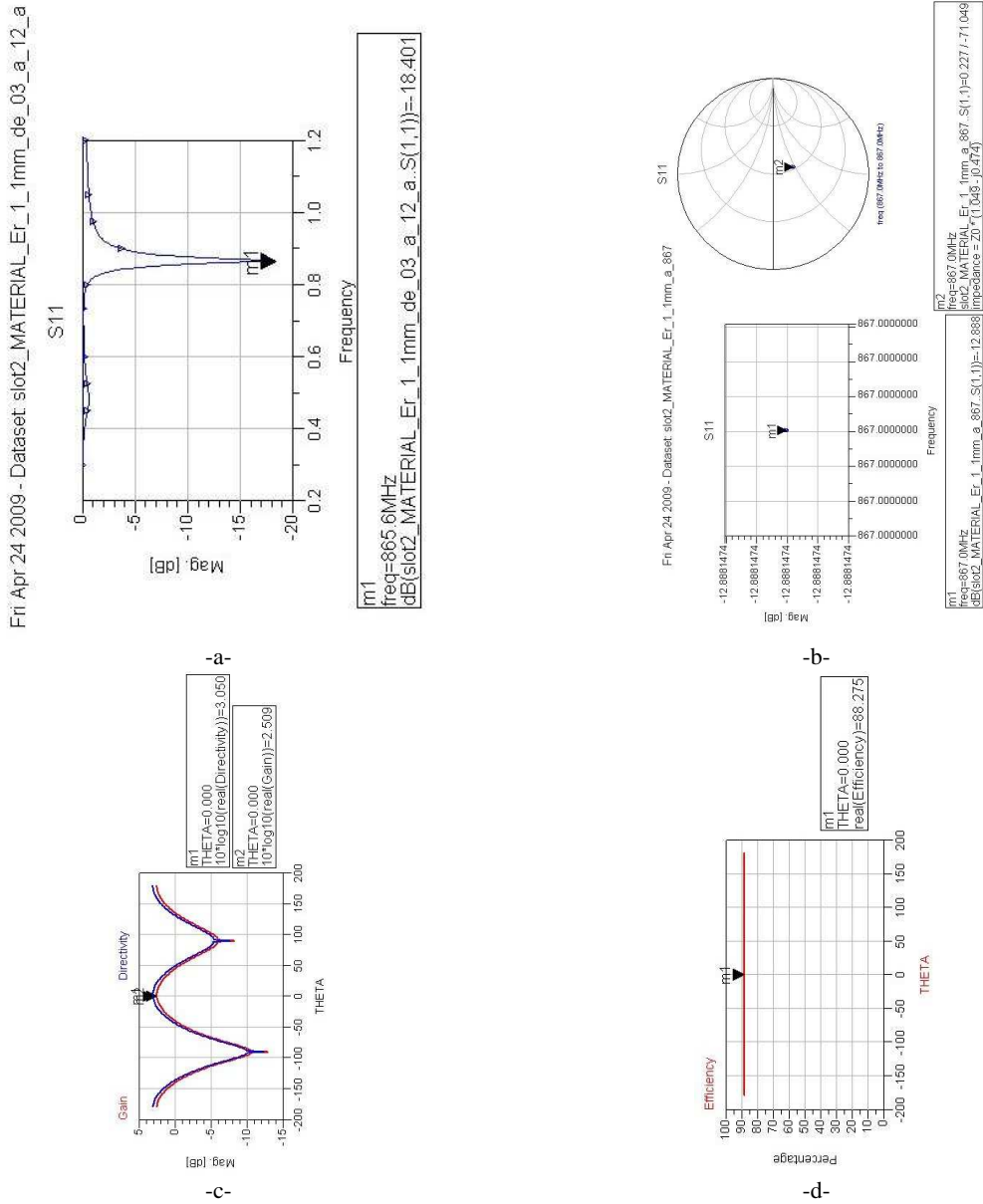


Tabla E.9. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 1; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 1,7

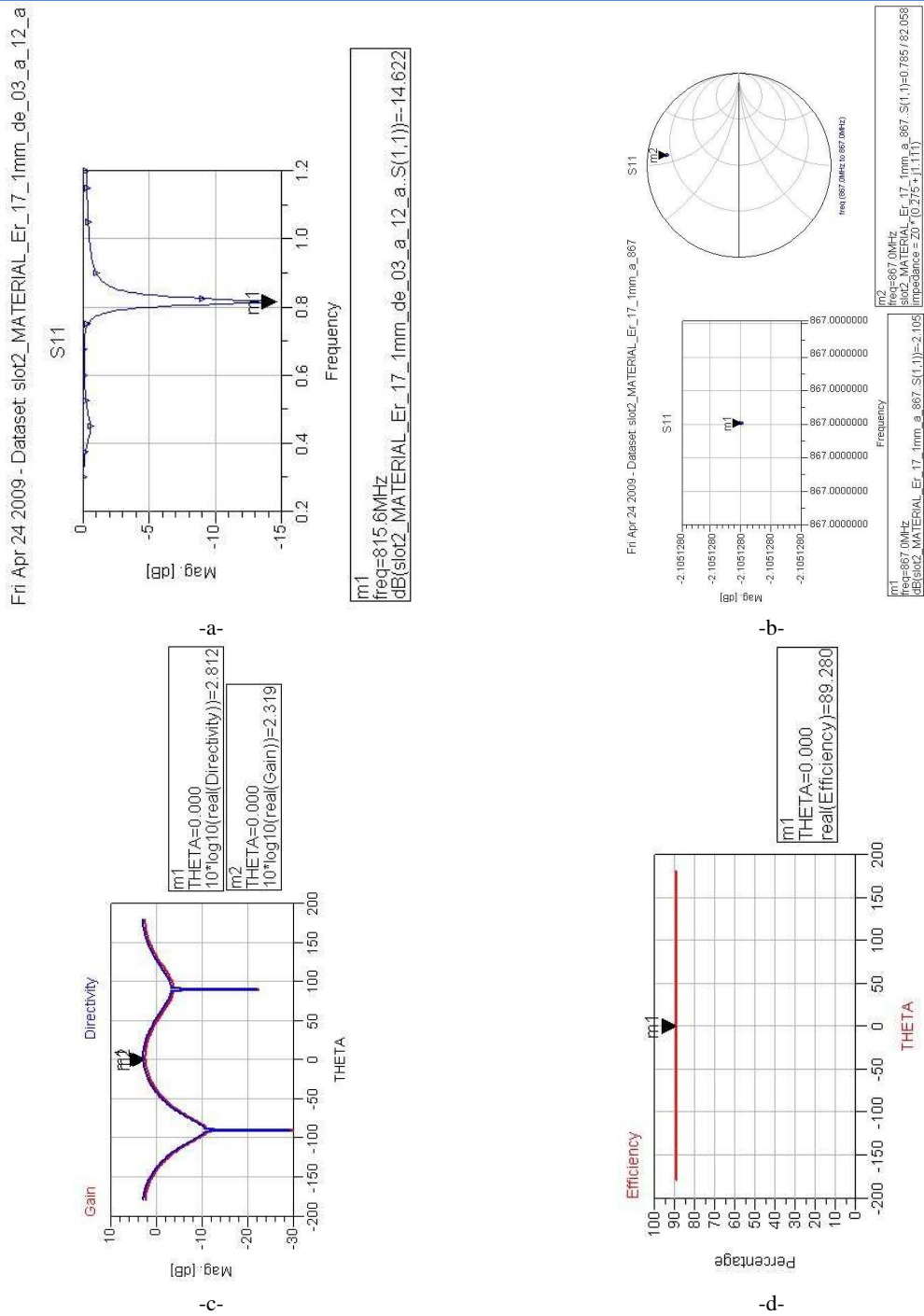


Tabla E.10. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 1,7; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 2

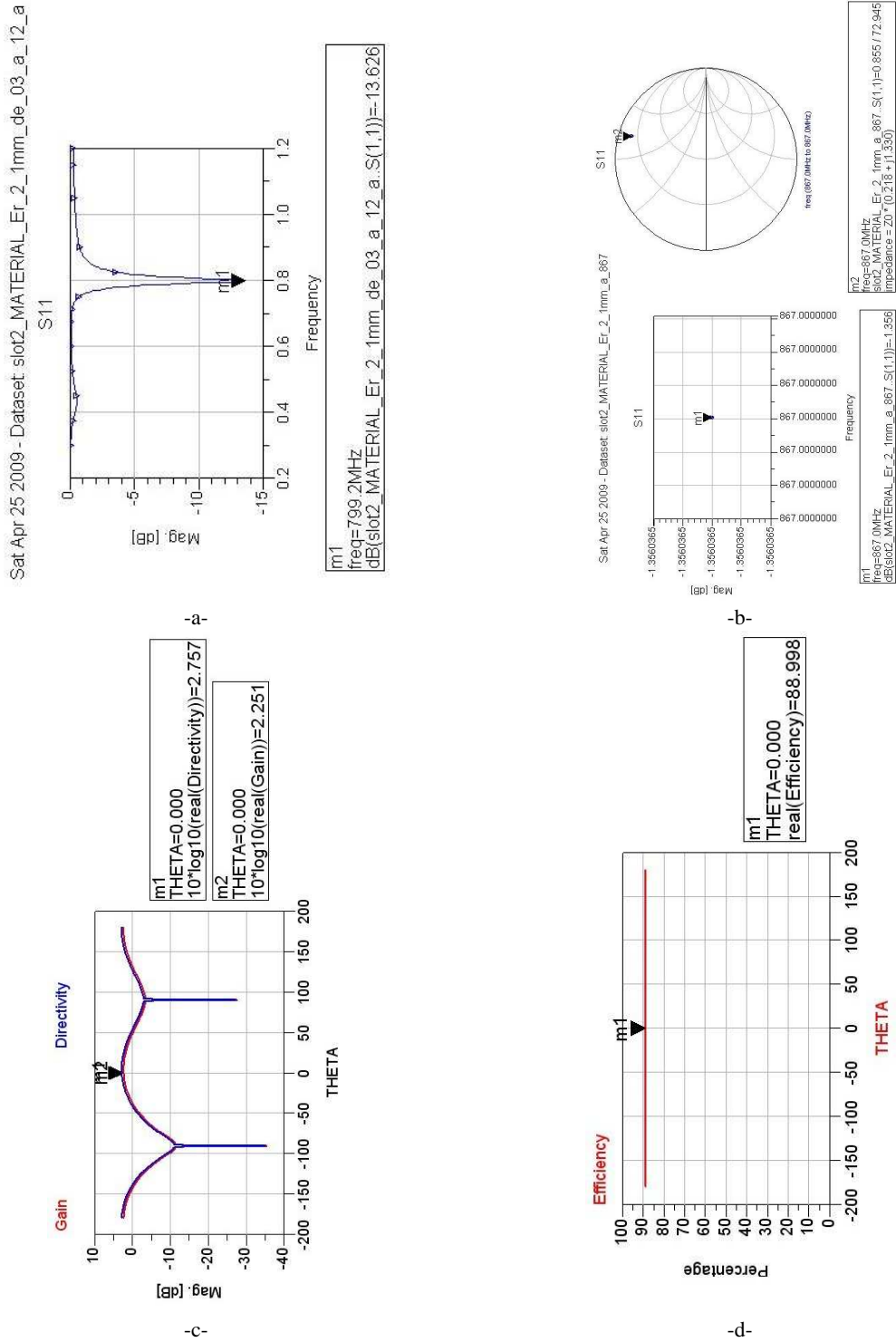


Tabla E.11. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 2; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 3

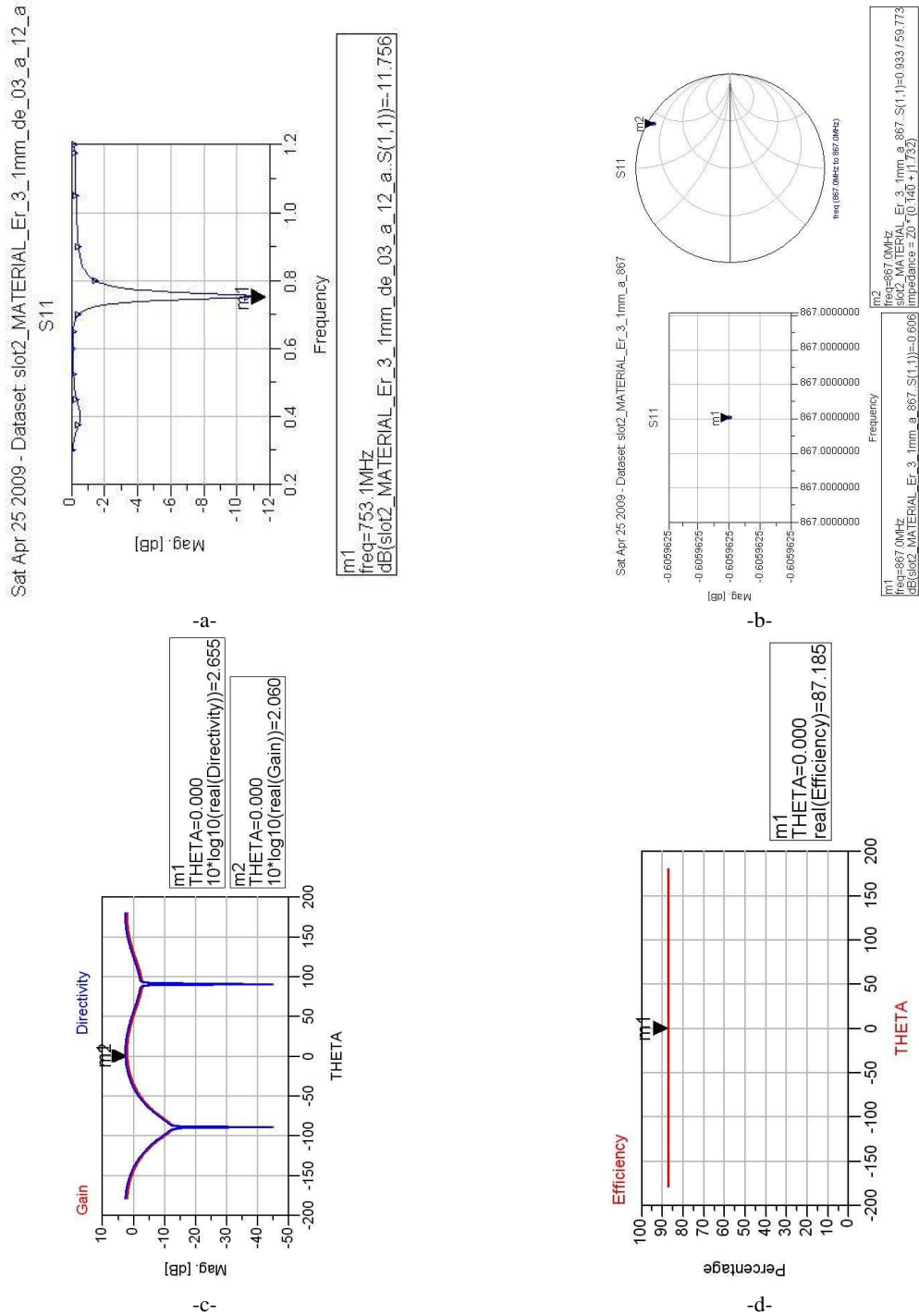


Tabla E.12. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 3; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 3,8

Wed Apr 15 2009 - Dataset slot2_CRISTAL_grosor_1mm_er_38_de_03_a_12_a

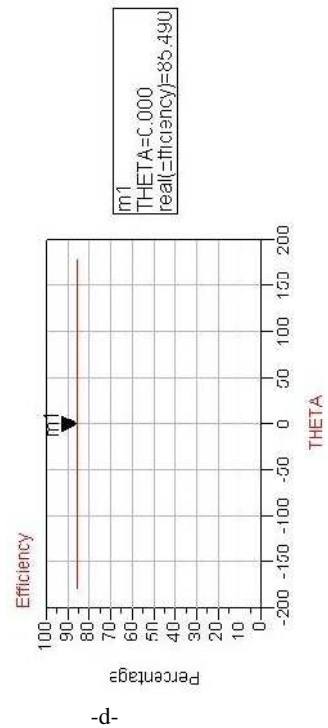
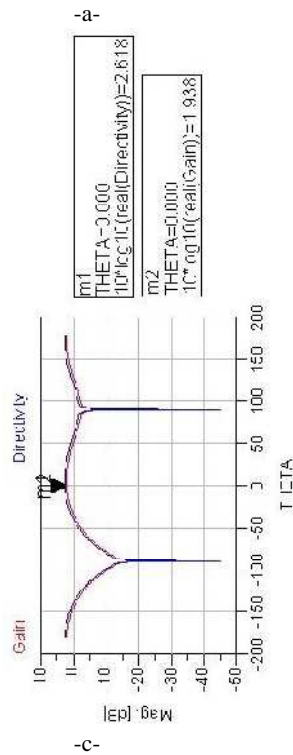
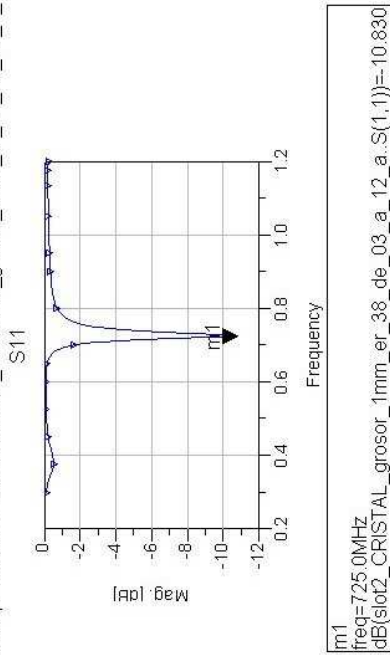


Tabla E.13. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 3,8; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 1 mm de material de ϵ_r 5

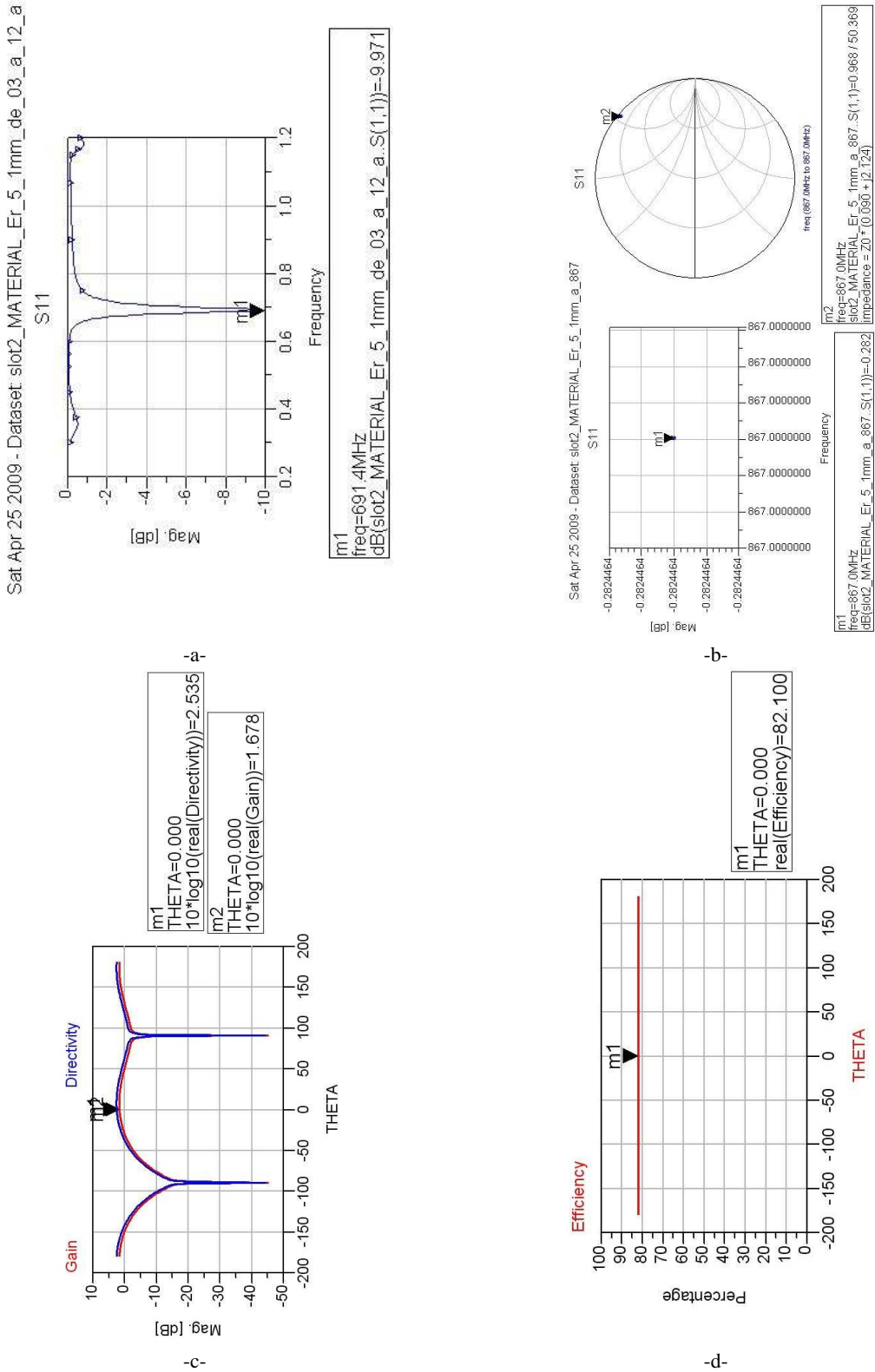


Tabla E.15. Comportamiento del tag con 1 mm de material de Er 5; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 5 mm de material de ϵ_r 1

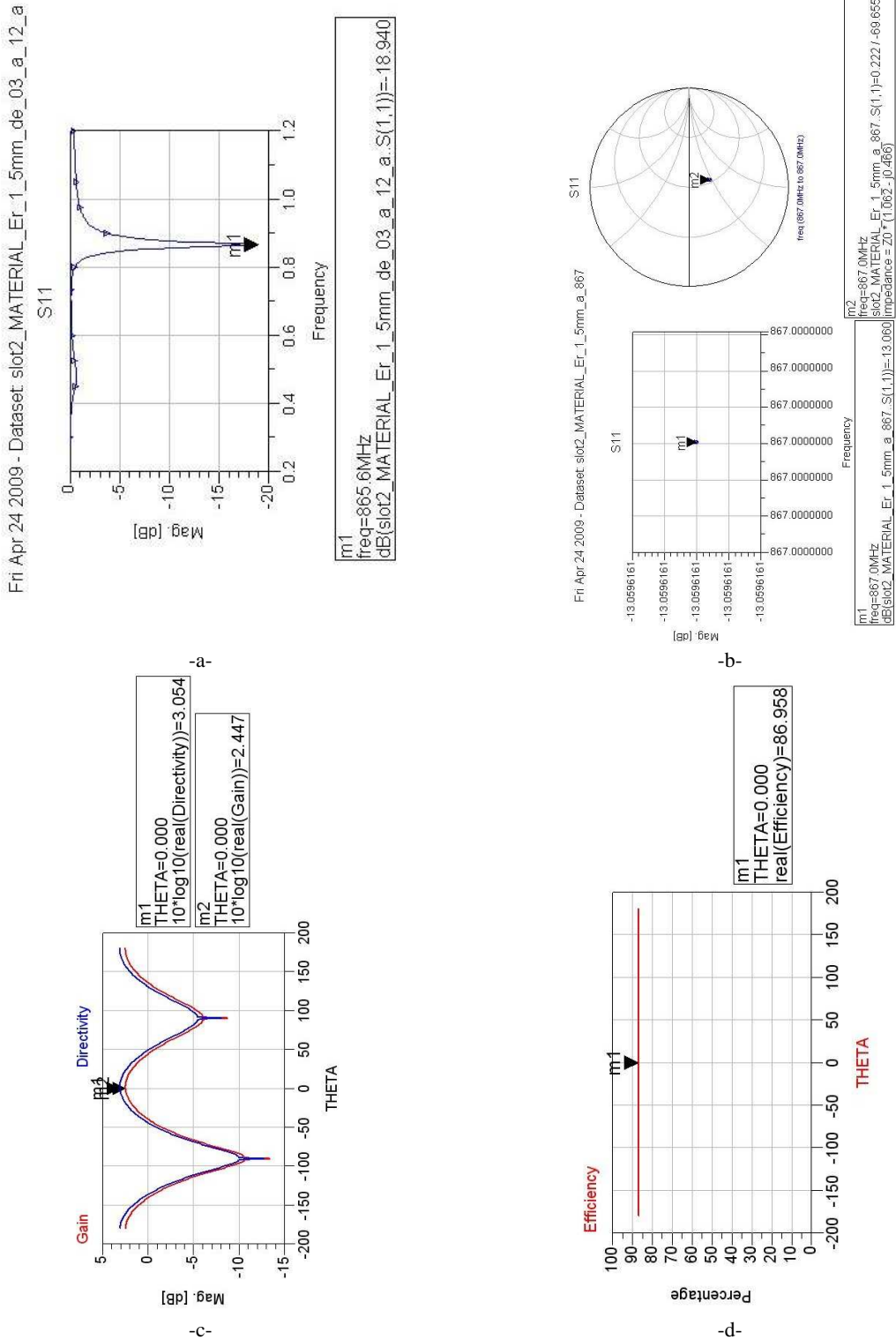


Tabla E.16. Comportamiento del tag con 5 mm de material de Er 1; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 5 mm de material de ϵ_r 1,7

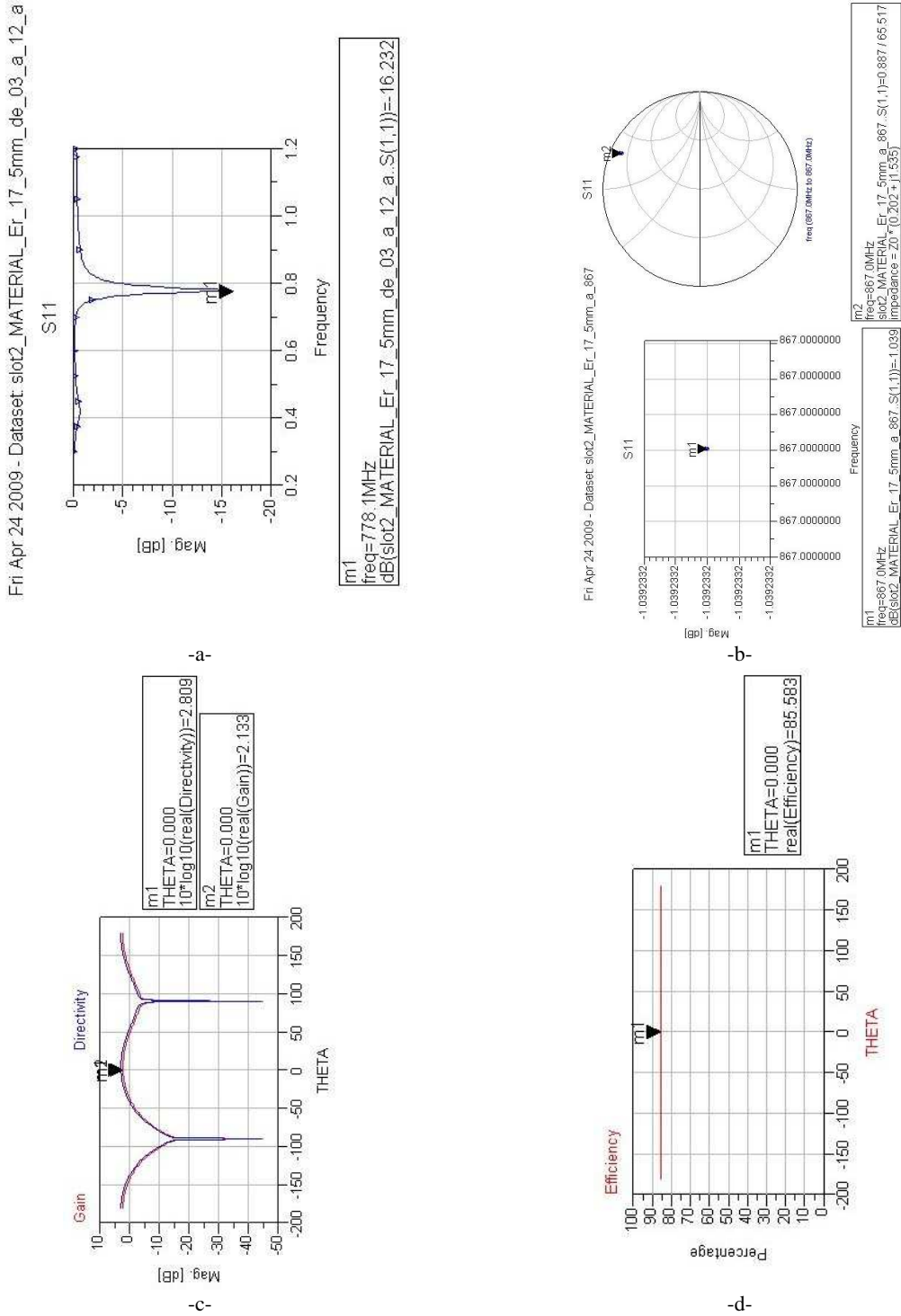


Tabla E.17. Comportamiento del tag con 5 mm de material de Er 1,7; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 5 mm de material de ϵ_r 3,8

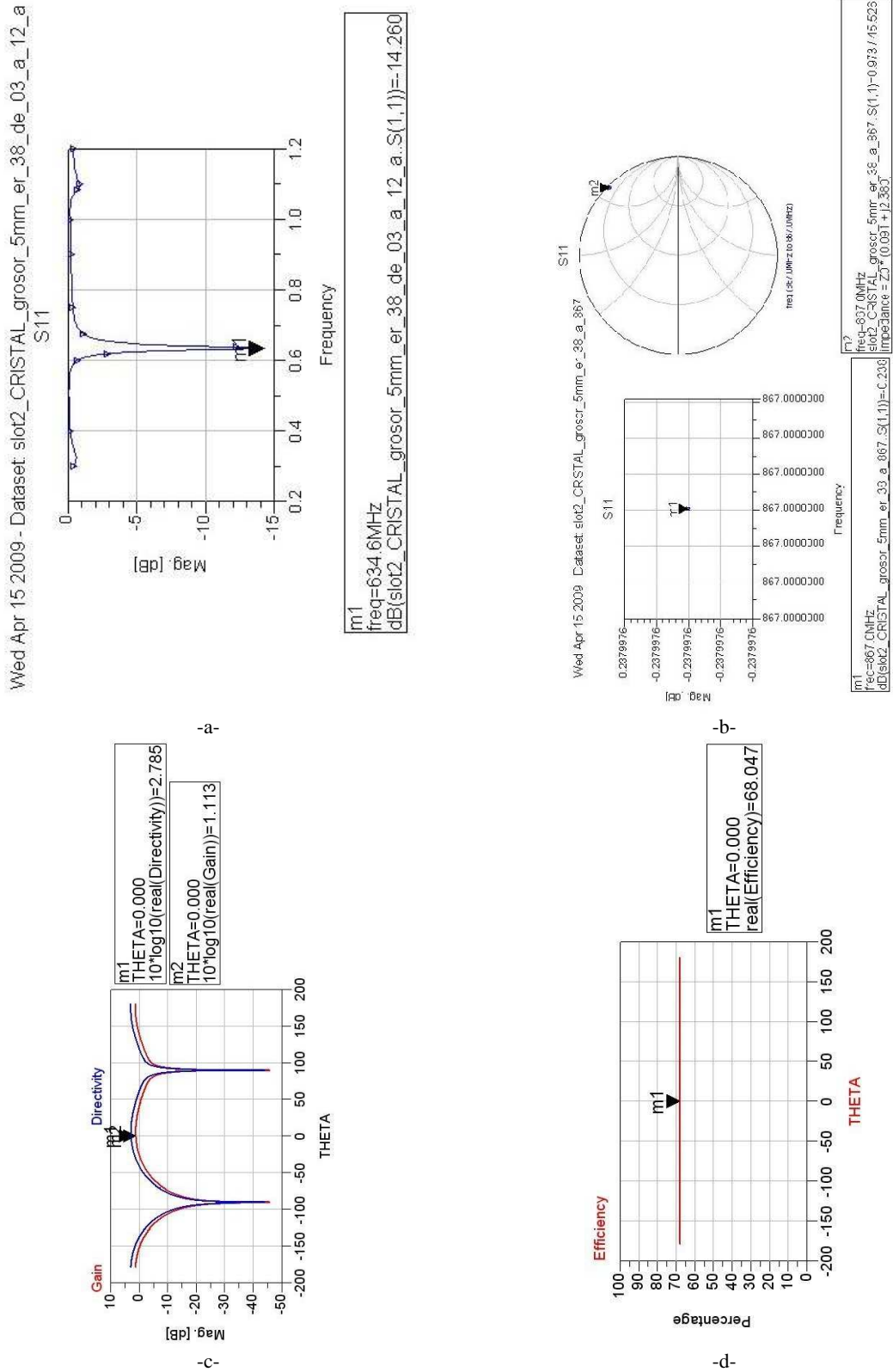


Tabla E.20. Comportamiento del tag con 5 mm de material de Er 3,8; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 5 mm de material de ϵ_r 4

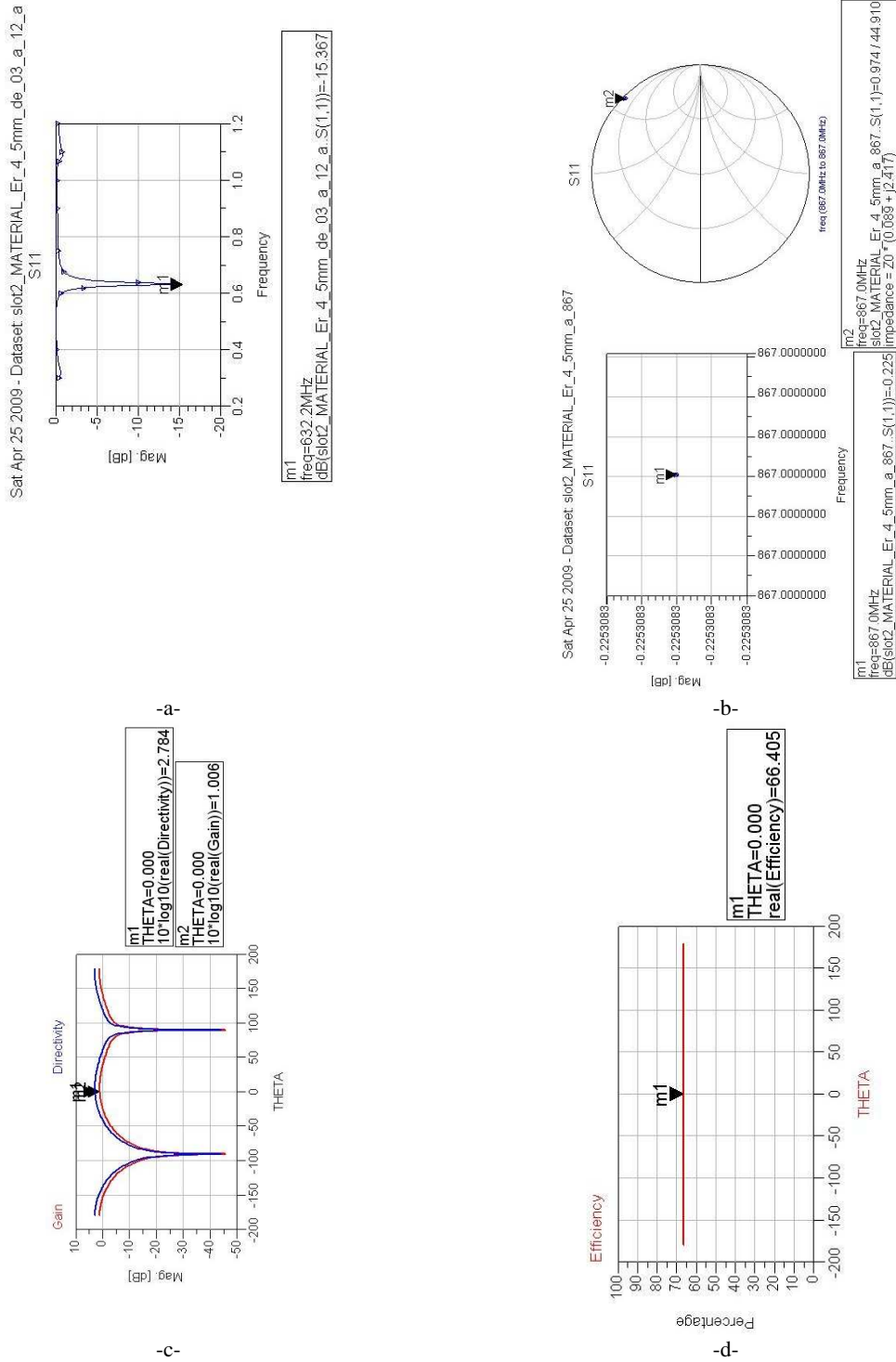


Tabla E.21. Comportamiento del tag con 5 mm de material de Er 4; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 1

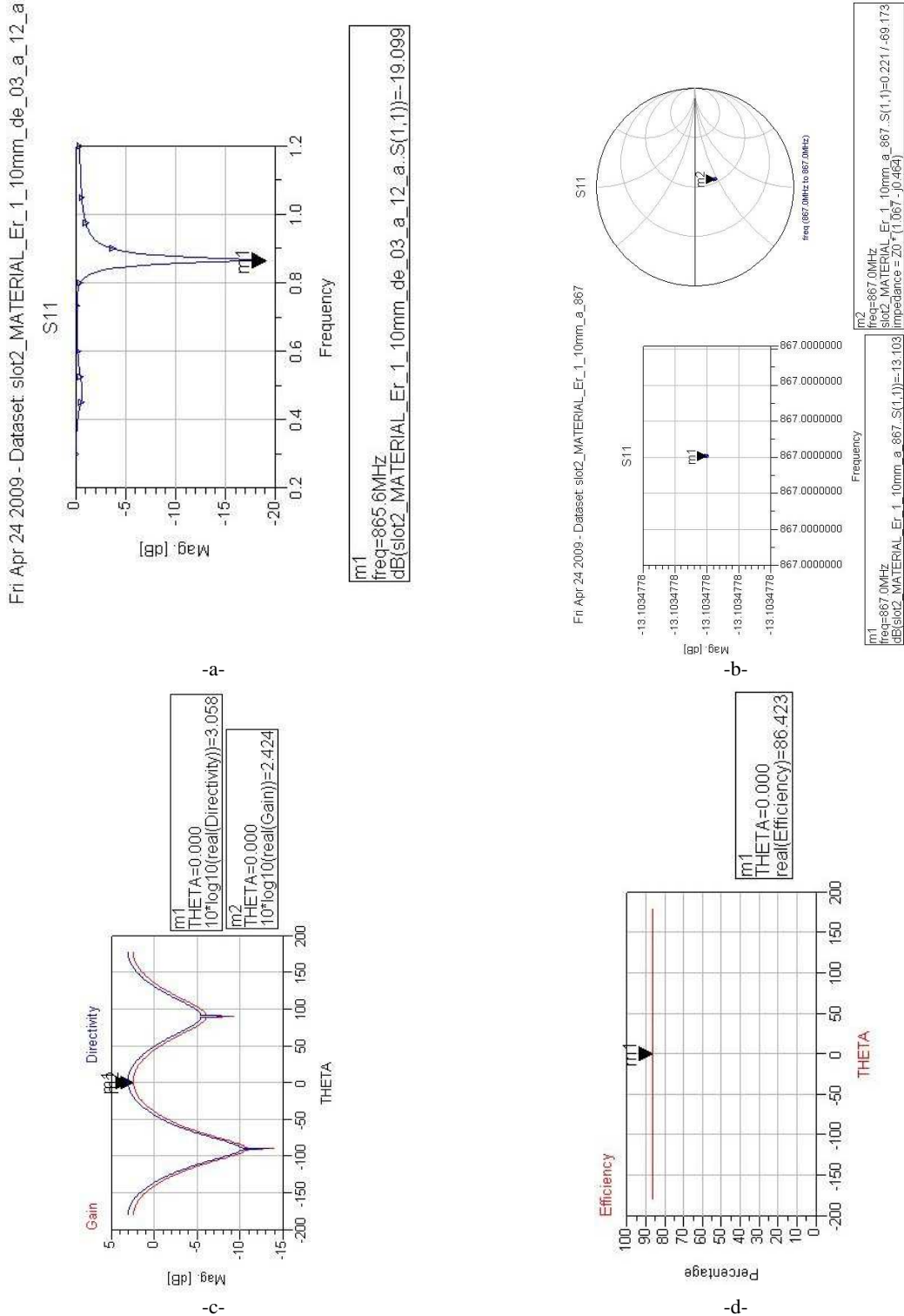


Tabla E.23. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 1; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 1,7

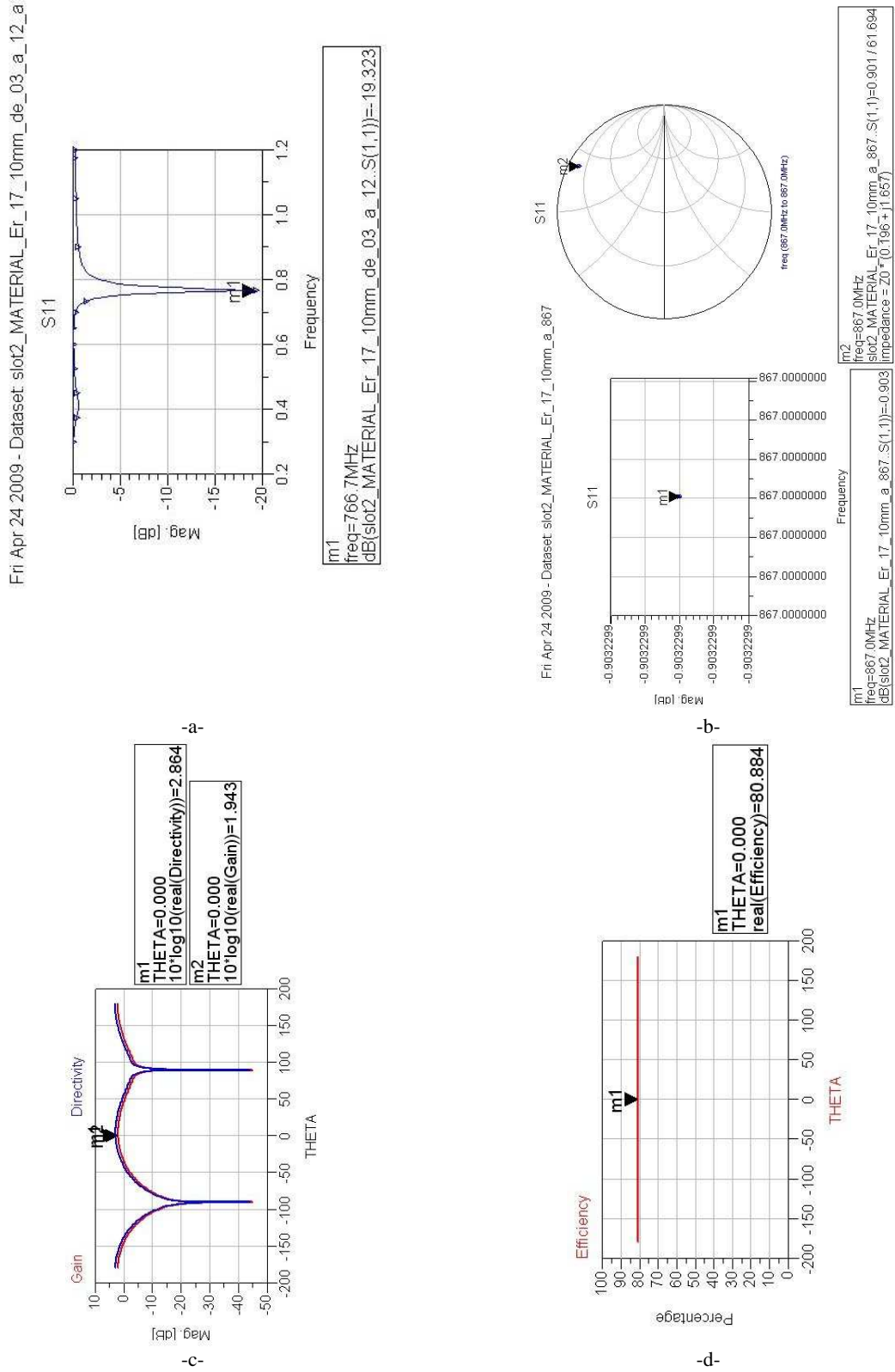


Tabla E.24. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 1,7; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 2

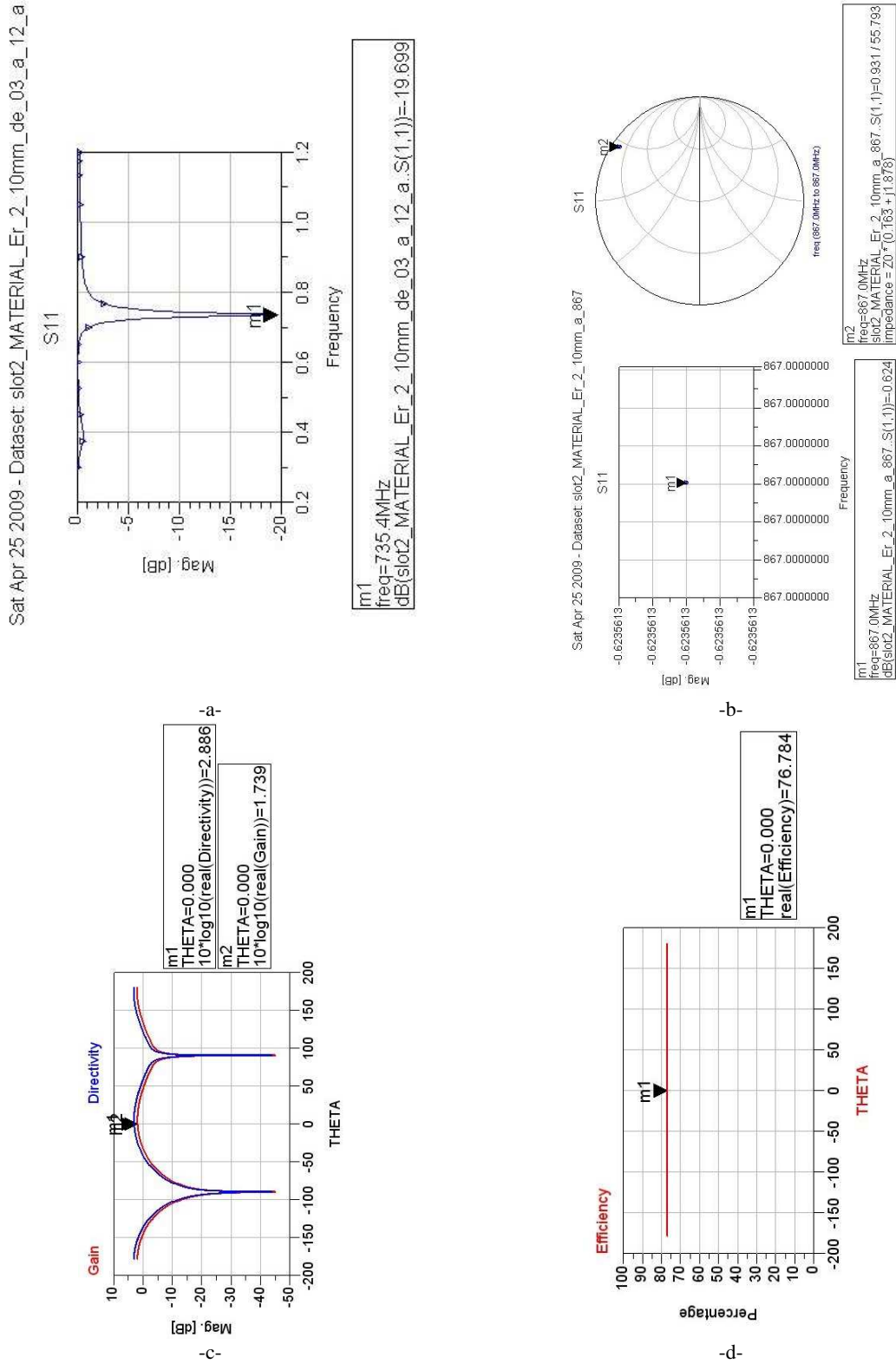


Tabla E.25. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 2; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 3

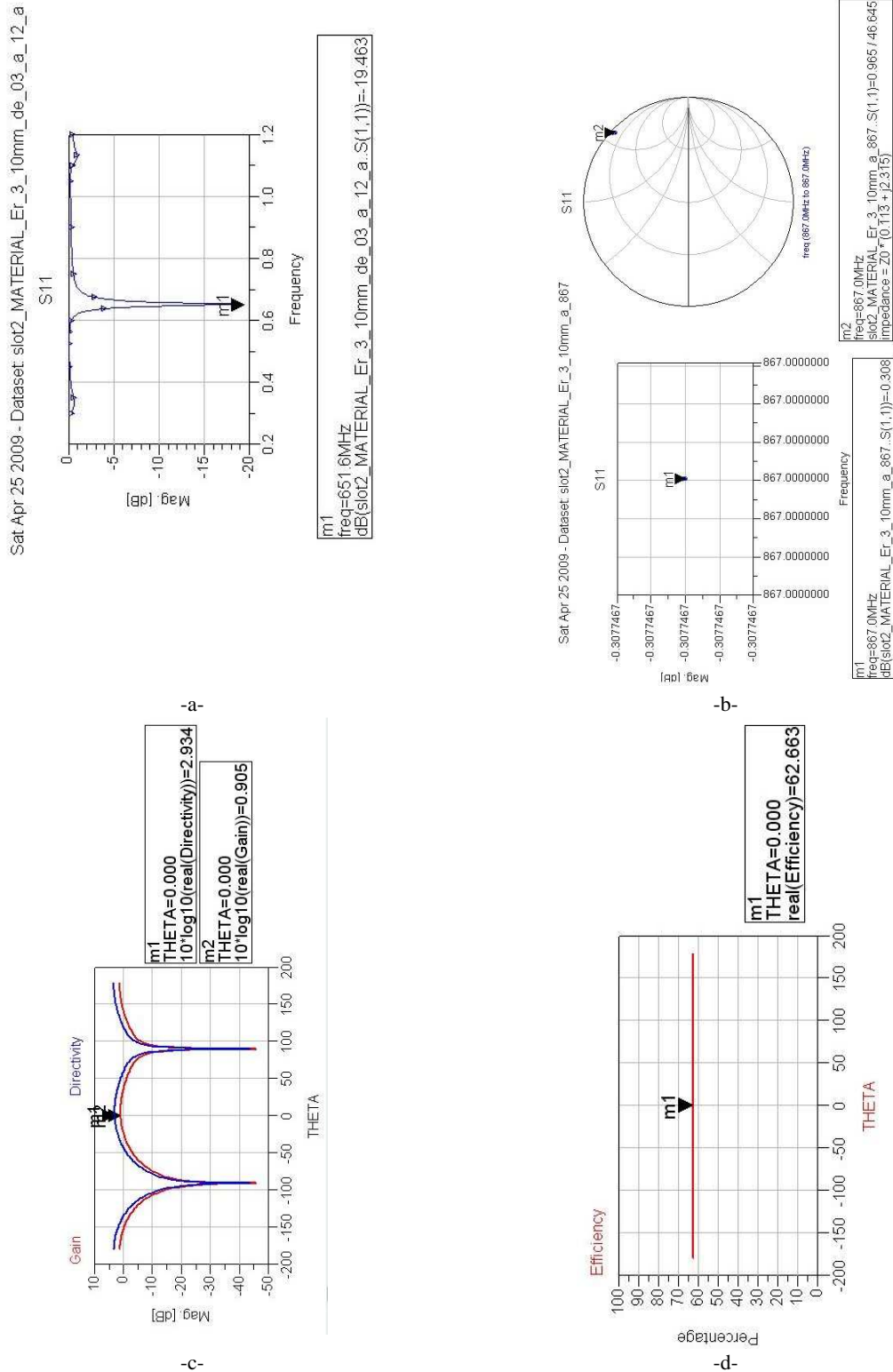


Tabla E.26. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 3; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 3,8

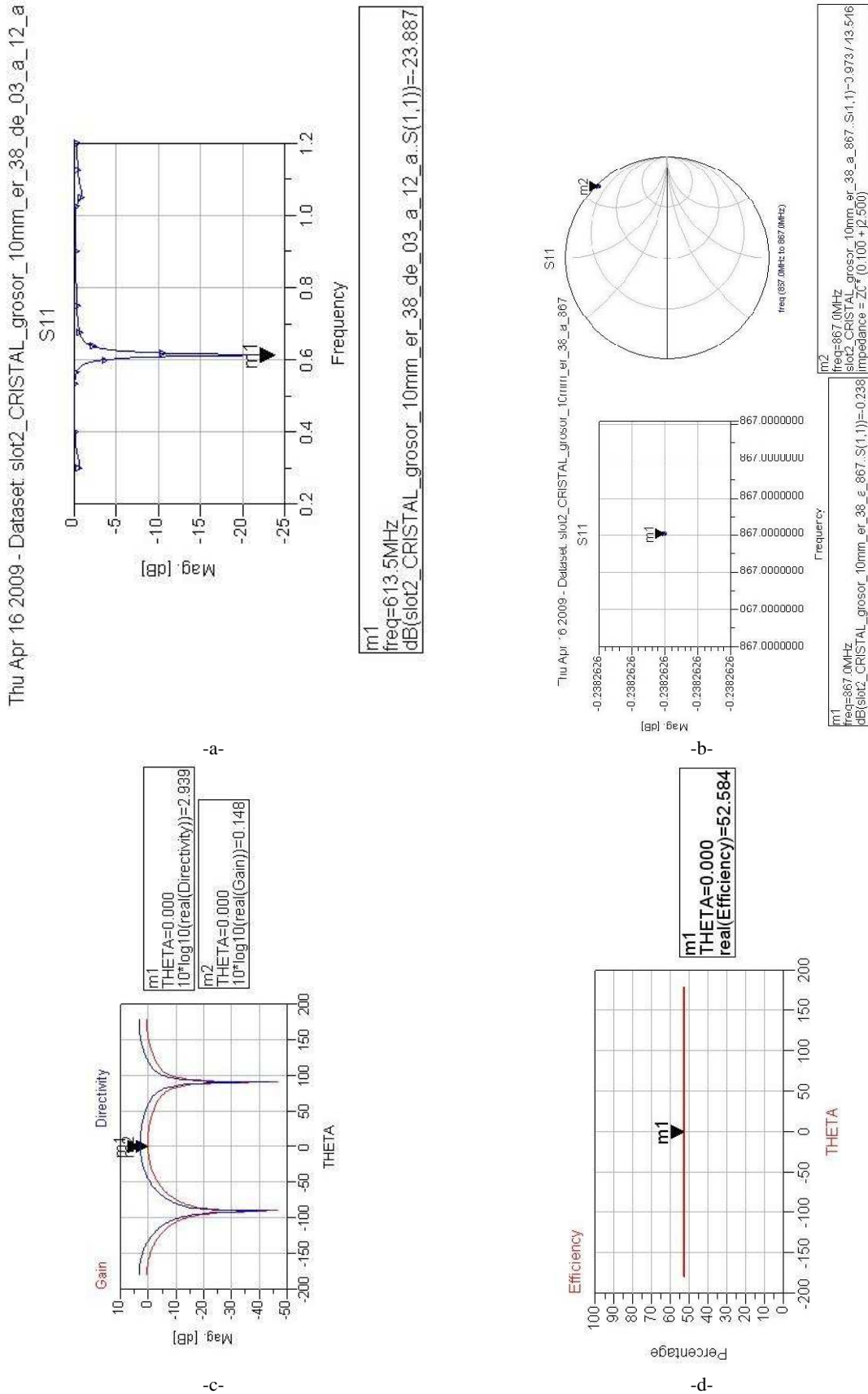


Tabla E.27. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 3,8; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 4

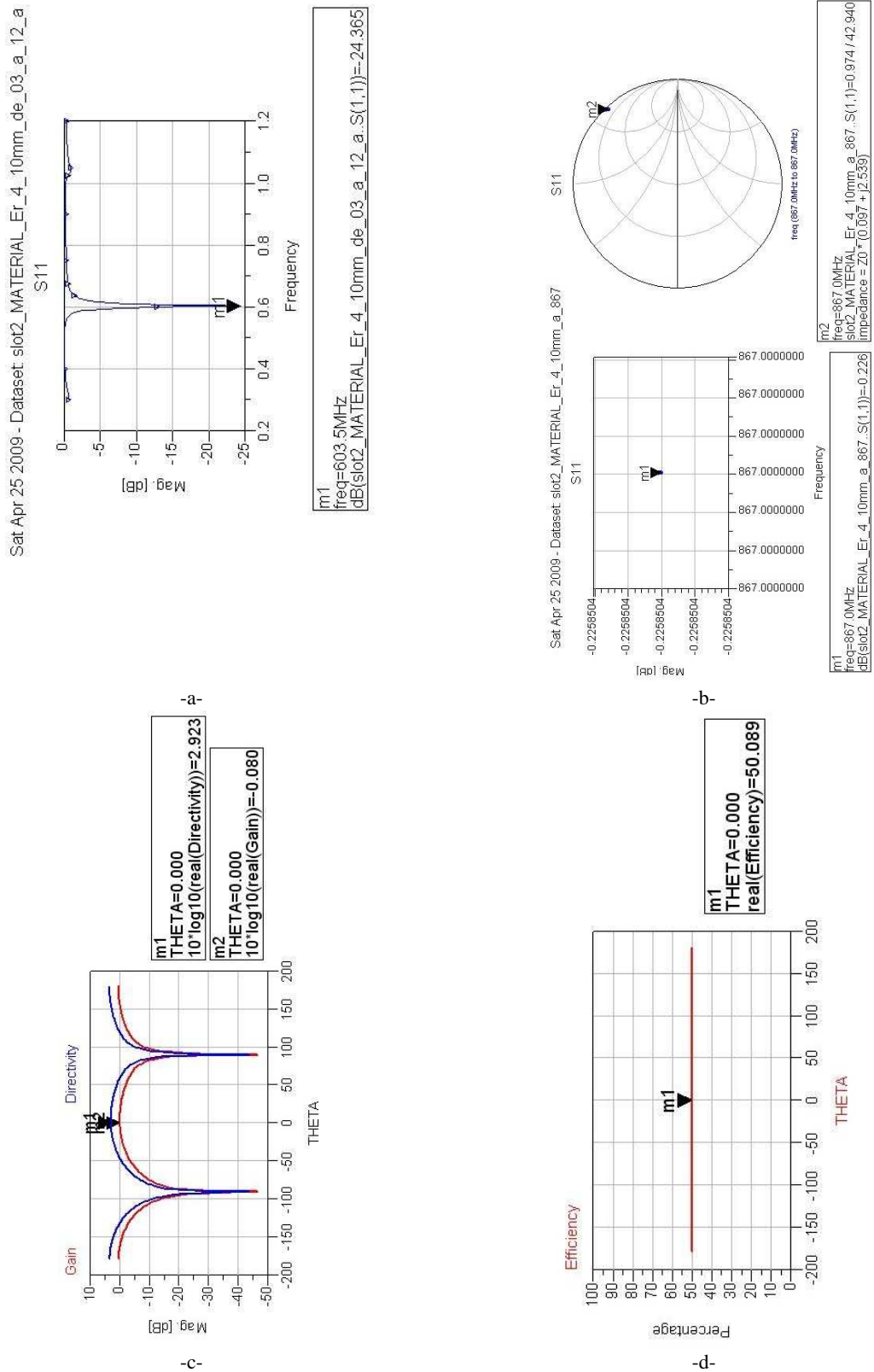


Tabla E.28. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 4; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

Comportamiento del tag con 10 mm de material de ϵ_r 5

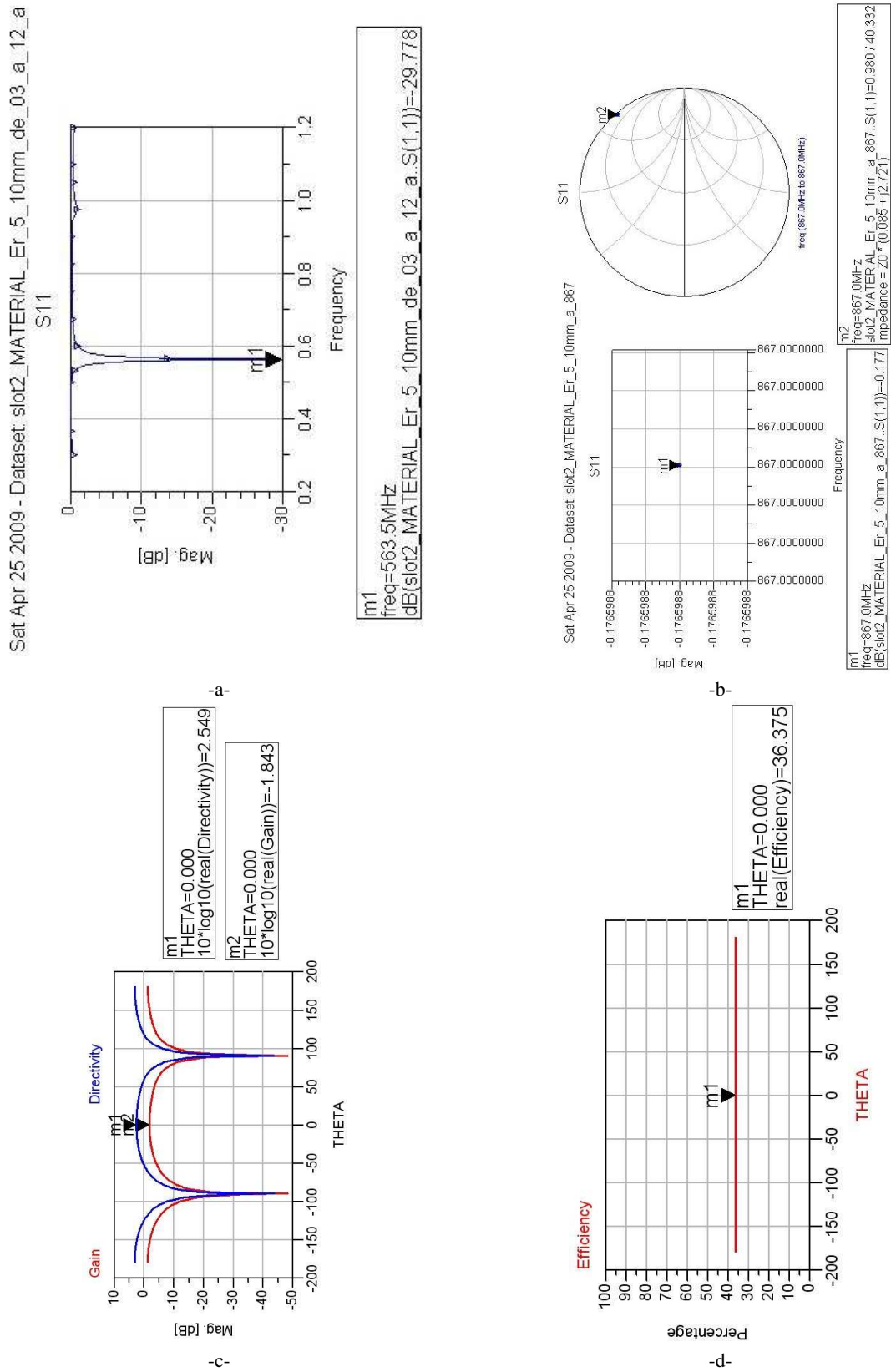
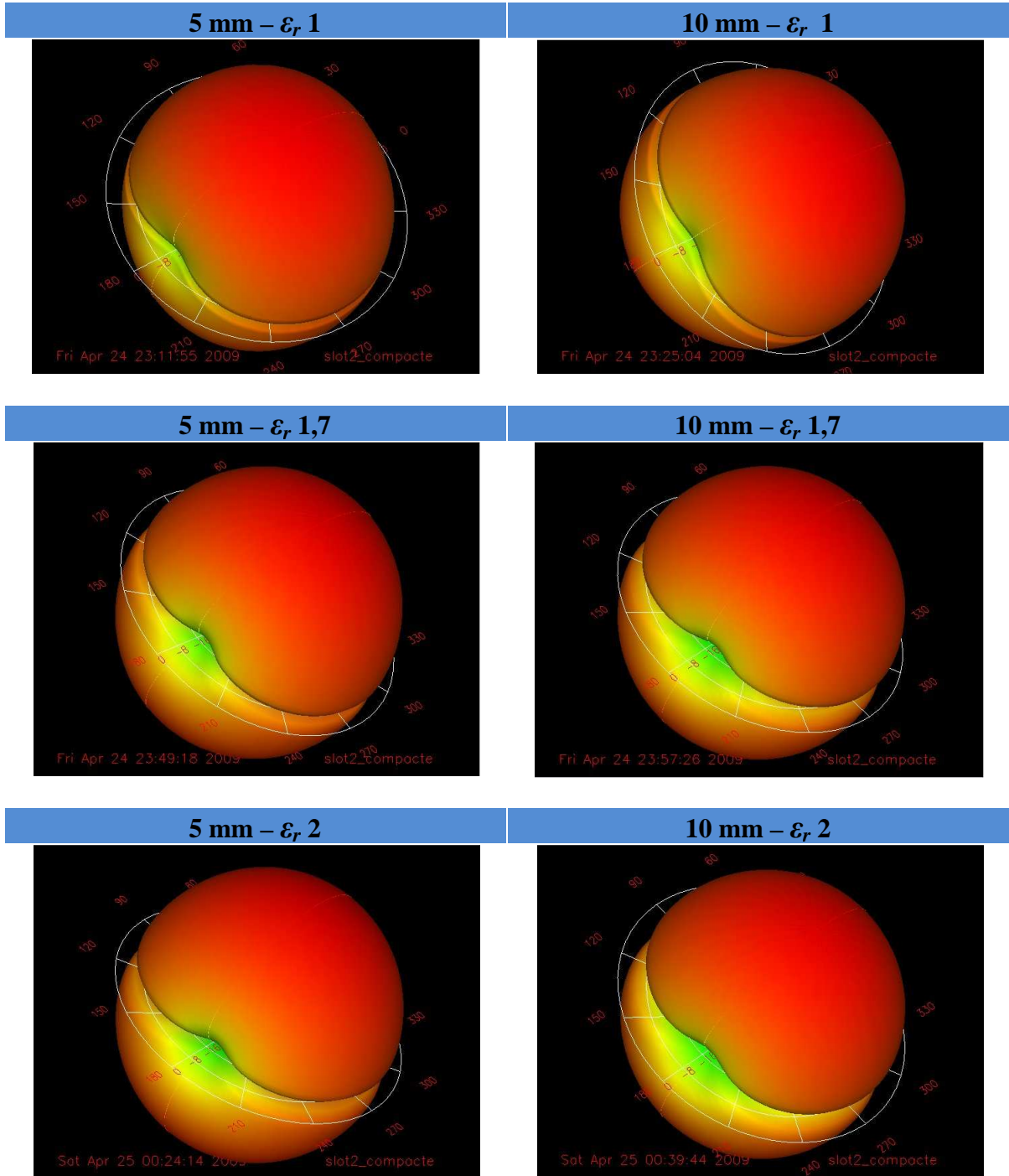
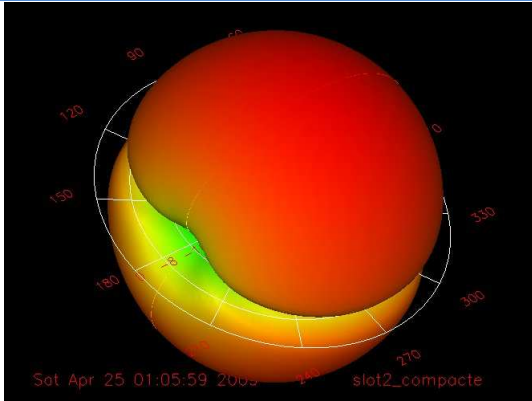


Tabla E.29. Comportamiento del tag con 10 mm de material de Er 5; (a) Banda de 0,3 a 1,2 GHz; (b) Adaptación a 867 MHz; (c) Directividad y ganancia a 867 MHz; (d) Eficiencia a 867 MHz

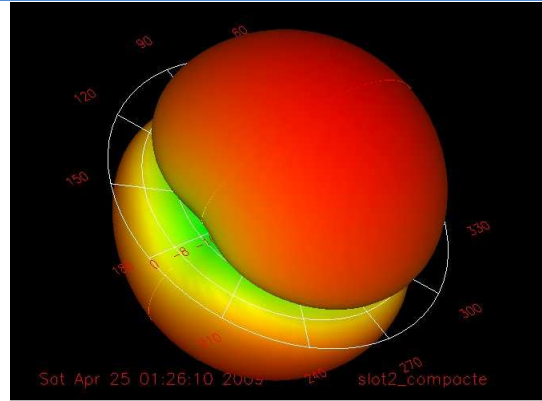
E.1.- Representación de Radiación



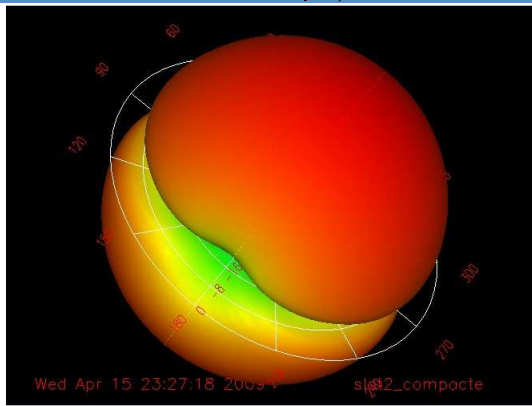
5 mm – ϵ_r 3



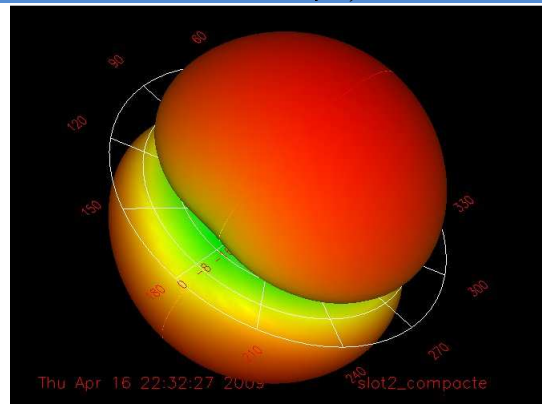
10 mm – ϵ_r 3



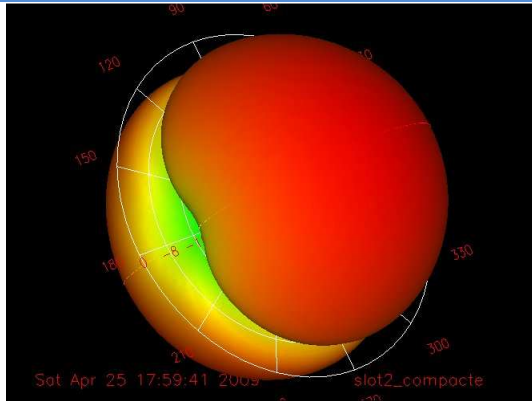
5 mm – ϵ_r 3,8



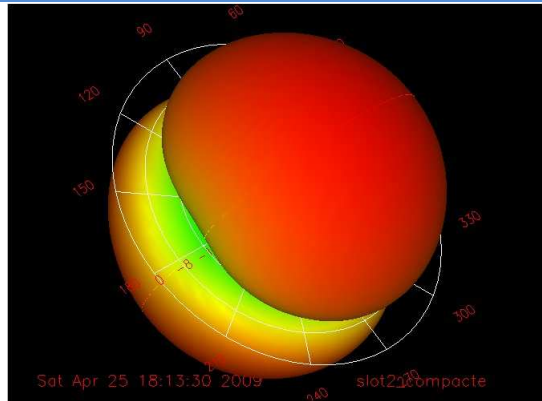
10 mm – ϵ_r 3,8



5 mm – ϵ_r 4



10 mm – ϵ_r 4



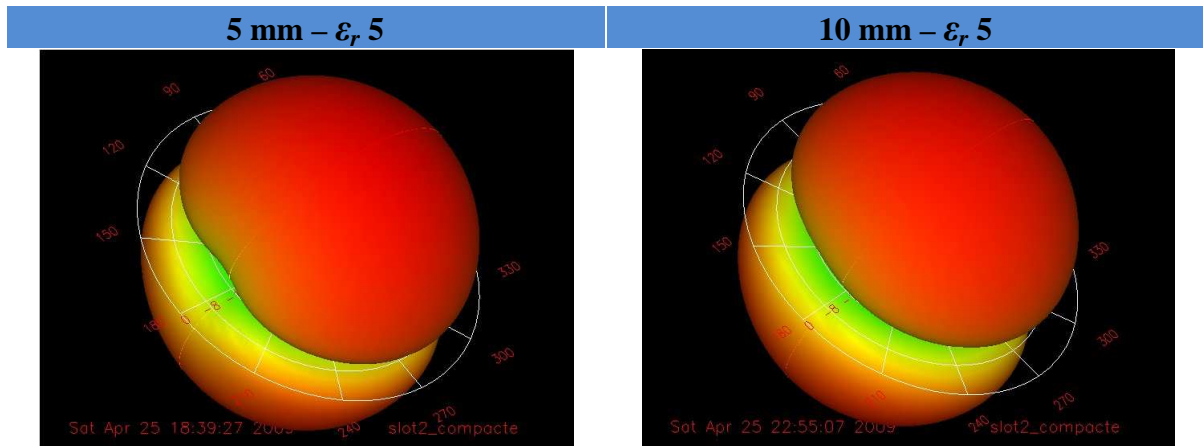


Tabla E.1.1. Diagramas de radiación 3D con diferentes ϵ_r con 5 y 10 mm de grosor

F.- Simulaciones MATLAB

En el siguiente apéndice se muestran las tablas generadas por MATLAB para la generación de sus gráficas

Simulación con 4 parásitos de 0,45 m: dos a masa y dos al aire	
Método 1 – X	Y
0,1	-23,82
0,8	-1,088
0,45	-9,307
0,45	-8,904
0,2051	5,297
0,7	22,74
Método 2 – X	Y
0,1	-10,96
0,8	-1,882
0,45	-6,658
0,45	-6,519
0,2051	2,619
0,7	9,077
Método Hallen – X	Y
0,1	-11,41
0,8	-1,825
0,45	-6,817
0,45	-6,619
0,2051	2,719
0,7	9,582
Método SuperNEC – X	Y
0,1	-24,4
0,8	-1,16
0,453	-11,53
0,465	-9,81
0,2162	7,541
0,7	23,24

Tabla F.1. Datos generados por Matlab para $L_c=L_p=0,45$

Simulación con 4 parásitos de 0,5 m: dos a masa y dos al aire	
Método 1 – X	Y
0,1	-26,07
0,8	-1,1
0,45	-9,46
0,45	-8,9
0,2051	5,581
0,7	24,97
Método 2 – X	Y
0,1	-26,06
0,8	-1,099
0,45	-9,458
0,45	-8,898
0,2051	5,579
0,7	24,96
Método Hallen – X	Y
0,1	-31,95
0,8	-1,116
0,45	-10,69
0,45	-10,39
0,2051	6,385
0,7	10,84
Método SuperNEC – X	Y
0,1	-24,4
0,8	-1,16
0,453	-11,53
0,465	-9,81
0,2162	7,541
0,7	23,24

Tabla F.2. Datos generados por Matlab para $L_c=L_p=0,5$