



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Simulación de los diagramas de radiación de una antena de estación terrena de 6m en banda S/K

Autor: Rubén Tena Sánchez

Fdo.:

Tutor: Belén Galocha Iragüen

Fdo.:

Tribunal Calificador

Presidente: José Luis Besada Sanmartín

Fdo.:

Vocal: Belén Galocha Iragüen

Fdo.:

Secretario: José Manuel Fernández González

Fdo.:

CALIFICACIÓN:

FECHA:



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Simulación de los diagramas de radiación de una antena de estación terrena de 6m en banda S/K

Autor: Rubén Tena Sánchez

Fdo.:

Tutor: Belén Galocha Iragüen

Fdo.:

Tribunal Calificador

Presidente: José Luis Besada Sanmartín

Fdo.:

Vocal: Belén Galocha Iragüen

Fdo.:

Secretario: José Manuel Fernández González

Fdo.:

CALIFICACIÓN:

FECHA:

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

El presente Trabajo fin de Grado recoge las simulaciones de los diagramas de radiación secundarios de una antena receptora de estación terrena de 6m para observación de la tierra.

Se encuentra enmarcado en el proyecto “Prototype of K-Band Ground Station Antenna (6m aperture) for Earth Observation Application”, propuesto por la Agencia Europea del Espacio (ESA) y desarrollado por la empresa INDRA.

Se ha diseñado, construido y medido un alimentador dual S/K, que incorpora las dos puertas RHCP y LHCP en banda S y K (Recepción y Tracking). Los diagramas de este alimentador serán la base para las simulaciones de los diagramas secundarios de nuestra antena.

A lo largo del documento se interpretarán los diagramas de radiación obtenidos y se compararán los resultados con las especificaciones de diseño de la antena; además se verificará el cumplimiento de la recomendación de la ITU-R S.580-6.

Este trabajo pone de manifiesto las dificultades de medir con precisión los diagramas de radiación en banda K para este tipo de alimentadores duales.

Palabras clave: Antena, reflector, subreflector, conformado, alimentador dual, diagrama de radiación, comunicaciones por satélite, observación de la Tierra, directividad, copolar, contrapolar, Tracking, Recepción (RX), Banda S, Banda K, estación terrena, GRASP.

ABSTRACT AND KEYWORDS

This project involves the simulations of the secondary radiation patterns of a 6m ground station antenna for Earth observation.

These simulations are part of the project “Prototype of K-Band Ground Station Antenna (6m aperture) for Earth Observation Application”. It has been proposed by the European Space Agency(ESA) and carried out by INDRA.

A dual band feed (S-26GHz) has been designed, constructed and measured. It is made up by two ports RHCP and LHCP at S and K (Reception and Tracking) bands. The radiation patterns of this feed will be the base of our antenna simulations.

Throughout this document, simulation, interpretation and justification of the data obtained in the secondary radiation patterns will be made by comparing them with the antenna specifications as well as with the ITU-R S.580-6 Recommendation.

The project shows the real difficulties of measuring the K band radiation patterns with precision in this kind of dual band feeders.

Keywords: Antenna, reflector, subreflector, shaped, dual feed, radiation pattern, satellite communication, Earth Observation, directivity, copolar, crosspolar, Tracking, Reception (RX), S band, K band, ground station, GRASP.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	2
2	ÓPTICA	3
3	BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA GRASP	4
4	ÓPTICA FÍSICA.....	5
5	ALIMENTADOR	7
5.1	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DEL ALIMENTADOR EN BANDA S.....	10
5.1.1	Puerta P1 (LHCP).....	10
5.1.2	Puerta P2 (RHCP)	11
5.2	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DEL ALIMENTADOR EN BANDA K.....	12
5.2.1	Puerta PD (RX-RHCP)	12
5.2.2	Puerta PI (RX-LHCP)	13
5.2.3	Puerta TD (RHCP).....	14
5.2.4	Puerta TI (LHCP).....	15
6	SIMULACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS	16
6.1	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN BANDA S	16
6.1.1	Puerta P1	17
6.1.2	Puerta P2	19
6.2	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN BANDA K	21
6.2.1	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN RX.....	22
6.2.1.1	Puerta PD.....	22
6.2.1.2	Puerta PI	24
6.2.2	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS PARA LAS PUERTAS DE TRACKING ...	26
6.2.2.1	Representación polar del diagrama de radiación en TD y TI.....	28
6.2.2.2	Tracking derecho (TD)	31
6.2.2.3	Tracking izquierdo (TI).....	33
6.2.2.4	Corrección de desequilibrios en Tracking	35
6.3	DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS RX/TRACKING.....	36
6.3.1	Diagramas de radiación secundarios PD/TD.....	37
6.3.2	Diagramas de radiación secundarios PI/TI.....	39
7	RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS	41
8	CONCLUSIONES	43
9	BIBLIOGRAFÍA.....	44

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

El Sputnik I, perteneciente al programa Sputnik ruso, fue el primer satélite artificial puesto en órbita de la historia. Su lanzamiento se produjo el 3 de Octubre del año 1957. Este satélite artificial fue lanzado por la Unión Soviética y supuso el comienzo del lanzamiento de satélites artificiales en órbita. Con este hecho se desencadenaron toda una serie de lanzamientos posteriores por parte de Rusia y EE.UU. conocidos como carrera espacial (1957-1975). Estos satélites tenían como finalidad ampliar los conocimientos tanto dentro de la atmósfera como en el espacio exterior.

El segundo satélite artificial puesto en órbita sería el Sputnik II, lanzado el 3 de Noviembre del año 1957, también por la unión Soviética. Este segundo satélite desencadenó el lanzamiento en el año 1958 del primer satélite estadounidense, el Explorer 1, como respuesta a los dos lanzamientos rusos anteriores.

En el año 1960 EE.UU. lanzó el primer satélite meteorológico, TIROS-1. Este satélite permitió determinar patrones de tormentas además de nuevas características de las nubes . En definitiva se convirtió en una potente herramienta de investigación para los científicos.



Figura 1 Primera imagen de TV de la Tierra vista desde el espacio

Durante los últimos años miles de satélites han sido enviados al espacio con la misión de recopilar datos sobre la Tierra. Estos satélites artificiales tienen una importancia crucial en una amplia variedad de actividades científicas y aplicaciones prácticas.

Los satélites han revolucionado la forma en la que la humanidad ve y entiende la Tierra. Su desarrollo ha proporcionado importantes beneficios mejorando los sistemas de predicción de los procesos de la Tierra y permitiendo nuevos descubrimientos.

En este contexto, los actuales satélites para observación de la tierra, Earth Observation (EO), operan en la banda X dedicada a los satélites de exploración de la tierra, Earth Exploration Satellite (EES). El número de misiones que operan en estas bandas ha crecido mucho, por lo que se trata de una banda muy congestionada, con un riesgo importante de interferencias y con un ancho de banda disponible pequeño (375 MHz) ,que no es capaz de dar servicio al alto tráfico de datos que deben soportar las misiones futuras.

Es por todo esto que la WRC 2000 ha asignado la banda K de 25.5–27 GHz (llamada también banda de 26 GHz) a los servicios EES, lo que permite minimizar las interferencias y el riesgo de congestión en futuras misiones.

Por lo tanto, este Trabajo fin de Grado se ha centrado en la banda de 26GHz. Debido a que en esta banda la potencia de la señal se ve afectada por las condiciones atmosféricas locales, es posible incrementar la robustez de los códigos de modulación a cambio de disminuir el régimen binario.

Para informar al satélite en tiempo real de estos cambios en el esquema de modulación, se habilita un enlace ascendente en banda S. Por otro lado, el enlace de banda K incorpora al sistema de RX un sistema de Tracking para apuntar al satélite de forma más precisa.

1.2 OBJETIVOS

La finalidad de la antena es, por lo tanto, la de garantizar la comunicación con el satélite en la banda de 26GHz. Para ello, debe cumplir las especificaciones fijadas:

- Directividad y relación CP-XP en banda S y K (RX y Tracking).
- Correcto funcionamiento de Tracking para el apuntamiento hacia el satélite.
- Cumplimiento del gálibo de la ITU-R S.580-6.

El objetivo del trabajo es simular los diagramas de radiación secundarios de la antena. Para ello se alimenta la antena con los diagramas de radiación medidos del alimentador de banda S y K.

Para obtener los diagramas de radiación secundarios se hará uso del programa GRASP, desarrollado por la empresa TICRA, y posteriormente se presentarán los resultados haciendo uso de Matlab.

2 ÓPTICA

La antena propuesta como solución en este proyecto se corresponde con un sistema reflector doble centrado, con un splash plate como subreflector. Tanto la superficie del reflector como la del subreflector se han conformado, con el objetivo de obtener un mayor control sobre la ganancia y los lóbulos secundarios de la antena, logrando así optimizar los valores de eficiencia.

La solución propuesta para la aplicación presenta las siguientes dimensiones físicas:

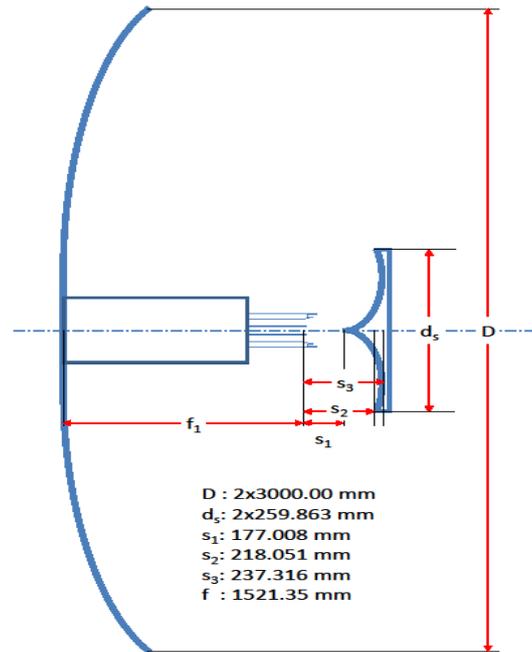


Figura 2 Geometría de la antena

De la Figura 2 se obtienen los siguientes datos:

- El reflector principal tiene un radio de 3 metros.
- El subreflector tiene un radio de 0.260m.
- La separación entre el reflector principal y el subreflector es de aproximadamente 1.7m.
- El taper en el borde del subreflector es de -10dB (a 50°).

Haciendo uso de GRASP8 se puede obtener un fichero de salida (extensión .DXF) que permite la representación 3D de la geometría de antena utilizada por el programa. La geometría se representa con el programa AutoCAD.

En la figura 3 se observa la geometría de la antena utilizada por GRASP8 (reflector principal, subreflector y alimentador).

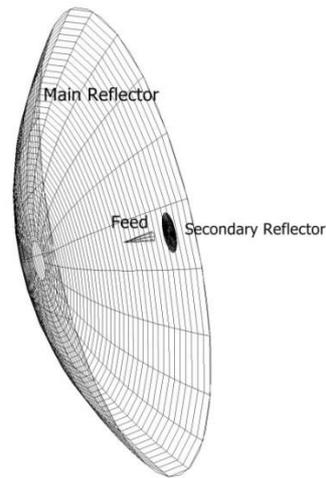


Figura 3 Distribución geométrica de la antena utilizada por GRASP8

De nuevo con la ayuda de AutoCAD se puede verificar que las dimensiones de los elementos que conforman la antena y las geometrías utilizadas por GRASP8 para calcular los campos radiados son correctas.

En la figura 4 se puede ver como salvo efectos propios de precisión de medida con el programa AutoCAD los diámetros de los reflectores son correctos.

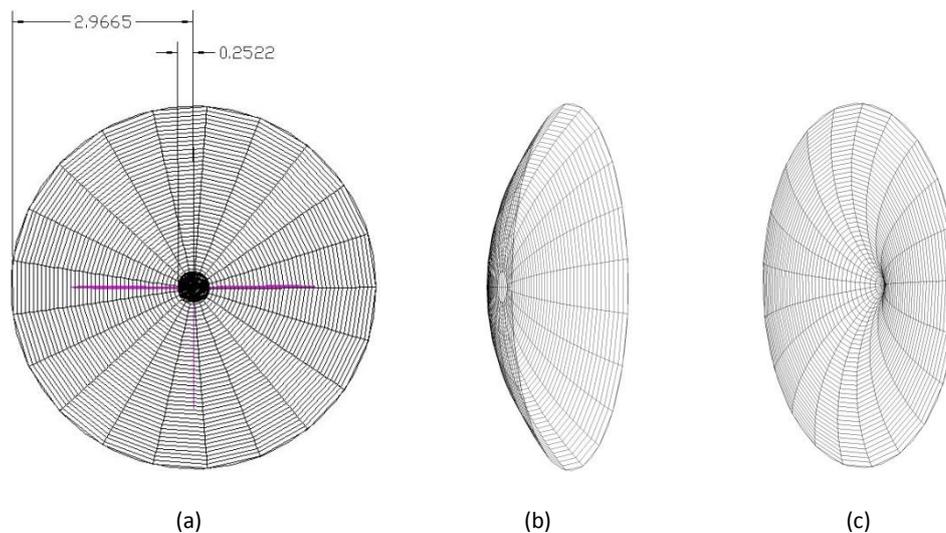


Figura 4 De izquierda a derecha (a) medidas de antena conformada, (b) reflector principal y (c) subreflector

3 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA GRASP

En este apartado se realizará una descripción somera del programa utilizado para obtener los diagramas de radiación secundarios de la antena, GRASP8.

El programa GRASP8 (General Reflector Antenna Software Package) ha sido desarrollado por la empresa TICRA en Copenhague, Dinamarca.

Se trata de un software que utiliza el lenguaje Fortran 90 y técnicas de programación orientada a objetos, proporcionando así toda una serie de herramientas para el análisis de reflectores.

Los elementos básicos a definir en GRASP son:

- Geometría de los reflectores: se puede elegir entre una amplia variedad (paraboloide, elipsoide, hiperboloide...). Como ya se dijo en el capítulo 3, las superficies reflectoras que configuran la antena bajo estudio son estructuras conformadas por lo que se ha utilizado la modalidad "Rotational" Surface a la hora de definir la geometría en GRASP8, es decir, se ha generado cada una de las superficies (reflector y subreflector) de la antena a partir de datos tabulados.
- Alimentador: también se ha introducido como una estructura tabulada "Tabulated Feed". Para ello se han utilizado los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica. De esta forma, el alimentador que el programa utilizará para calcular los campos radiados por las superficies reflectoras se corresponde con el alimentador real. En el capítulo 6 se describirá el alimentador con más detalle.
- Sistemas de coordenadas: además de la geometría de las superficies reflectoras, se definen los sistemas de coordenadas que permiten posicionar correctamente dichas superficies (reflector principal y reflector secundario) y el alimentador, quedando así definida la geometría de la antena completa.
- Cortes del campo: representan el diagrama 1D radiado por la antena, o generado por el alimentador. En este caso se utilizará el sistema de coordenadas esférico y representarán cortes $\phi = \text{cte}$, en componentes copolar y contrapolar circulares (RHCP, LHCP).

Además de esto, GRASP8 incluye diferentes métodos de análisis de las superficies reflectoras como Óptica Física, Óptica Geométrica, Teoría Geométrica de la Difracción... En el siguiente apartado se explicará el método utilizado para el cálculo de los diagramas secundarios.

4 ÓPTICA FÍSICA

Algunos de los métodos más importantes que se utilizan para analizar este tipo de antenas son:

- Óptica geométrica: Permite calcular los campos en la apertura. Los campos lejanos se obtienen usando los Principios de Equivalencia. Constituye una buena y sencilla aproximación para calcular el lóbulo principal y primeros lóbulos secundarios.
- Óptica Física: Calcula los campos de radiación a partir de las corrientes inducidas sobre las superficies reflectoras iluminadas. La validez de sus resultados es similar a la óptica Geométrica.
- GTD(Teoría geométrica de la difracción): Incluye los rayos difractados en los bordes de las superficies reflectoras. Da buenos resultados para los lóbulos alejados del principal incluidos los posteriores.

Para analizar esta antena, se utilizará el método de Óptica Física. El método de Óptica Física es versátil y rápido a la hora de realizar los cálculos, debido a la geometría del reflector. Además

proporciona datos suficientemente precisos para poder valorar los diagramas de radiación de nuestra antena.

En el método de Óptica Física, si se considera el reflector como conductor perfecto, siendo el campo dispersado el generado por las corrientes inducidas en el reflector, se puede dividir el proceso que se realiza en tres pasos:

1. Cálculo de las corrientes inducidas.
2. Cálculo del campo dispersado como consecuencia de las corrientes inducidas.
3. Suma del campo incidente y reflejado.

Este método se utiliza en altas frecuencias y supone que las corrientes superficiales en cualquier punto del reflector son las mismas que las corrientes superficiales en un plano infinito tangente al reflector en dicho punto.

La corriente eléctrica inducida en este plano infinito tomará el valor:

$$\vec{J}^e = 2\hat{n} \times \vec{H}^i$$

Donde \vec{H}^i es el campo magnético incidente y \hat{n} es el vector normal a la superficie. De forma análoga se obtiene la corriente magnética inducida, a partir del campo eléctrico incidente E^i .

A partir de la definición de los vectores potencial magnético y potencial eléctrico se puede determinar el campo eléctrico y magnético radiados:

$$\begin{aligned} \vec{A}^e &= \frac{\mu}{4\pi} \iint_B \vec{J}^e(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' & \vec{E} &= -j\omega \left(\vec{A}^e + \frac{1}{k^2} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}^e) \right) - \frac{1}{\varepsilon} \nabla \times \vec{A}^m \\ \vec{A}^m &= \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_B \vec{J}^m(\vec{r}') \frac{e^{-jkR}}{R} ds' & \vec{H} &= \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}^e - j\omega \left(\vec{A}^m + \frac{1}{k^2} \nabla(\nabla \cdot \vec{A}^m) \right) \end{aligned}$$

Siendo:

ω la pulsación.

k el número de onda.

μ la permeabilidad magnética.

ε la permitividad eléctrica.

$\nabla \times$ el operador rotacional.

$\nabla \cdot$ el operador divergencia.

\vec{E} campo eléctrico [V/m].

\vec{H} campo magnético [A/m].

Para el cálculo de las corrientes inducidas se introducen parámetros en GRASP8 que determinan el mallado que se realiza de la estructura reflectora. Dependiendo de las dimensiones de la estructura y el grado de precisión buscado, el mallado y por lo tanto el número de puntos en el cual se calcularán las corrientes por Óptica Física, variará, y por ende el tiempo de ejecución.

Por lo tanto, conociendo la geometría de la antena (superficies reflectoras) y los campos incidentes en cada superficie, se pueden determinar los campos electromagnéticos radiados.

De esta forma el campo electromagnético incidente sobre el subreflector será el del alimentador y el incidente sobre el reflector principal será el reflejado por el subreflector.

5 ALIMENTADOR

El alimentador constituye el punto de partida de la radiación de la antena. En este capítulo se analizarán los ficheros que han servido para obtener los diagramas de radiación secundarios.

La medida del campo radiado por el alimentador en las diferentes frecuencias y polarizaciones se ha realizado en el sistema esférico. Debido al Teorema de reciprocidad se cumple que: el diagrama de radiación, la directividad, y la impedancia de una antena son las mismas en transmisión y en recepción.

Como consecuencia de este teorema, los ficheros de medida se obtuvieron inyectando señal a través de una sonda y midiendo el campo recibido en recepción por el alimentador en la cámara anecoica.

La medida se ha realizado con paso en azimut y barrido en roll, como se observa en la figura:

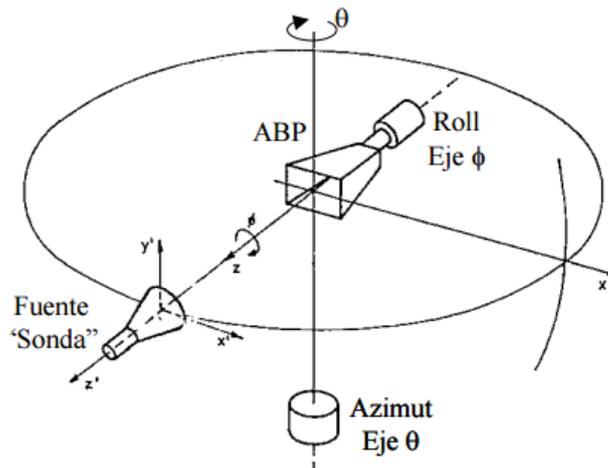


Figura 5 Sistema de medida esférico sobre ejes roll (ϕ) y azimut (θ)

Para la correcta medida de los campos radiados en las diferentes direcciones, el centro de giro de ambos posicionadores ha de coincidir, y será el centro de la esfera de medida.

En la Figura 6 se observa la longitud del alimentador dual. Se puede apreciar además que se trata de un alimentador pesado (banda K, S y posicionador de roll).

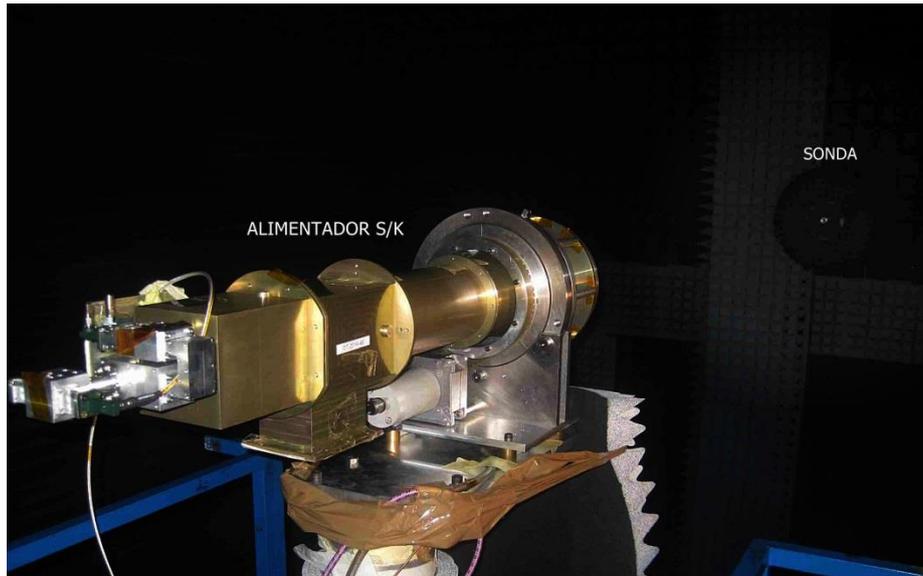


Figura 6 Alimentador y sonda en cámara anecoica

Este hecho, como se verá en los capítulos posteriores, tiene una importancia crucial en este tipo de medidas, dado que los desalineamientos que se producen en las medidas realizadas dan lugar a diagramas de radiación secundarios no centrados. Este problema será prácticamente inexistente para la banda S y para RX en banda K, no así para las puertas de Tracking.

Las figuras 7 y 8 muestran la estructura del alimentador dual S/K utilizado para alimentar la antena. Se puede observar tanto la banda K (banda de 26GHz), como la banda S (puertas de mayor tamaño que la banda K).

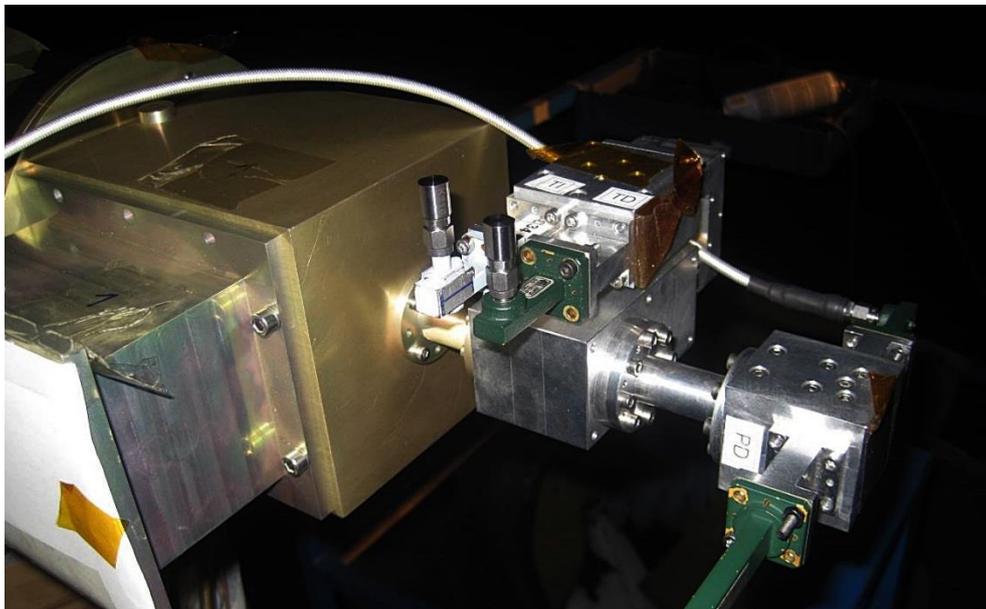


Figura 7 Puertas de banda K: RX-RHCP (PD), RX-LHCP (PI), Tracking-RHCP (TD) y Tracking-LHCP (TI)

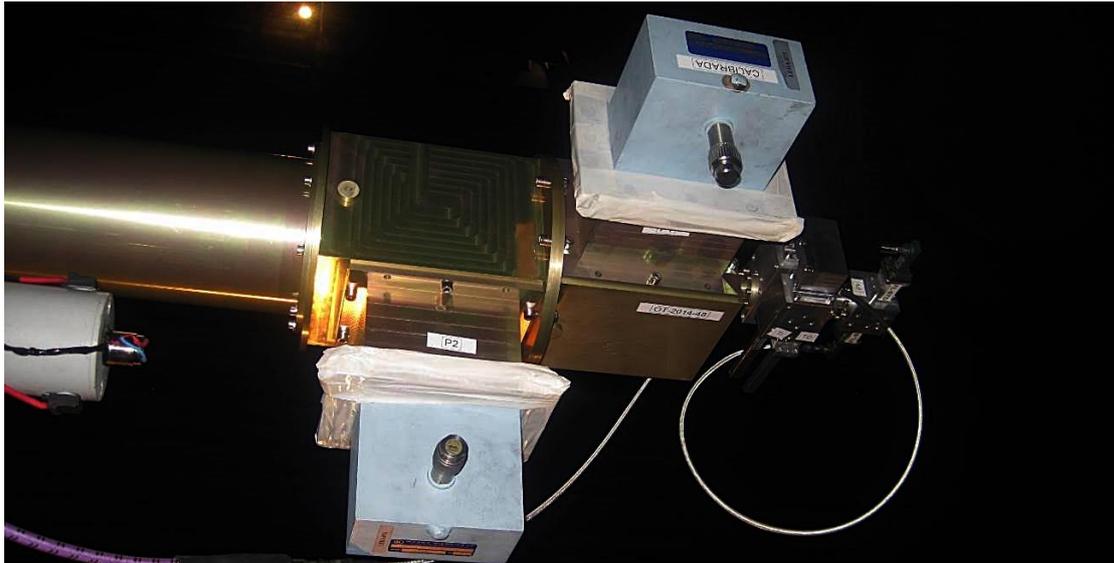


Figura 8 Puertas de banda S: RHCP (P2) y LHCP (P1)

En las siguientes páginas se mostrarán los diferentes diagramas de radiación del alimentador dual S/K para las diferentes frecuencias de operación de la antena.

Como ya se indicó con anterioridad, la banda S se empleará para establecer un canal de comunicación que indique la modulación utilizada al satélite, y la banda K corresponderá a los datos propiamente dichos.

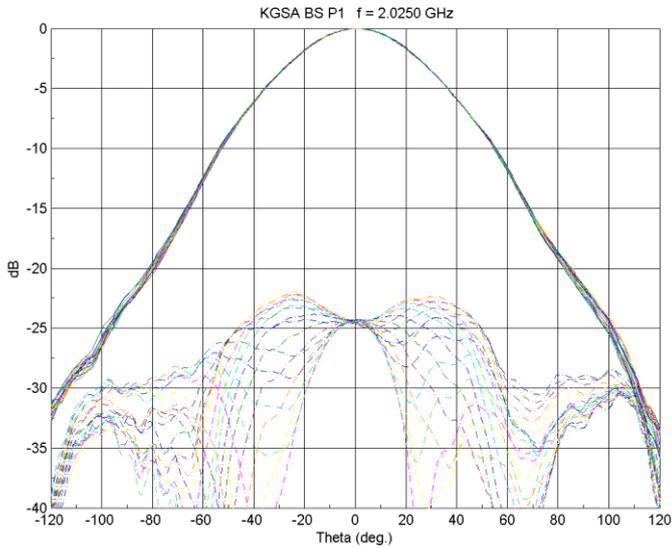
Las frecuencias de operación del alimentador y por lo tanto de la antena son:

- Banda S: De 2.025GHz a 2.12GHz en RX y de 2.2GHz a 2.3GHz en TX. Se analizará el comportamiento de la antena en las siguientes frecuencias: 2.025GHz, 2.12GHz, 2.2GHz y 2.3GHz.
- Banda K: De 25.5GHz a 27GHz. Se analizará el comportamiento de la antena en las siguientes frecuencias: 25.5GHz, 26.25GHz y 27GHz.

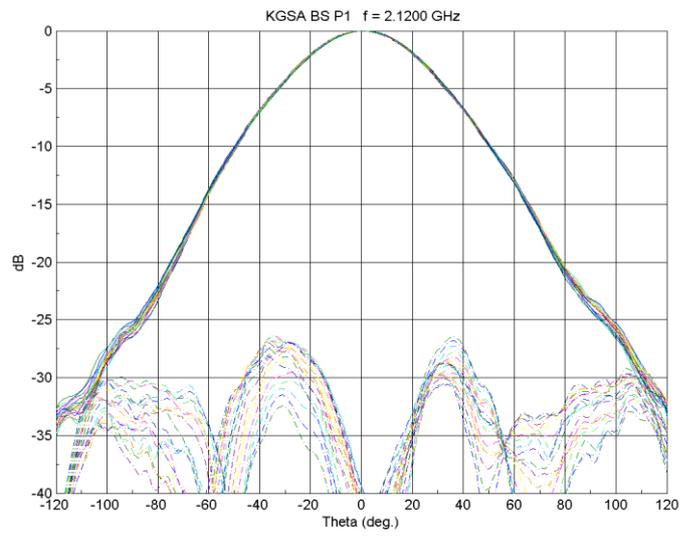
Tal y como se mostró en la Figura 8, la banda S dispone de dos puertas P1 y P2, cada una respondiendo a una polarización diferente para cada frecuencia. La banda K dispone de cuatro puertas (Figura 7): PD, PI, TD Y TI. Tanto PD como PI hacen referencia a la transmisión y recepción de datos, mientras que TD y TI se utilizan para realizar un apuntamiento preciso de la antena al satélite. Estas puertas también responden a una polarización concreta, al igual que ocurría con la banda S.

5.1 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DEL ALIMENTADOR EN BANDA S

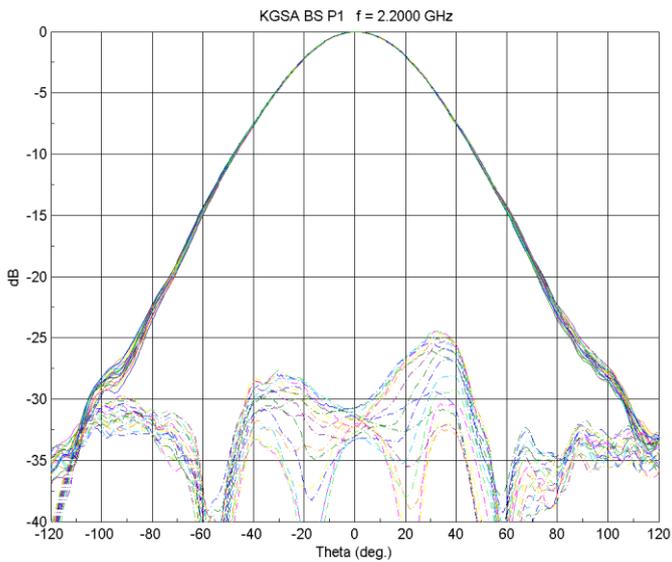
5.1.1 Puerta P1 (LHCP)



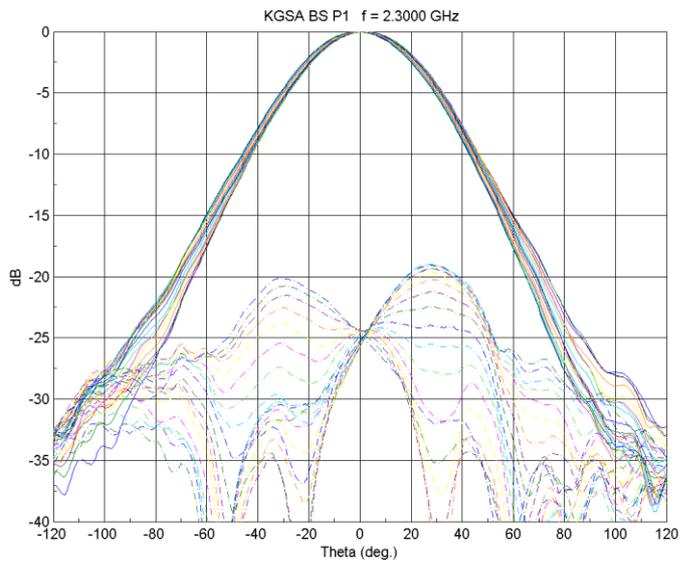
(a)



(b)



(c)

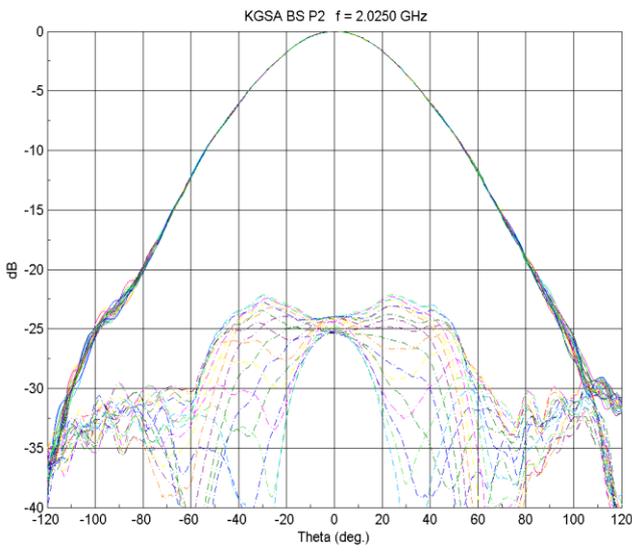


(d)

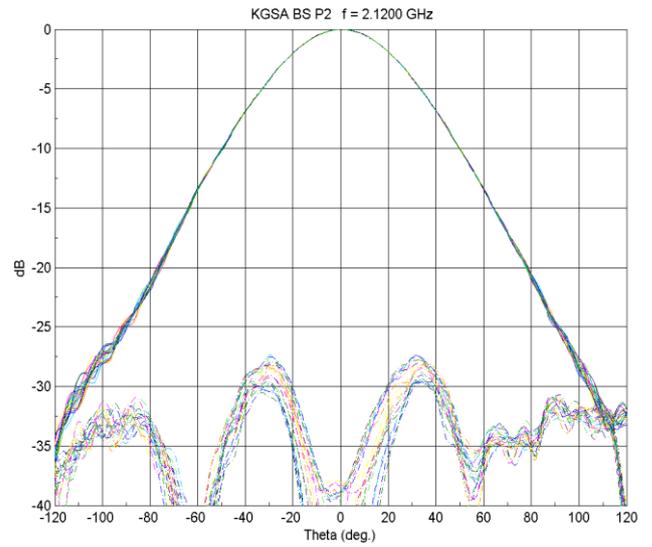
Figura 9 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en P1 (banda S) para diferentes cortes $\phi=cte$: 2.025GHz (a), 2.12GHz (b), 2.2GHz (c) y 2.3GHz (d)

La componente copolar para la puerta P1 se corresponde con la polarización LHCP mientras que la contrapolar con la RHCP. Se observa del diagrama de radiación del alimentador que el campo tiene un valor de -10dB con respecto al máximo para un ángulo de unos 50° tal y como se especificaba en el apartado 3.

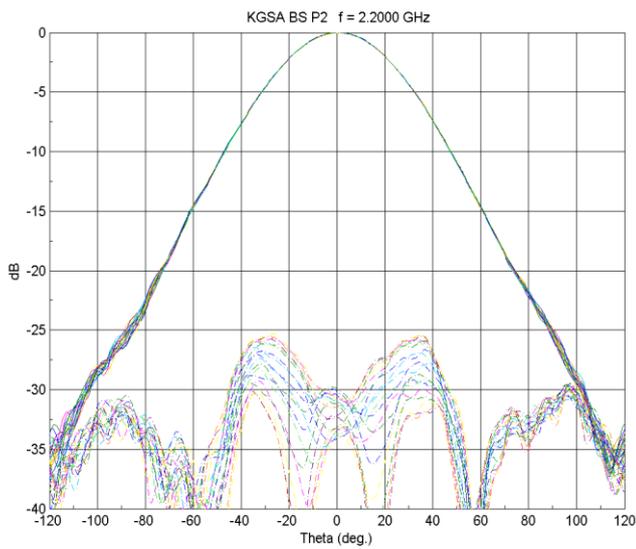
5.1.2 Puerta P2 (RHCP)



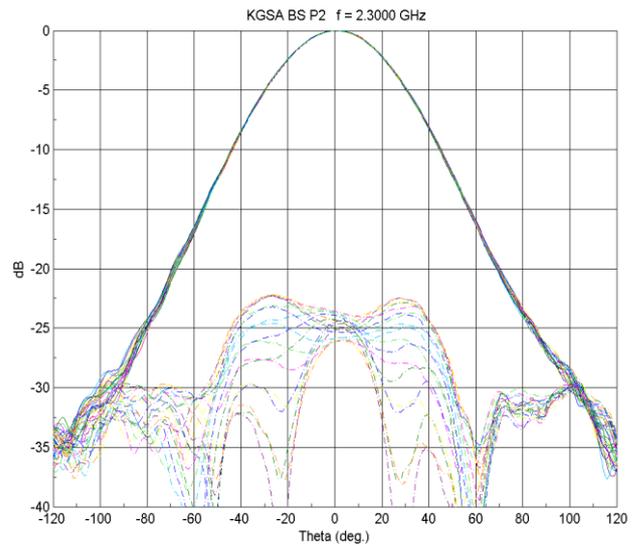
(a)



(b)



(c)



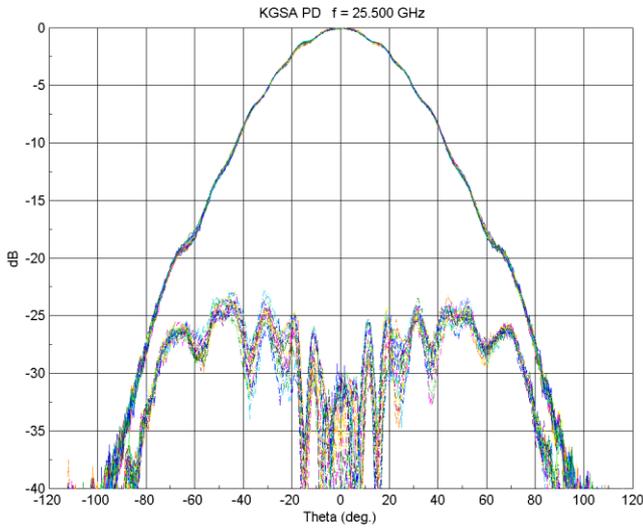
(d)

Figura 10 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en P2 (banda S) para diferentes cortes $\phi=cte$: 2.025GHz (a), 2.12GHz (b), 2.2GHz (c) y 2.3GHz (d)

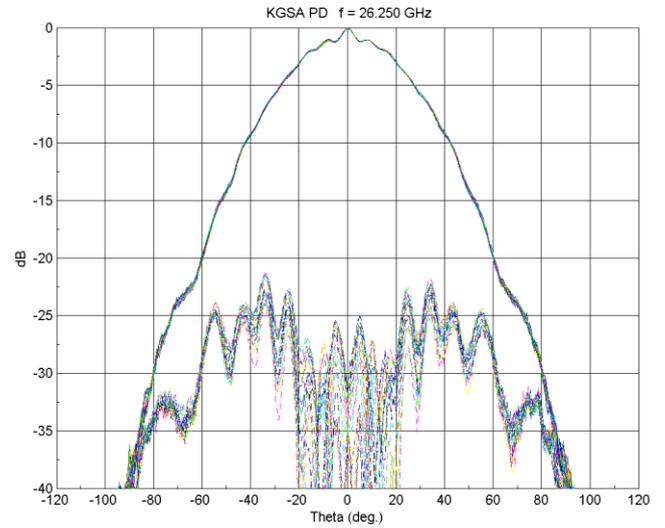
La componente copolar para la puerta P2 se corresponde con la polarización RHCP mientras que la contrapolar con la LHCP. De nuevo se observa del diagrama de radiación del alimentador que el campo tiene un valor de -10dB con respecto al máximo para un ángulo θ de aproximadamente 50° .

5.2 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DEL ALIMENTADOR EN BANDA K

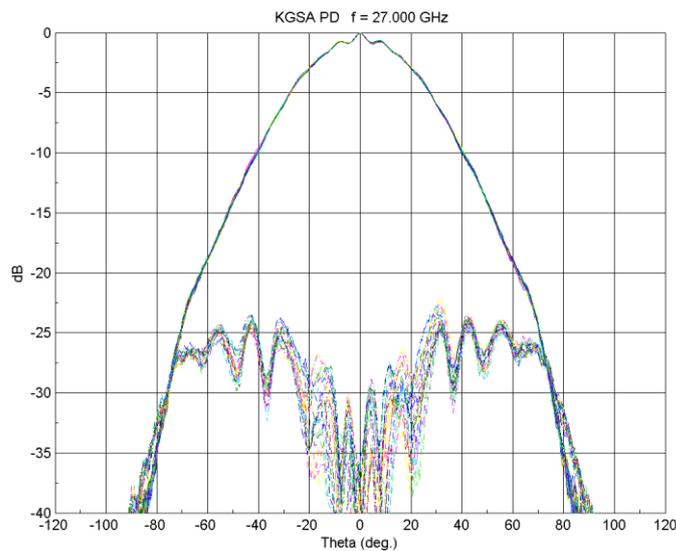
5.2.1 Puerta PD (RX-RHCP)



(a)



(b)

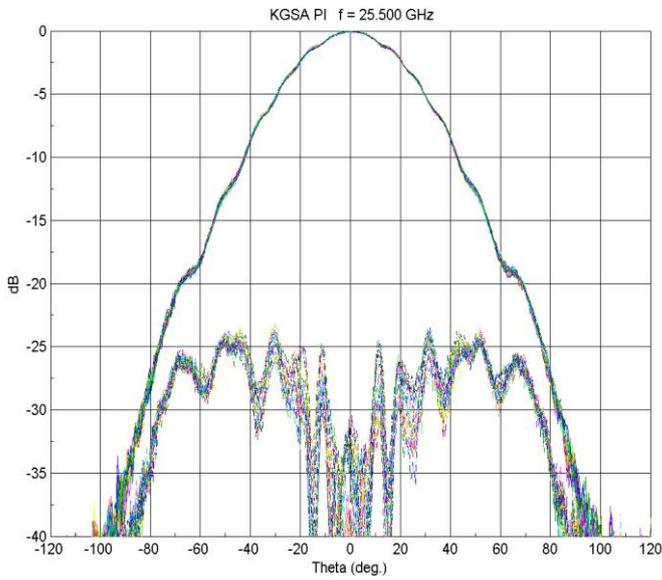


(c)

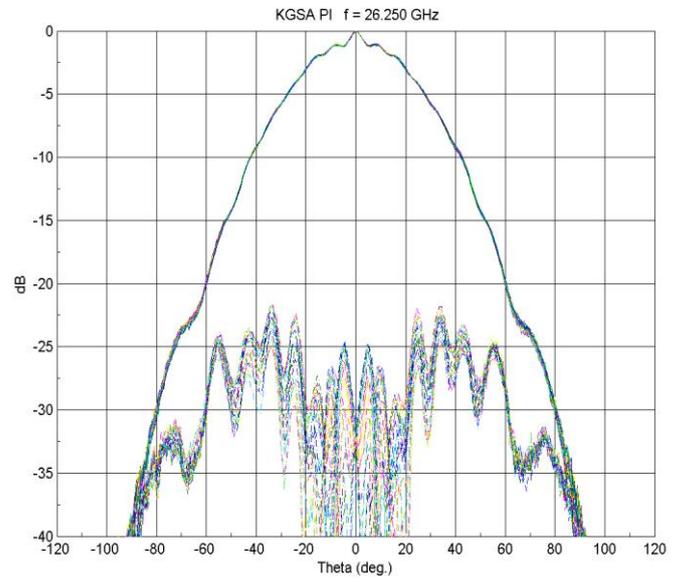
Figura 11 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en PD (banda K) para diferentes cortes $\phi=cte$: 25.5GHz (a), 26.25GHz (b), 27GHz (c)

La polarización RHCP se corresponderá con la componente copolar para PD, mientras que la polarización LHCP será la componente contrapolar. El campo toma un valor 13-14dB por debajo del máximo para θ aproximadamente igual a 50° .

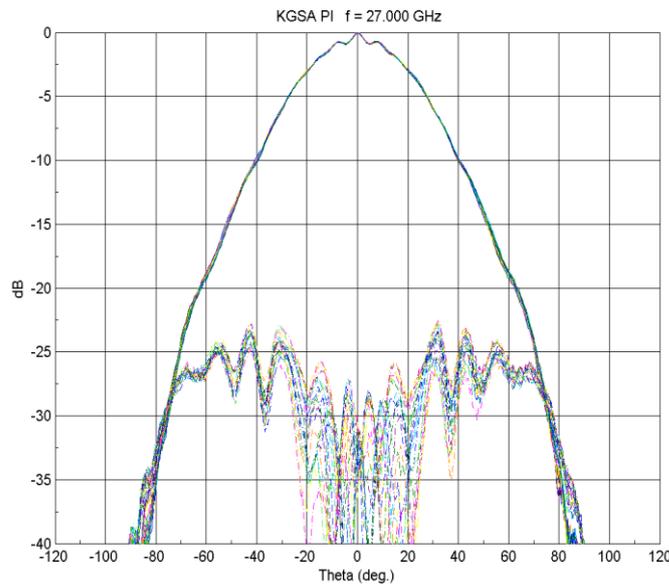
5.2.2 Puerta PI (RX-LHCP)



(a)



(b)

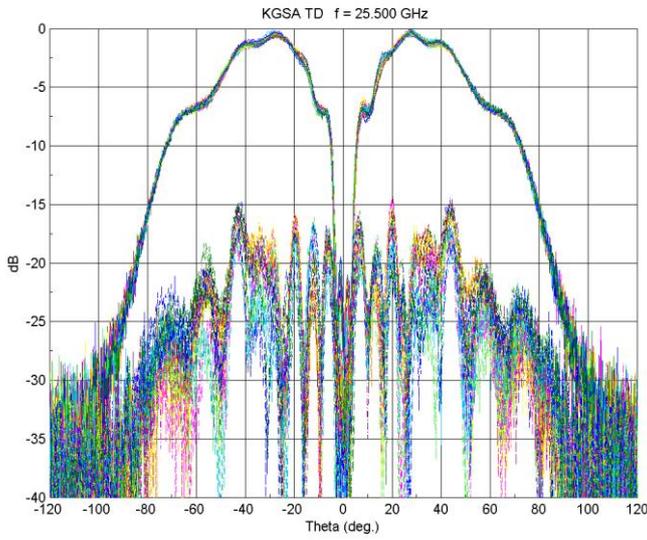


(c)

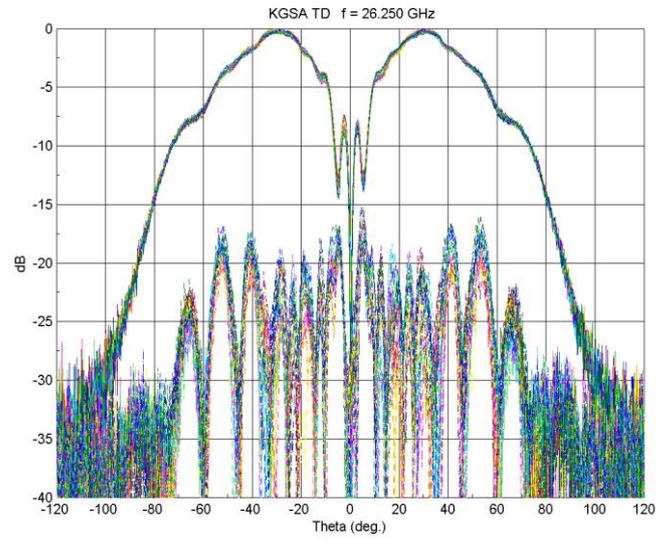
Figura 12 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en PI (banda K) para diferentes cortes $\phi=cte$: 25.5GHz (a), 26.25GHz (b), 27GHz (c)

La componente copolar de la puerta PI es la LHCP, mientras que la polarización RHCP es la componente contrapolar. Al igual que para la puerta PD, el campo toma un valor 13-14dB por debajo del máximo para θ aproximadamente igual a 50° .

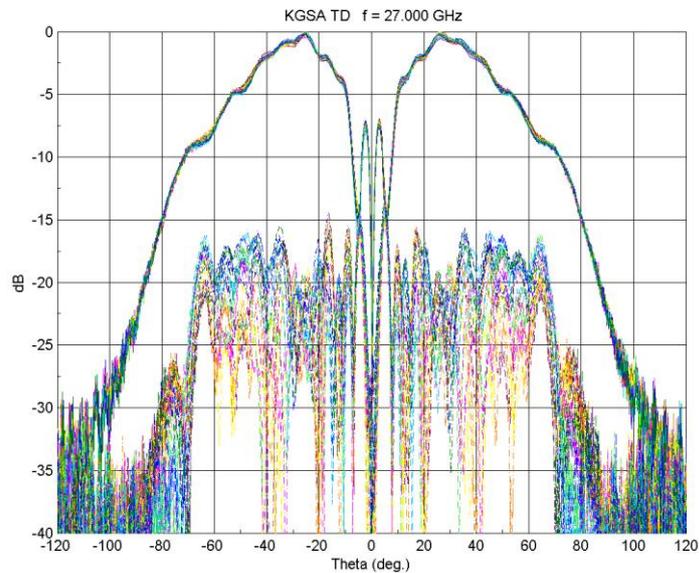
5.2.3 Puerta TD (RHCP)



(a)



(b)

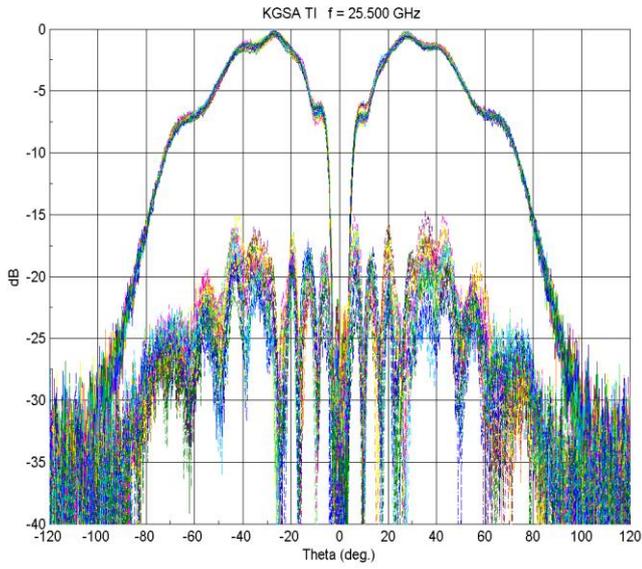


(c)

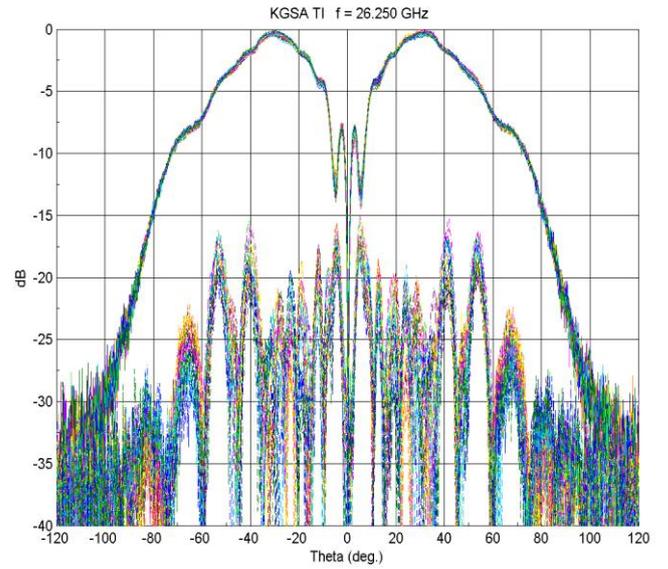
Figura 13 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en TD (banda K) para diferentes cortes $\phi=cte$: 25.5GHz (a), 26.25GHz (b), 27GHz (c)

En este caso la componente copolar es la RHCP, mientras que la contrapolar la LHCP. En el diagrama de radiación observamos un mínimo para $\theta=0^\circ$. La distancia entre el mínimo de las puertas de Tracking y el máximo de la puerta correspondiente a RX caracterizará el comportamiento del Tracking, como veremos en el siguiente capítulo.

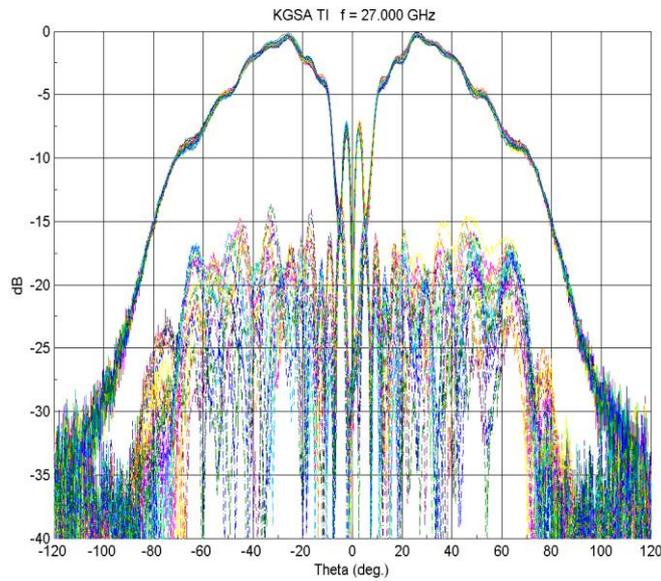
5.2.4 Puerta TI (LHCP)



(a)



(b)



(c)

Figura 14 Componentes Copolar (Línea continua) y Contrapolar (Línea discontinua) en TI (banda K) para diferentes cortes $\phi=cte$: 25.5GHz (a), 26.25GHz (b), 27GHz (c)

La componente copolar es la LHCP, mientras que la contrapolar la RHCP. De nuevo observamos un mínimo para $\theta=0^\circ$.

6 SIMULACIÓN DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS

En este capítulo se describirá la parte práctica del proyecto, que consiste, como ya se ha adelantado en capítulos anteriores, en obtener los diagramas de radiación secundarios de la antena propuesta.

En el capítulo 6 se mostraron los diagramas de radiación medidos en la cámara anecoica de las diferentes puertas para las bandas S y K del alimentador. Estos diagramas de radiación serán la base de las simulaciones de los diagramas secundarios.

Para representar los diagramas de radiación de la antena se han utilizado los programas GRASP8 (Capítulo 4) y Matlab R2015a. Mediante este último se emplearán los datos que proporciona GRASP8 para la posterior representación gráfica de los diagramas de radiación.

Es importante destacar el hecho de que para la banda K se utilizarán además los diagramas de radiación del alimentador medidos en la cámara anecoica pequeña, con el fin de evitar los problemas existentes de desalineamiento que se ponen de manifiesto en este capítulo.

El diseño de la antena se ha realizado para cumplir las recomendaciones de la ITU-R S.580-6. En este sentido se establecen una serie de recomendaciones a cumplir por las estaciones terrenas para la gestión de la órbita de los satélites geoestacionarios.

La ganancia de los lóbulos laterales de la antena, dependiendo de su longitud eléctrica, deben de cumplir una serie de recomendaciones en aras de lograr un uso eficiente del espectro radioeléctrico.

En cada uno de los diagramas de radiación secundarios que se muestran en este capítulo se realiza una comparativa con la recomendación de la ITU-R S.580-6.

En el siguiente capítulo se realizará una tabla resumen que presentará los valores obtenidos de las simulaciones de los diagramas de radiación secundarios, que se compararán con las especificaciones de la antena.

6.1 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN BANDA S

Para obtener los diagramas de radiación secundarios en esta banda, se han utilizado las medidas del alimentador de la cámara anecoica grande.

Las siguientes figuras representan las frecuencias, en banda S, correspondientes a RX (2.025GHz y 2.120GHz) y por otro lado las frecuencias correspondientes a TX (2.2GHz y 2.3GHz).

En cada uno de los diagramas de radiación aparecen 3 cortes phi (0° , 45° y 90°). El barrido en theta se realiza para el margen angular $-10^\circ < \theta < 10^\circ$, que incluye el lóbulo principal y los 5 primeros lóbulos secundarios.

Para la puerta P1 la componente copolar se corresponderá con la polarización LHCP, mientras que para la puerta P2 será la polarización RHCP.

6.1.1 Puerta P1

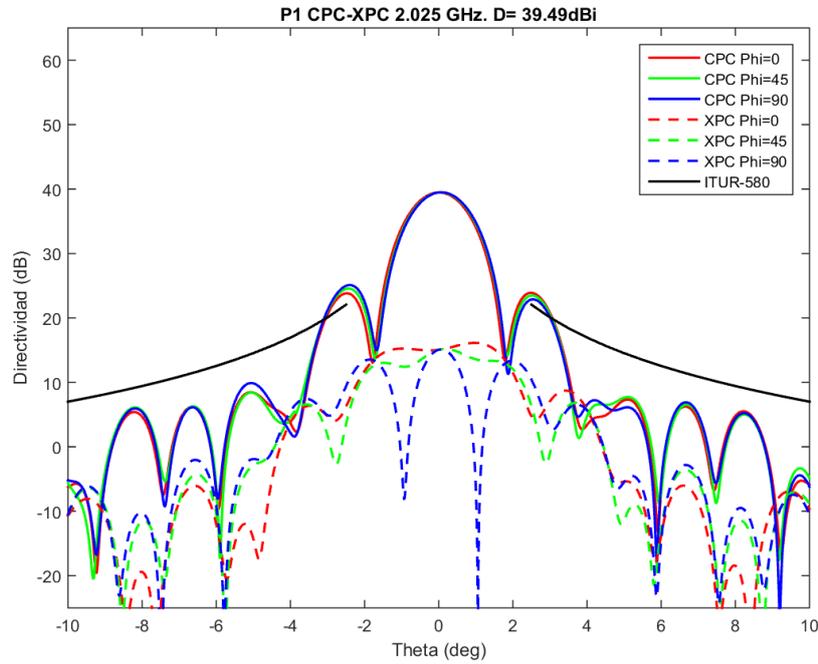


Figura 15 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.025GHz en P1 (RX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

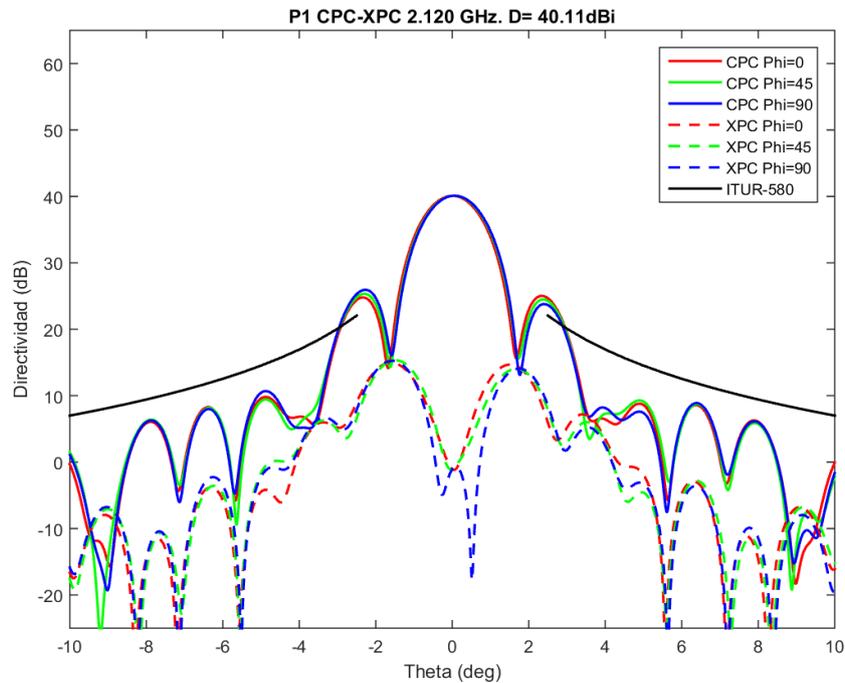


Figura 16 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.12GHz en P1 (RX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

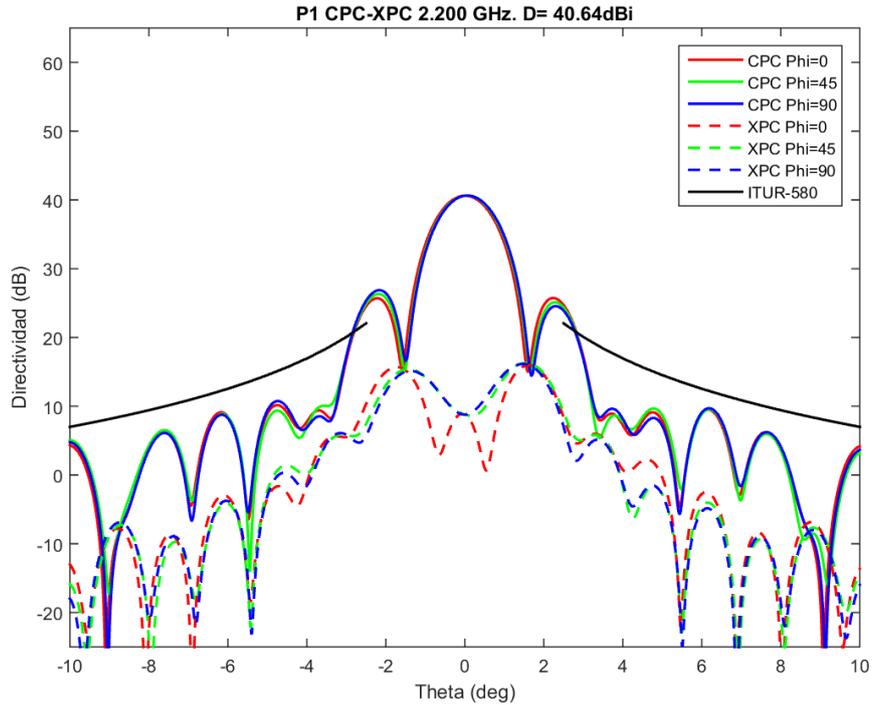


Figura 17 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.2GHz en P1 (TX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

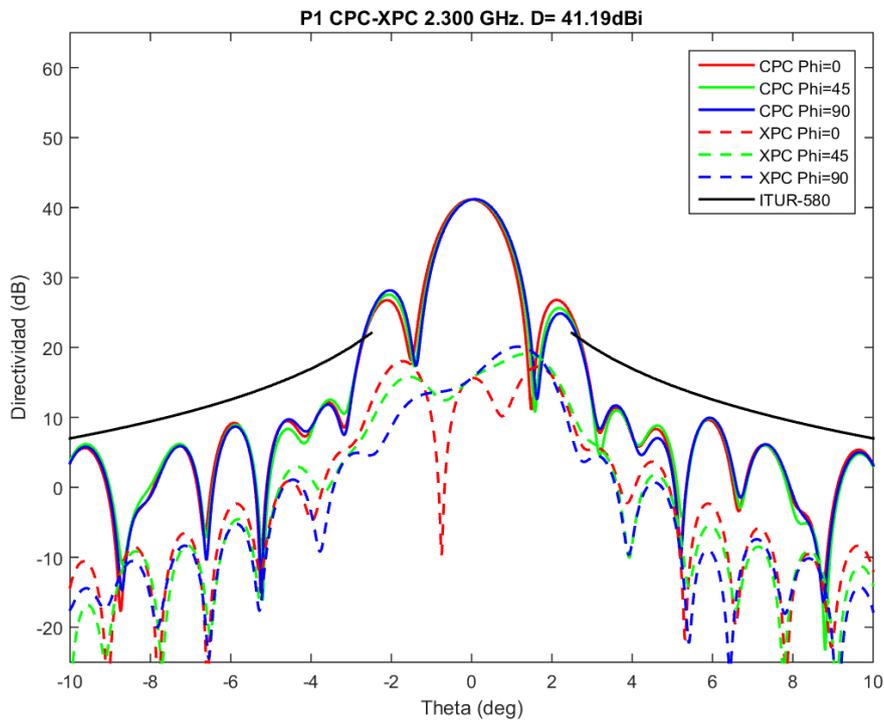


Figura 18 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.3GHz en P1 (TX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

En la siguiente tabla se pueden observar los valores más significativos que se obtienen de la representación de los diagramas de radiación secundarios para P1 (RX y TX):

FRECUENCIA (GHz)	DIRECTIVIDAD (dBi)	RELACIÓN CP/XP A -1dB (dB)
2.025	39.49	24.39
2.12	40.11	40.77
2.2	40.64	31.72
2.3	41.19	25.51

Tabla 1 Directividad y relación CP/XP en la puerta P1 (LHCP)

En cuanto al cumplimiento del gálibo de la ITU-R S.580-6, se observa que se cumple para todos los lóbulos secundarios.

6.1.2 Puerta P2

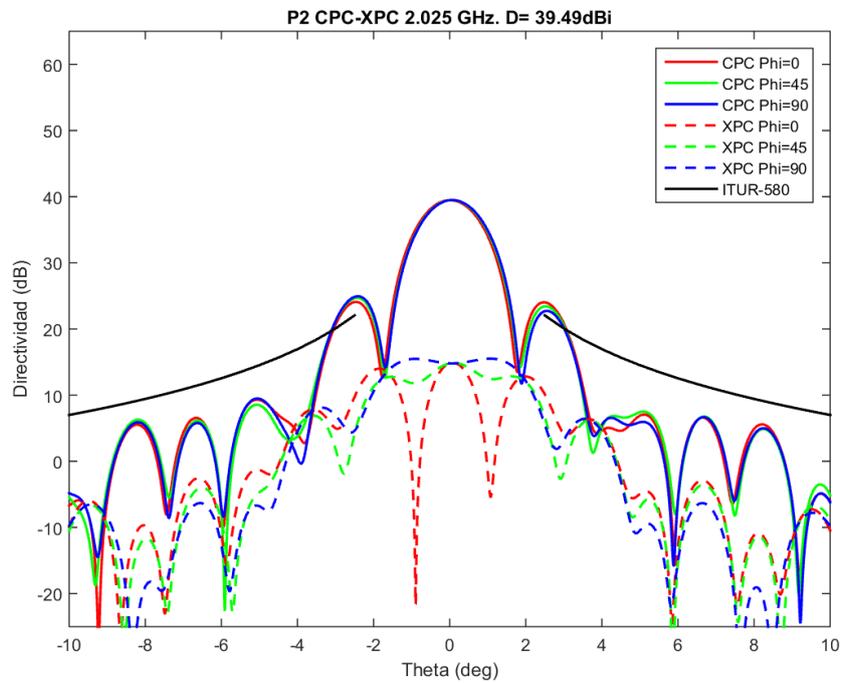


Figura 19 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.025GHz en P2 (RX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

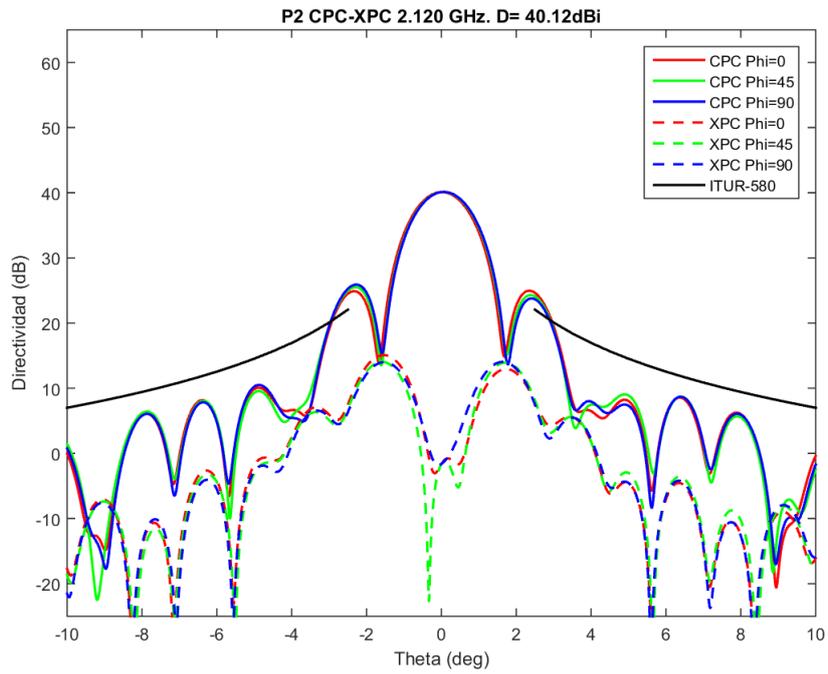


Figura 20 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.12GHz en P2 (RX.) Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

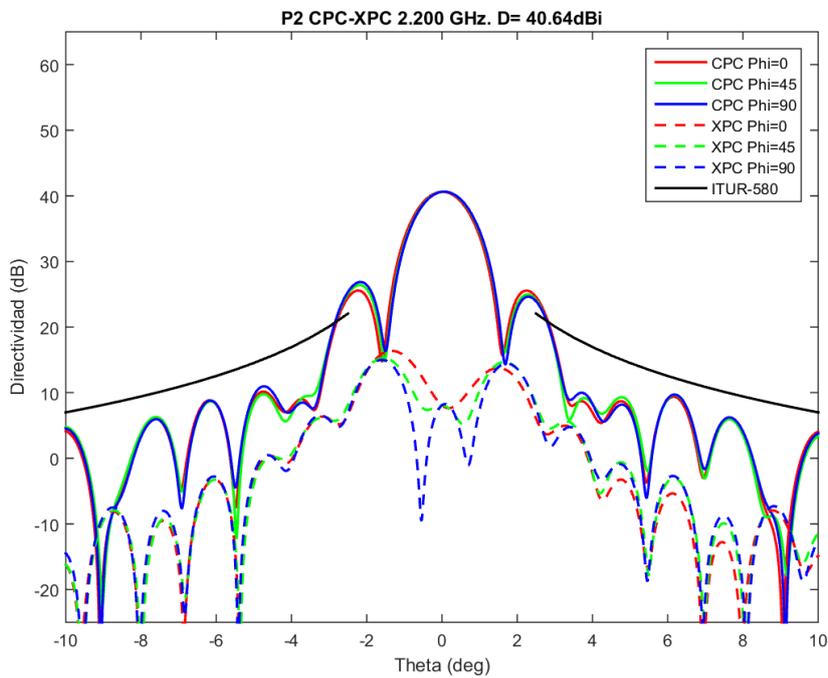


Figura 21 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.2GHz en P2 (TX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

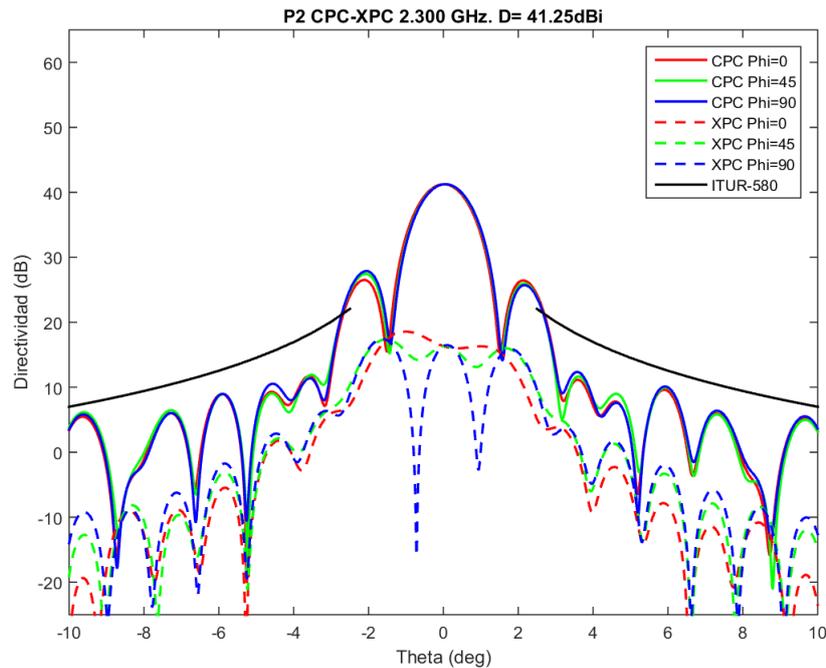


Figura 22 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 2.3GHz en P2 (TX). Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

Al igual que en la puerta P1, se observa el mismo comportamiento del diagrama de radiación en las diferentes frecuencias en cuanto a cumplimiento del gálibo de la ITU-R S.580-6.

A continuación se muestra una tabla con los valores más significativos obtenidos de los diagramas de radiación secundarios para las diferentes frecuencias.

FRECUENCIA (GHz)	DIRECTIVIDAD (dBi)	RELACIÓN CP/XP A -1dB (dB)
2.025	39.49	24.61
2.12	40.12	41.30
2.2	40.64	32.55
2.3	41.25	24.89

Tabla 2 Directividad y relación CP/XP en la puerta P2 (RHCP)

6.2 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN BANDA K

A la hora de obtener los diagramas de radiación secundarios para RX en banda K, se han utilizado los diagramas de alimentación medidos en la cámara anecoica grande.

Para los diagramas de radiación de Tracking se han utilizado además los diagramas de alimentador medidos en la cámara anecoica pequeña. Esto es debido a problemas de alineamiento de los posicionadores, al tratarse de una estructura pesada.

Los diagramas de radiación simulados tanto para RX como para Tracking se corresponden con las frecuencias: 25.5GHz, 26.25GHz y 27GHz.

Las siguientes figuras muestran:

- PD (RX): Puerta de recepción de datos utilizada por la antena, donde la componente copolar se corresponde con la RHCP
- PI (RX): Puerta de recepción de datos utilizada por la antena donde la componente copolar se corresponde con la LHCP.
- TD (Tracking Derecho): Puerta utilizada para el apuntamiento hacia el satélite. La componente copolar se corresponde con la RHCP.
- TI (Tracking Izquierdo): Puerta utilizada para el apuntamiento hacia el satélite. La componente copolar se corresponde con la LHCP.

En cada uno de los diagramas de radiación aparecen 3 cortes phi (0°, 45° y 90°). El barrido en θ se realiza para el margen angular $-5^\circ < \theta < 5^\circ$, que incluye el lóbulo principal y un número muy significativo de lóbulos secundarios. Comparativamente, se utiliza por lo tanto más resolución angular para representar los diagramas de radiación que en banda S. Esto es así debido a que la misión fundamental de la antena se centra en la banda K y es en ella en la que hay que verificar un estricto cumplimiento de las especificaciones.

6.2.1 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS EN RX

6.2.1.1 Puerta PD

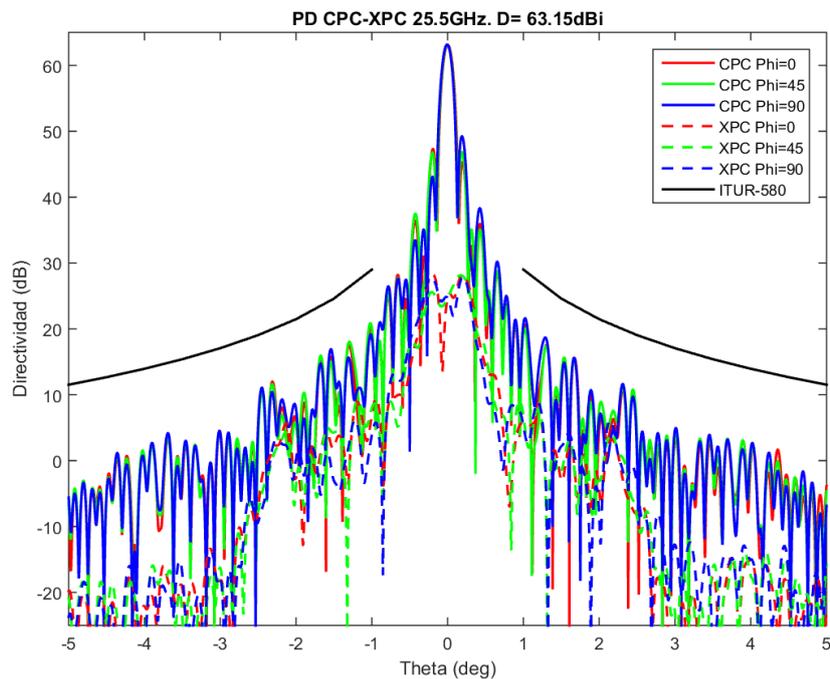


Figura 23 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 25.5GHz en PD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

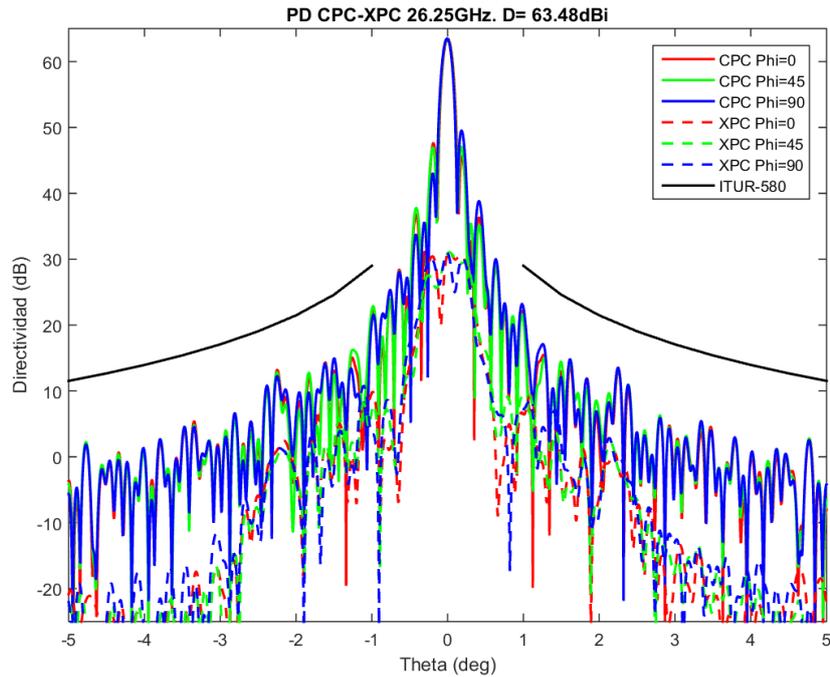


Figura 24 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 26.25GHz en PD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

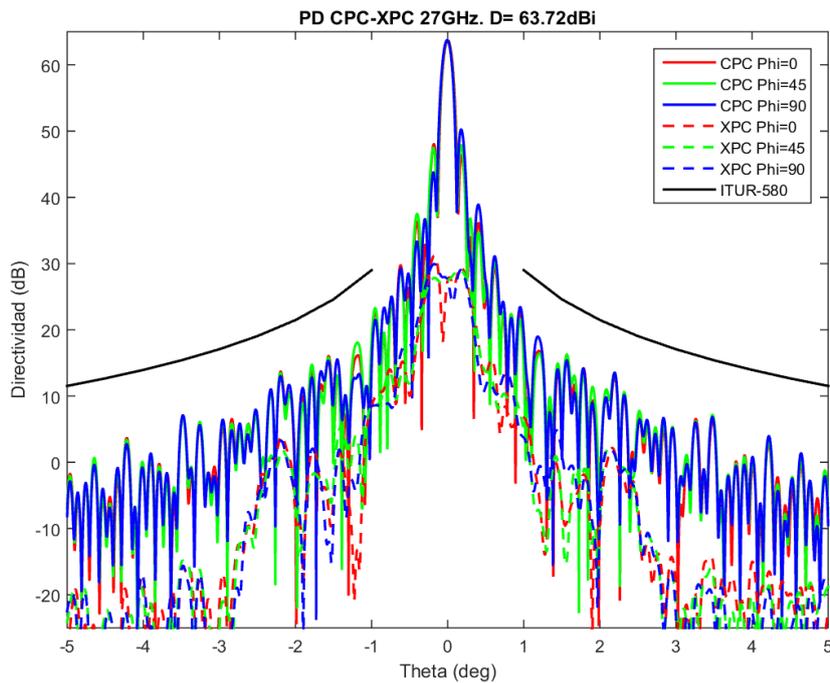


Figura 25 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 27GHz en PD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

Para analizar las figuras anteriores nos basaremos en los siguientes parámetros:

- Directividad
- Relación Copolar/Contrapolar
- Ancho de haz a -3dB

El ancho de haz a -3dB es importante para las comunicaciones con satélites, dado que junto con las características de los lóbulos secundarios determinan la mínima separación que ha de existir entre satélites y por lo tanto la utilización que ha de realizarse del espectro.

La relación Copolar/Contrapolar muestra el rechazo de la antena a la componente no deseada en torno al máximo de radiación/recepción, determinando la interferencia que se producirá a canales de satélites próximos con polarización contraria.

Los lóbulos secundarios cumplen el gálibo de la ITU-R S.580-6, como se observa en los diagramas de radiación de las figuras anteriores.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros mencionados para las diferentes frecuencias:

FRECUENCIA (GHz)	DIRECTIVIDAD (dBi)	RELACIÓN CP/XP (dB) A -1dB	ANCHO DE HAZ A -3dB (°)
25.5GHz	63.15	38.30	0.116
26.25GHz	63.48	32.55	0.112
27GHz	63.72	35.99	0.12

Tabla 3 Directividad, relación CP/XP y ancho de haz a -3dB en PD (RHCP)

Se observa además, que el máximo de recepción se produce para $\theta=0^\circ$, por lo que no se detecta un desapuntamiento significativo del diagrama medido del alimentador para los canales de RX.

6.2.1.2 Puerta PI

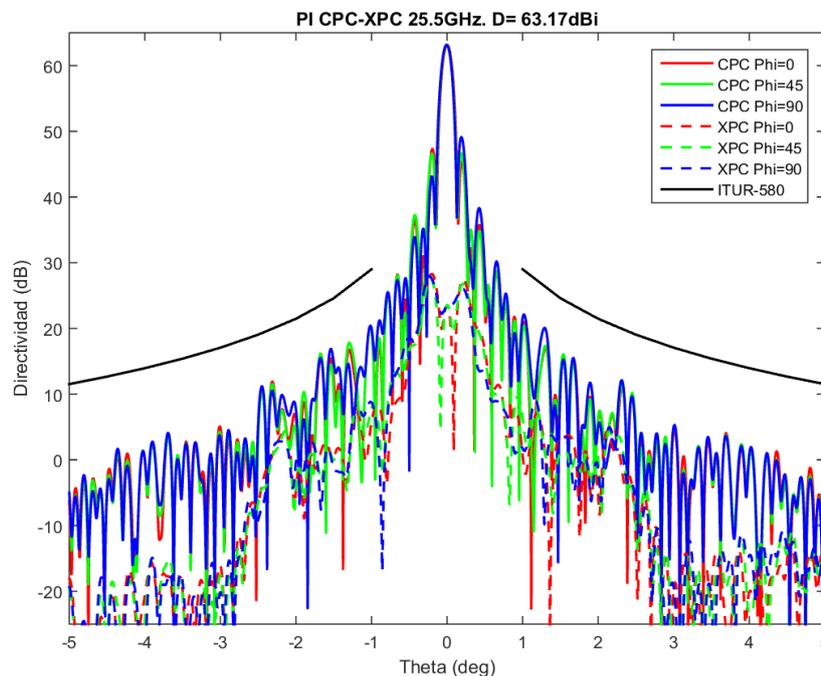


Figura 26 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 25.5GHz en PI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

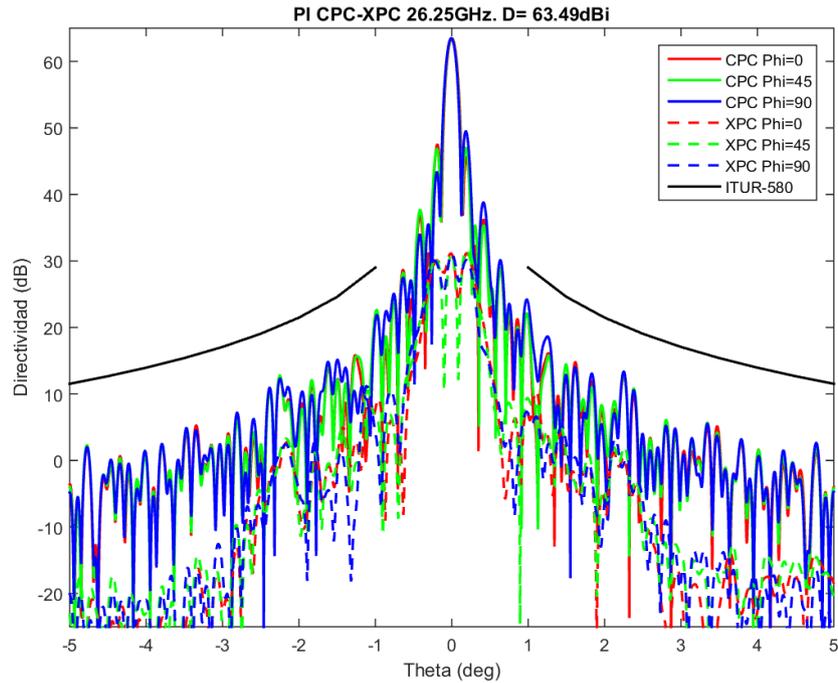


Figura 27 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 26.25GHz en PI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

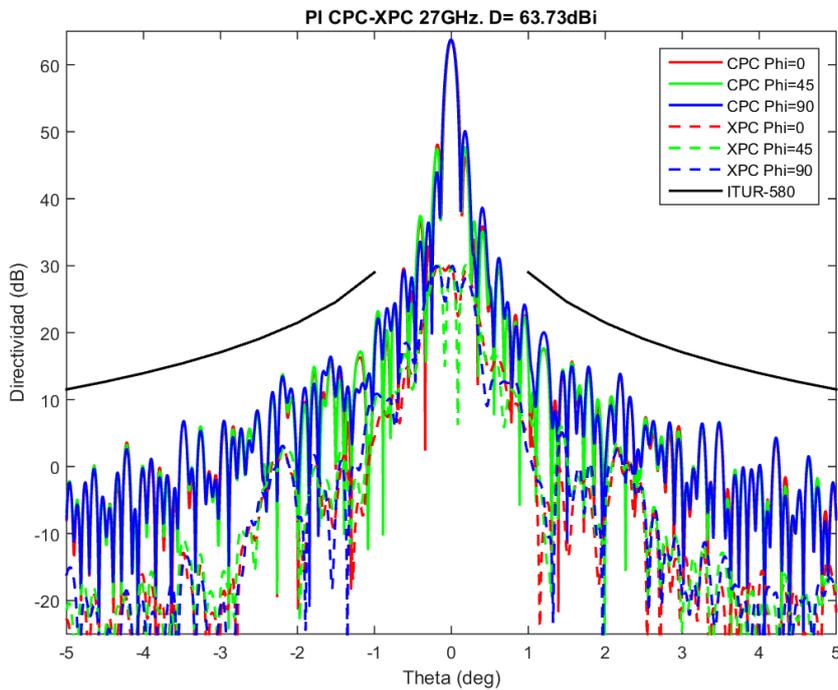


Figura 28 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 27GHz en PI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

Al igual que para la puerta PD, los parámetros obtenidos de los diagramas de radiación secundarios para las diferentes frecuencias serán los mismos.

Esta puerta presenta prácticamente las mismas características que la puerta PD, salvo que ahora la componente copolar será la LHCP en lugar de la RHCP. Además, se cumple también la especificación de la ITU-R S.580-6 en cuanto a lóbulos secundarios se refiere.

En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos de los diagramas de radiación:

FRECUENCIA (GHz)	DIRECTIVIDAD (dBi)	RELACIÓN CP/XP (dB) A -1dB	ANCHO DE HAZ A -3dB (°)
25.5	63.17	39.58	0.116
26.25	63.49	32.46	0.124
27	63.73	33.85	0.116

Tabla 4 Directividad, relación CP/XP y ancho de haz a -3dB en PI (LHCP)

Se observa de nuevo que el máximo de recepción se produce para $\theta=0^\circ$.

6.2.2 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS SIMULADOS PARA LAS PUERTAS DE TRACKING

Las puertas de Tracking, como ya se ha dicho en capítulos anteriores, se utilizan para realizar el apuntamiento preciso de la antena.

Para establecer la comunicación, en primer lugar se realiza un apuntamiento menos preciso con las puertas PD o PI (RX) y posteriormente mediante software se utiliza la puerta de Tracking para apuntar al satélite con mayor precisión.

En este sentido, los diagramas de radiación secundarios para las puertas de Tracking presentarán un mínimo abrupto en $\theta=0^\circ$ (salto de 180° en la fase del campo), para localizar con precisión al satélite. Sin embargo, a la hora de realizar las simulaciones, no se obtienen diagramas de radiación con el nulo centrado en $\theta=0^\circ$. Este problema es debido a que, al ser la estructura larga y muy pesada no se ha podido medir en la cámara anecoica pequeña y se ha tenido que montar un sistema esférico en la cámara anecoica grande, empleando el posicionador de acimut y colocando un posicionador de roll en el propio alimentador. Conseguir un buen alineamiento de este sistema es muy complejo, por lo que, a pesar de hacerlo con la mayor precisión que han permitido los instrumentos de alineamiento de que se dispone en la cámara, en la medida del alimentador se observa que el alineamiento no ha sido perfecto.

Cuando en GRASP8 se considera que el centro de fase del alimentador está en su boca ($x=0\text{mm}$, $y=0\text{mm}$ y $z=0\text{mm}$ en el sistema de coordenadas del alimentador, coincidente con el foco del reflector), en realidad la estructura estará ligeramente desalineada, y al tratarse de diagramas de radiación en los cuales el salto de fase de 180° debe producirse en $\theta=0^\circ$, variaciones angulares en azimut muy pequeñas respecto a la situación teórica, dan lugar a que los diagramas de radiación secundarios obtenidos tras la simulación no estén centrados.

En la siguiente figura se observa el efecto que tienen estas pequeñas variaciones angulares en la posición del salto de fase al simular los diagramas de radiación secundarios de la antena:

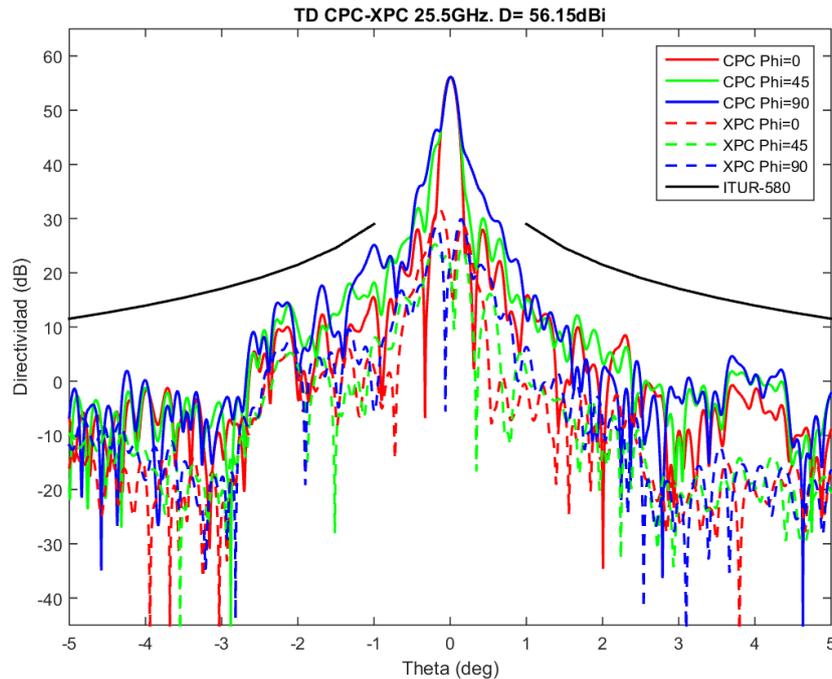


Figura 29 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena (sin modificar el centro de fases) a 25.5GHz en TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

Para solucionar este problema y centrar los diagramas de radiación, se ha modificado la referencia de fase del alimentador que se introduce como parámetro en GRASP8, buscando así corregir el problema de fase generado por el desalineamiento.

El alineamiento de los posicionadores con la antena se realizó para TI a la frecuencia de 25.5GHz. Por este motivo, en primer lugar se ajustó la referencia de fase que para esta puerta y a esa frecuencia, lograba centrar el diagrama de radiación.

Sin embargo, al utilizar esa misma referencia de fase para el resto de puertas y frecuencias, el resto de diagramas no se ajustaba a lo esperado. Esto es debido a que cada frecuencia de cada puerta se mide por separado, de forma que pueden existir pequeñas variaciones en el centro de fases entre diferentes puertas y frecuencias.

Para ajustar la referencia de fase del alimentador en Tracking, se ha utilizado como sistema de representación del campo las coordenadas polares, buscando precisión angular. Para ello nos hemos basado en la descomposición u,v :

$$u = \text{sen}(\theta) \cos(\phi)$$

$$v = \text{sen}(\theta)\text{sen}(\phi)$$

La precisión utilizada en la coordenada ϕ ha sido de 1° , desde $\phi=0^\circ$ hasta $\phi= 360^\circ$. La precisión utilizada para la coordenada θ ha sido de 0.00005° , desde $\theta=0^\circ$ hasta $\theta=0.01^\circ$. La precisión de la coordenada θ se justifica por lo comentado con anterioridad, dado que pequeños

desalineamientos angulares en θ dan lugar a grandes variaciones del campo debido a que el salto de fase de 180° no se produce en $\theta=0^\circ$.

Una vez que el diagrama ha sido centrado, para la representación en polares de la figura, se ha elegido un margen angular en θ de 0.3° , dado que de esa forma se observará el máximo y el nulo del diagrama de radiación.

6.2.2.1 Representación polar del diagrama de radiación en TD y TI

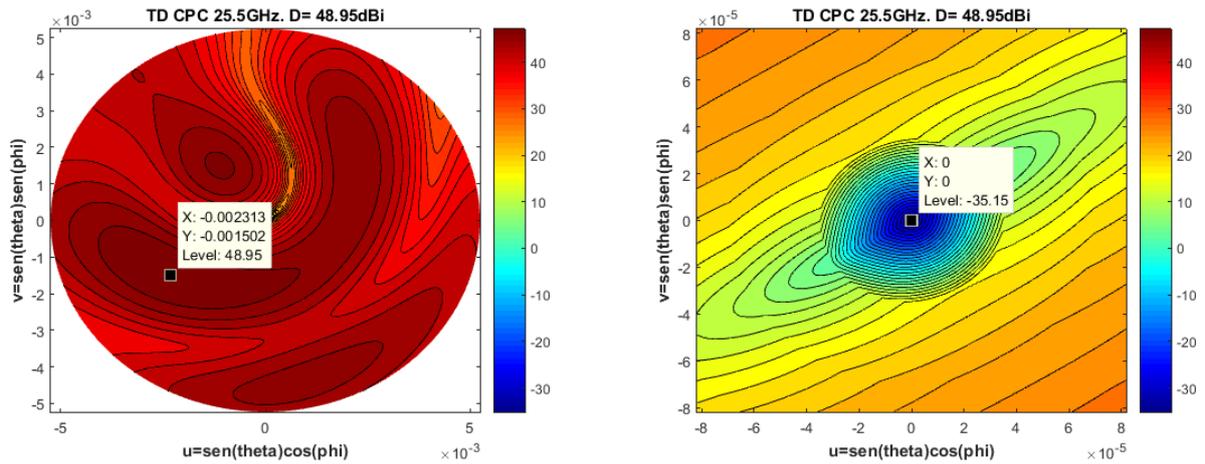


Figura 30 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 25.5GHz en TD. Máximo y Nulo

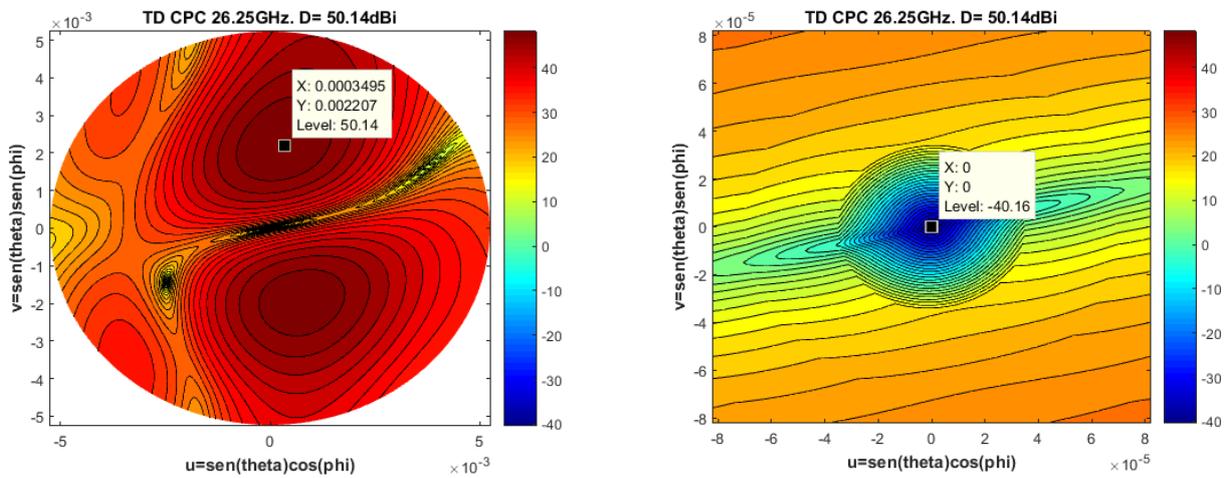


Figura 31 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 26.25GHz en TD. Máximo y Nulo

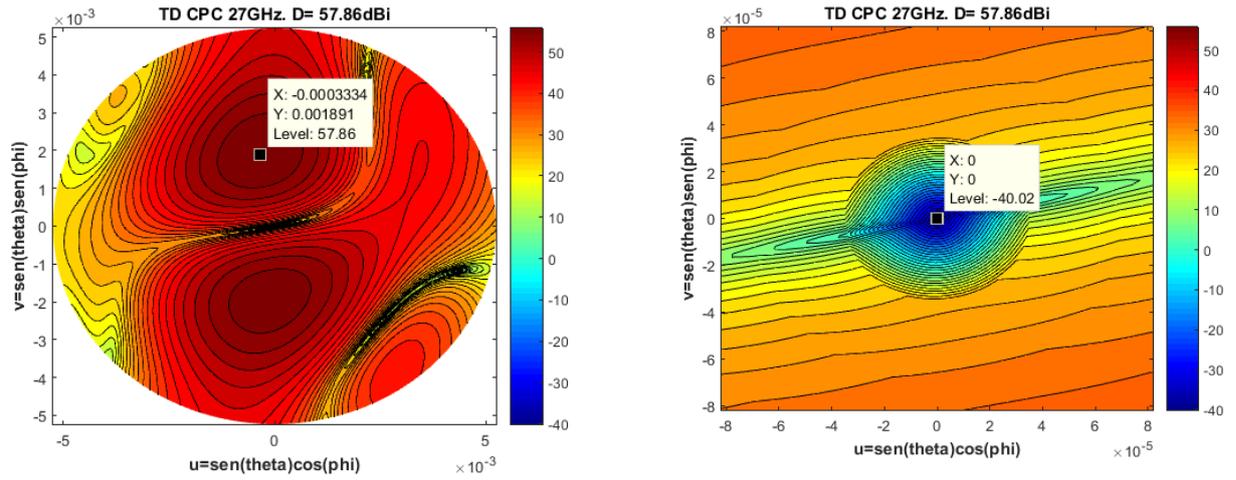


Figura 32 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 27GHz en TD. Máximo y Nulo

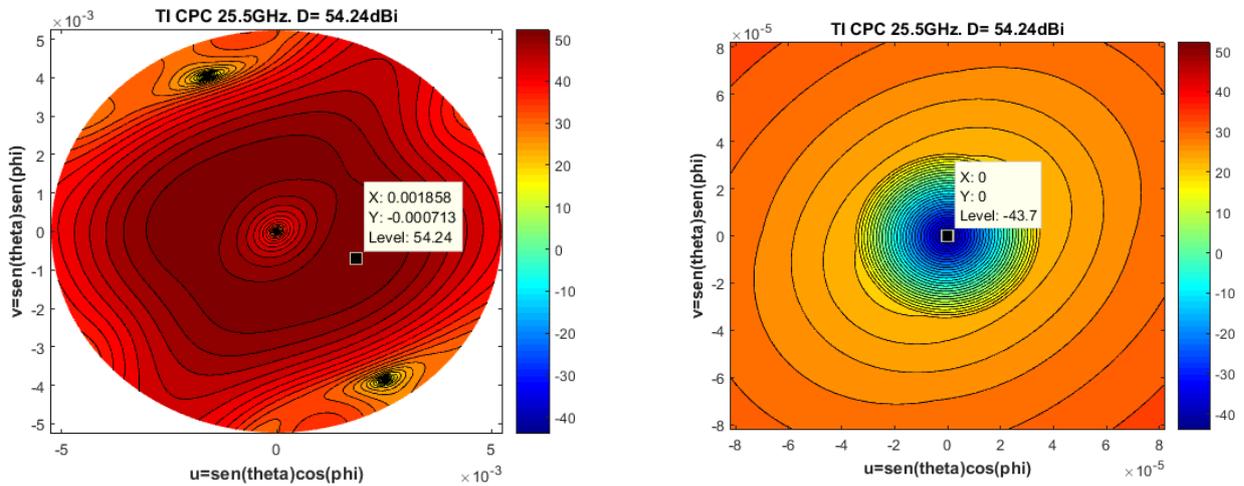


Figura 33 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 25.5GHz en TI. Máximo y Nulo

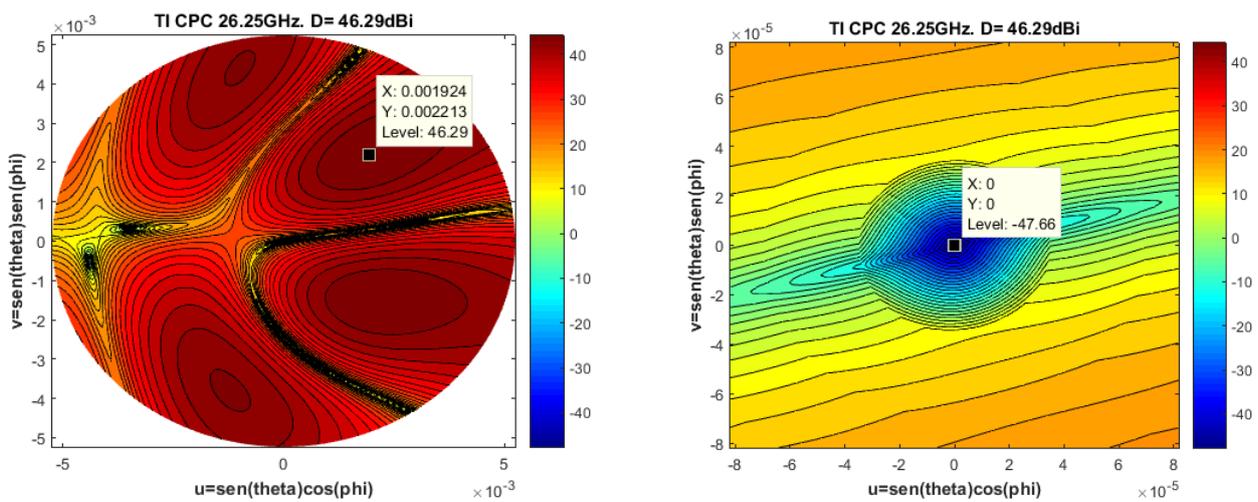


Figura 34 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 26.25GHz en TI. Máximo y Nulo

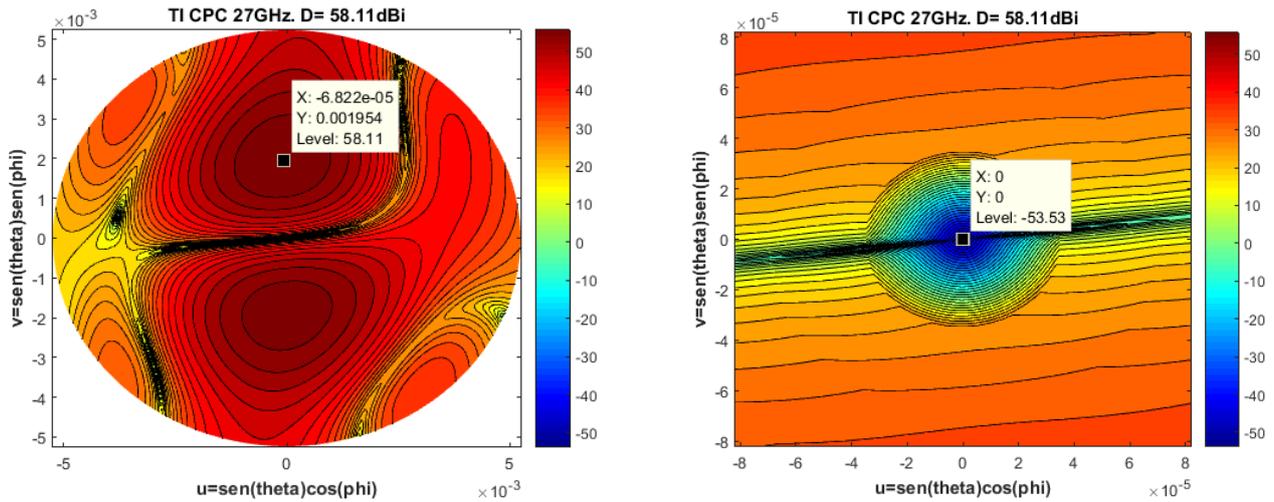


Figura 35 Diagrama de radiación copolar en coordenadas polares a 27GHz en TI. Máximo y Nulo

A continuación se muestra una tabla con los valores corregidos de la referencia de fase de cada puerta y de cada frecuencia:

FRECUENCIA (GHz)	TD (RHCP)	TI (LHCP)
	CORRECCIÓN DEL CENTRO DE FASE	
25.5	x=-6.90854mm, y=8.46327mm, z=0.0 mm	x=-0.4374mm, y=-0.4872mm, z=0.0 mm
26.25	x=1.9108mm, y=1.0529mm, z=0.0 mm	x=9.2857mm, y=1.824mm, z=0.0 mm
27	x=-1.5842mm, y=0.7558mm, z=0.0 mm	x=-0.6427mm, y=0.83576mm, z=0.0 mm

Tabla 5 Valores de la corrección de la referencia de fase para Tracking (TD y TI)

Se ha modificado la referencia de fase únicamente en las componentes x e y, debido a que no se ha conseguido alinear perfectamente el plano de la boca de la bocina.

En cuanto a los valores de los máximos y nulos, quedan recogidos en la siguiente tabla:

FRECUENCIA (GHz)	TD (RHCP)	TI (LHCP)
	MÁXIMO (dBi)	
25.5	48.95	54.24
26.25	50.14	46.29
27	57.86	58.11
NULO (dBi)		
25.5	-35.15	-43.7
26.25	-40.16	-47.66
27	-40.02	-53.53

Tabla 6 Máximos y nulos para Tracking (TD y TI)

6.2.2.2 Tracking derecho (TD)

En las siguientes figuras se muestran los diagramas de radiación 1D para diferentes cortes ϕ de Tracking Derecho, una vez que se ha ajustado la referencia de fases del alimentador.

Se observa un mínimo abrupto centrado, en comparación con la Figura 29, en la cual el desalineamiento produce diagramas descentrados, principalmente debido al error de fase introducido.

Aun centrando los diagramas, y corrigiendo el error de fase, se puede observar que los diferentes cortes $\phi = \text{cte}$ están desbalanceados. Este efecto se minimiza si el alimentador en banda K se mide en la cámara anecoica pequeña, como se mostrará más adelante.

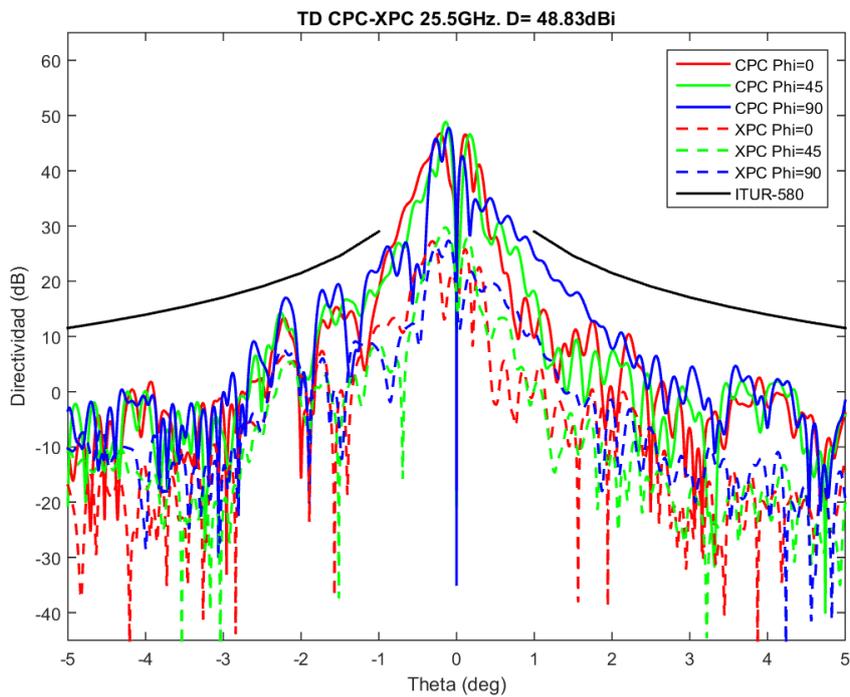


Figura 36 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 25.5GHz en TD. Cortes $\phi = 0^\circ$, $\phi = 45^\circ$, $\phi = 90^\circ$

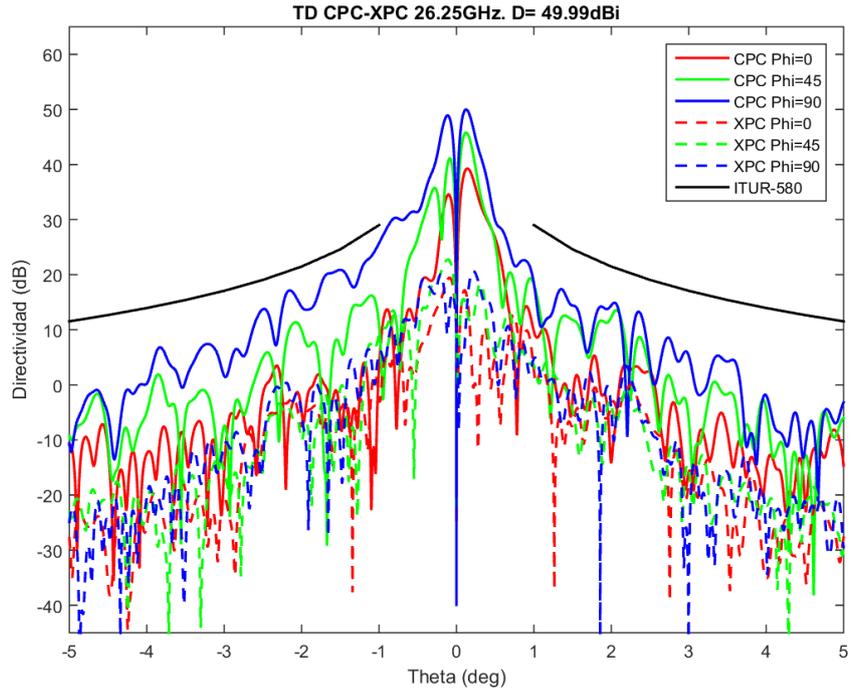


Figura 37 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 26.25GHz en TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

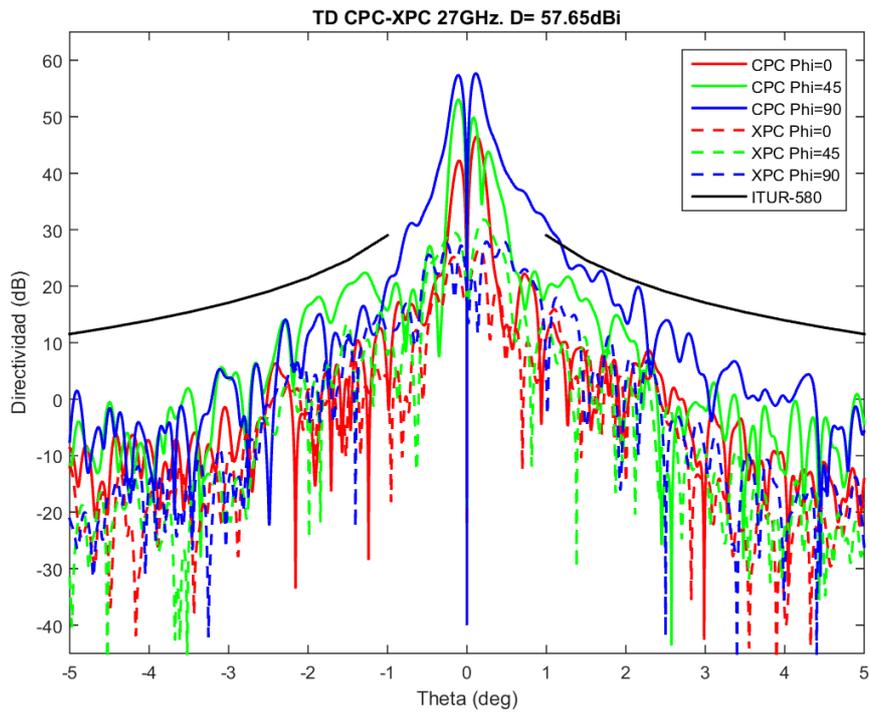


Figura 38 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 27GHz en TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

6.2.2.3 Tracking izquierdo (TI)

Al igual que en TD, se muestran los diagramas de radiación una vez ajustada la referencia de fase del alimentador.

Dado que el alineamiento de los posicionadores en la cámara anecoica se realizó para la puerta TI a 25.5GHz, en la Figura 39 no se observa prácticamente desbalanceo entre los diferentes cortes ϕ . Sin embargo, las demás frecuencias sufren desequilibrios entre los diferentes cortes ϕ , al igual que en las puertas de TD.

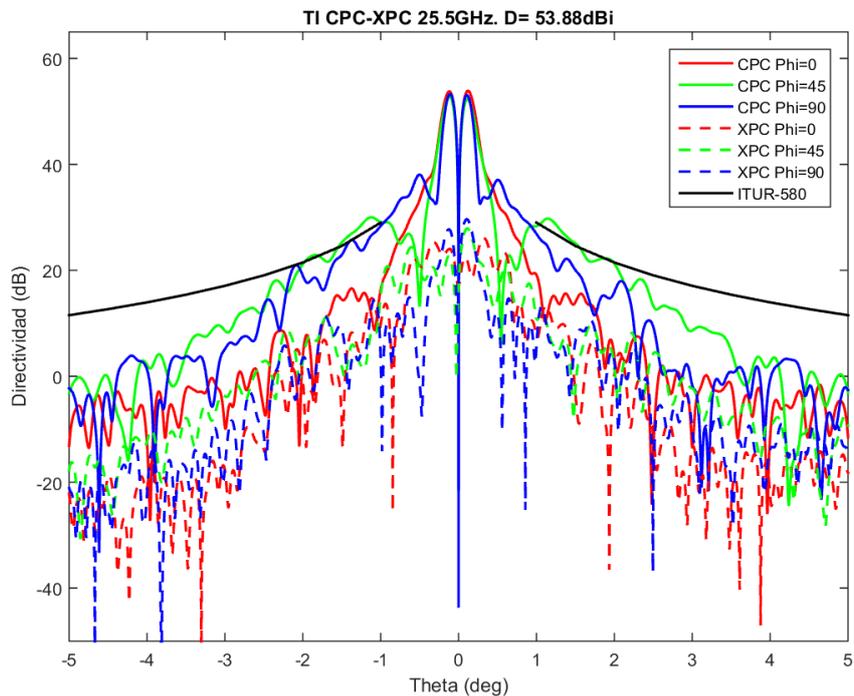


Figura 39 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 25.5GHz en TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

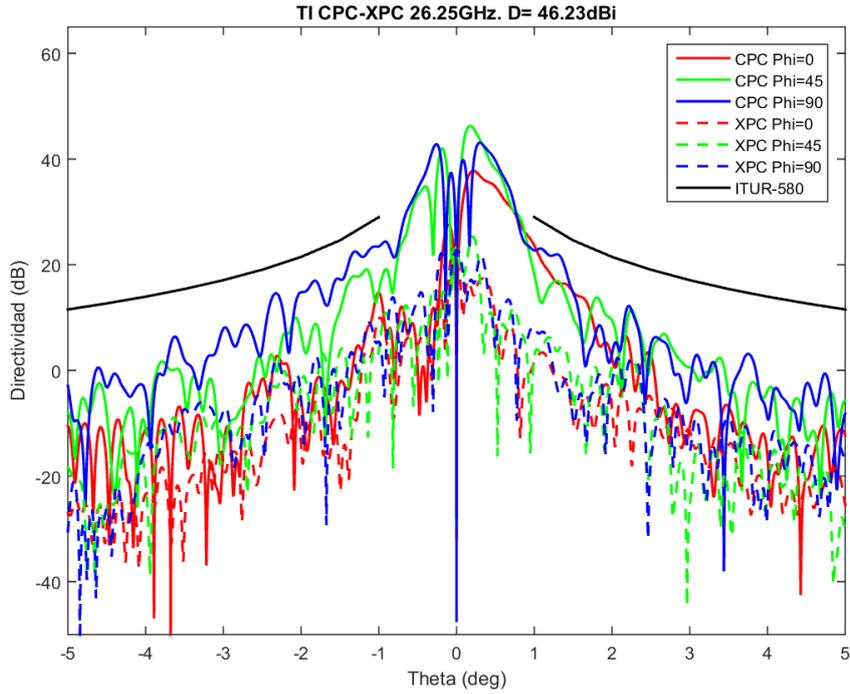


Figura 40 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 26.25GHz en TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

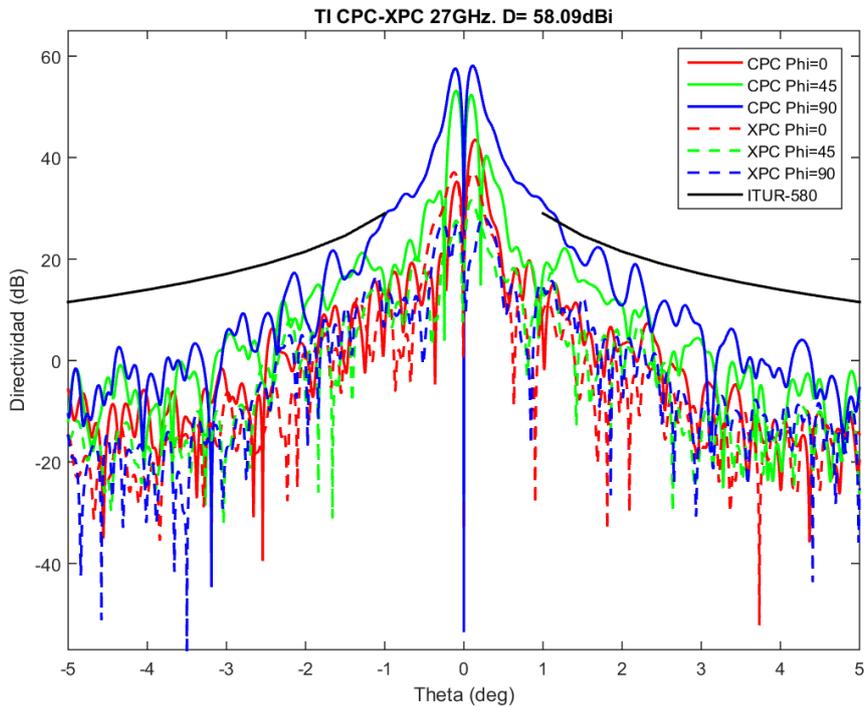


Figura 41 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 27GHz en TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

6.2.2.4 Corrección de desequilibrios en Tracking

A continuación se muestran dos figuras ilustrando el efecto que sobre los diagramas de radiación secundarios tiene el utilizar los diagramas de alimentador medidos en la cámara anecoica pequeña.

Estas medidas no sirven para obtener resultados finales de nuestra antena, dado que únicamente se ha medido la parte del alimentador correspondiente a la banda K. Pero si nos sirven para observar como cuando la medida se realiza de forma precisa, minimizando los desalineamientos propios de una estructura larga y pesada, los diagramas obtenidos para los diferentes cortes ϕ están menos desequilibrados.

Para estas simulaciones también ha sido necesario centrar los diagramas de radiación, pues aun midiendo únicamente la banda K (estructura menos pesada), se siguen produciendo desalineamientos. La diferencia radica en que los diagramas de radiación secundarios están menos desequilibrados que cuando se utilizan las medidas del alimentador (toda la estructura) en la cámara anecoica grande.

De las posibles frecuencias y figuras se han elegido TD a 25.5GHz (Figura 36), y TI a 26.25GHz (Figura 40), dado que se observa con claridad una mejora significativa de los diagramas de radiación en cuanto a desbalanceo entre los diferentes cortes ϕ .

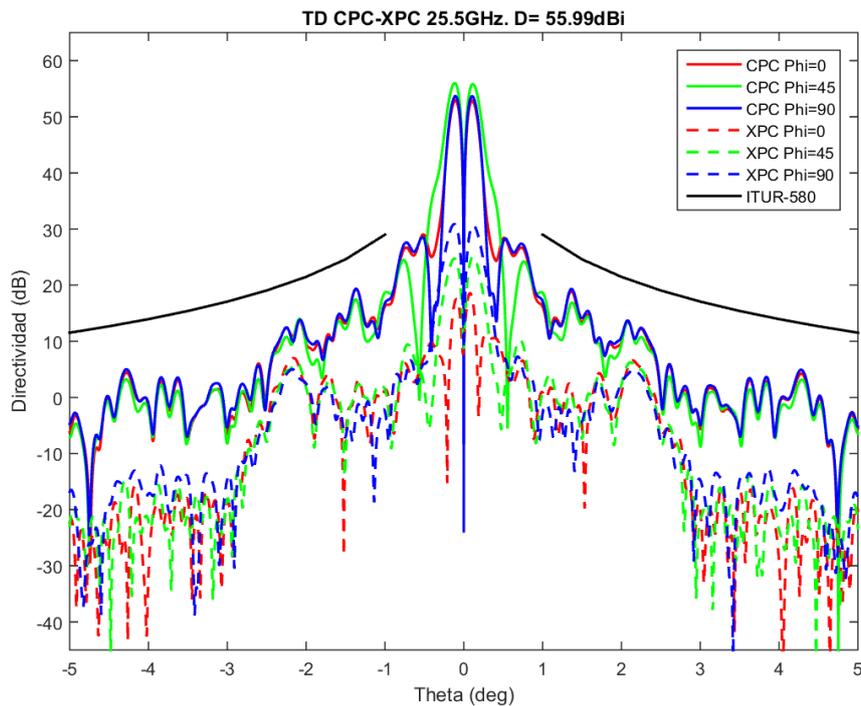


Figura 42 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 25.5GHz en TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$. Alimentador medido en cámara anecoica pequeña

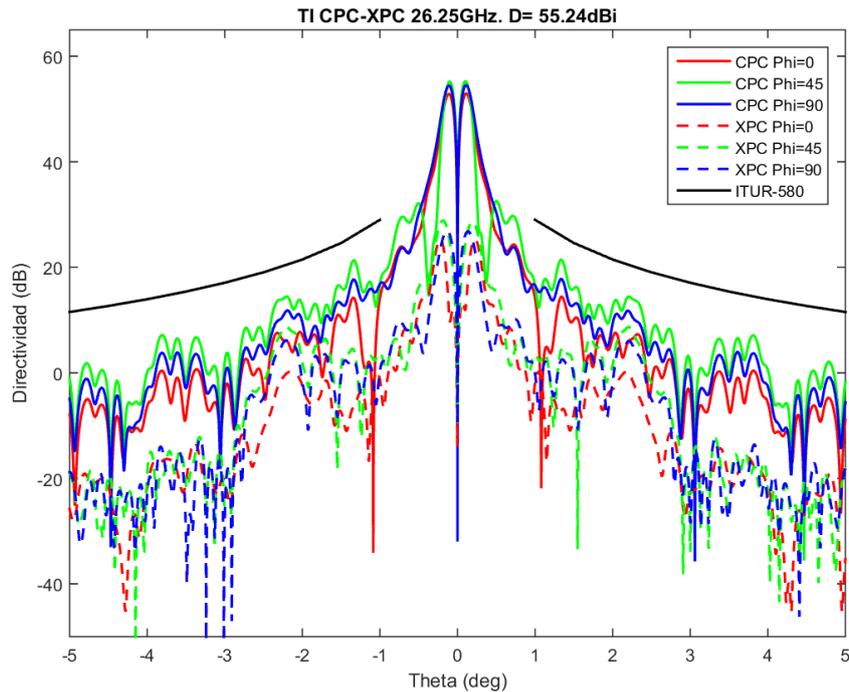


Figura 43 Diagrama de radiación copolar y contrapolar de la antena a 26.25GHz en TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$. Alimentador medido en cámara anecoica pequeña

6.3 DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS RX/TRACKING

En el siguiente apartado se muestran los diagramas de radiación de RX y Tracking, para cada puerta y frecuencia, superpuestos en la misma gráfica. De esta forma, se pueden comparar con mayor facilidad algunos valores de las especificaciones de la antena con los obtenidos en las simulaciones de los diagramas de radiación secundarios.

Los parámetros se representan con un margen angular de 0.4° en θ ($-0.2^\circ < \theta < 0.2^\circ$), suficiente para observar con claridad los valores deseados. Del análisis de los diagramas de radiación se obtienen los siguientes datos:

- Max Sum/Max Delta: Relación entre el máximo del diagrama de radiación de RX y el máximo del diagrama de radiación de las puertas de Tracking.
- Max Sum/Min Delta: Relación entre el máximo del diagrama de radiación de RX y el mínimo del diagrama de radiación de las puertas de Tracking.

Estos valores servirán para determinar el buen funcionamiento de las puertas de Tracking en las diferentes frecuencias.

6.3.1 Diagramas de radiación secundarios PD/TD

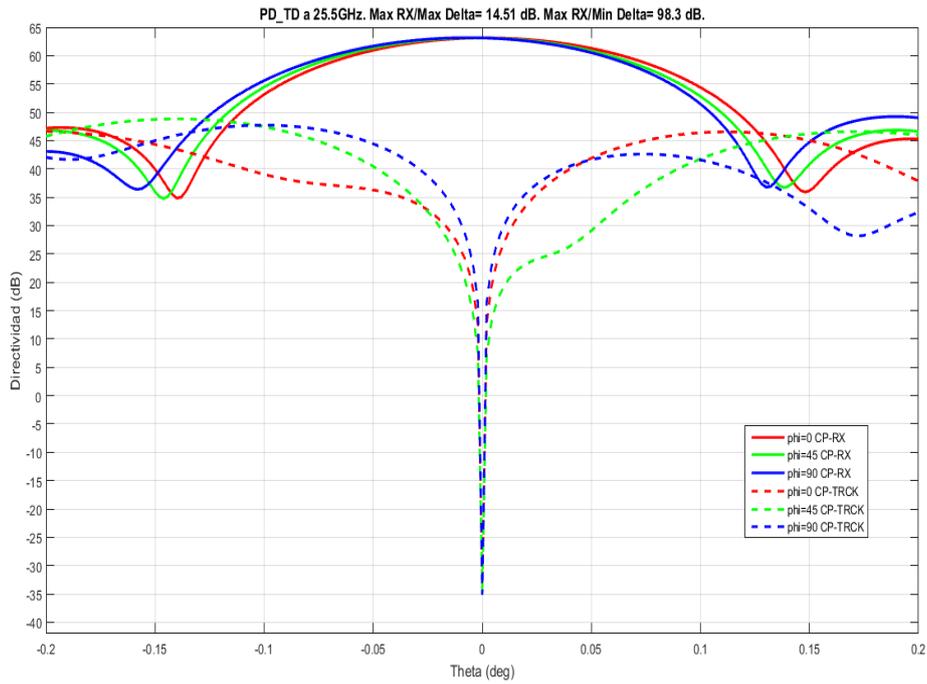


Figura 44 Diagrama de radiación copolar de la antena a 25.5GHz .PD/TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

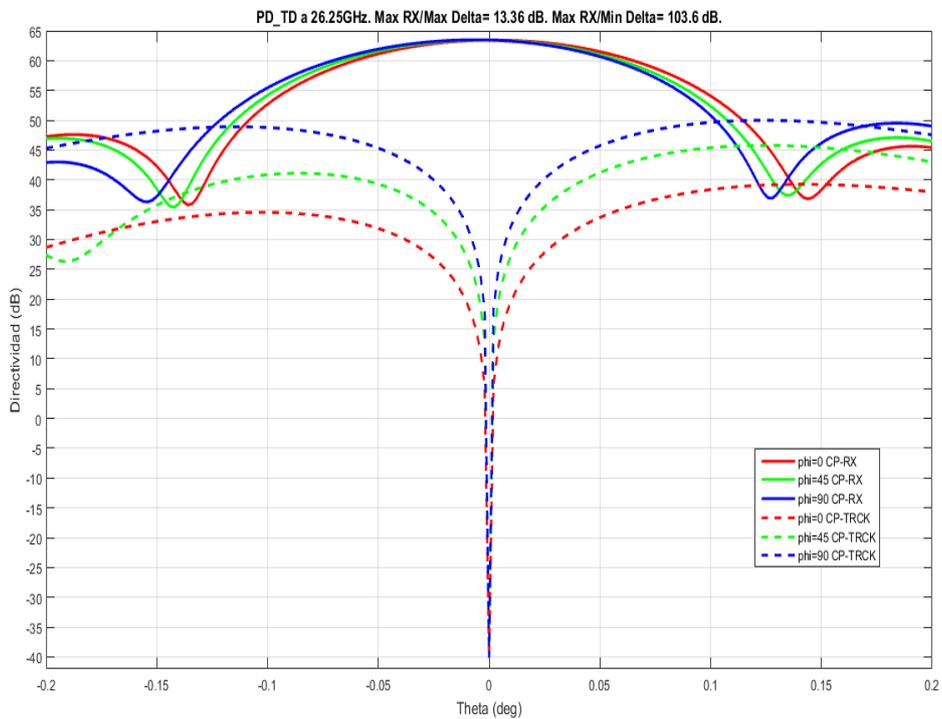


Figura 45 Diagrama de radiación copolar de la antena a 26.25GHz .PD/TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

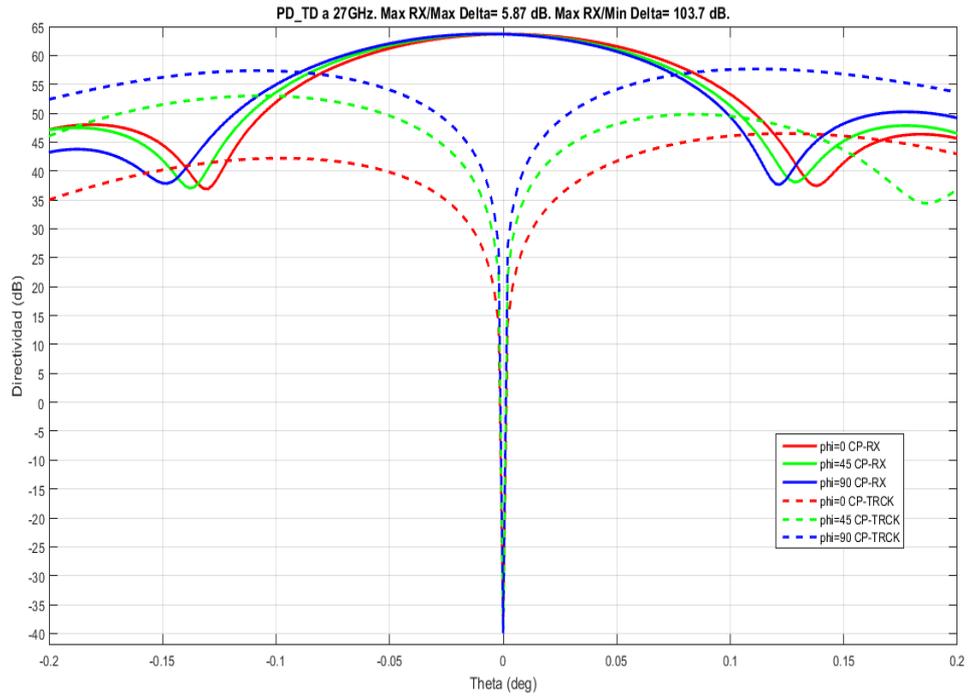


Figura 46 Diagrama de radiación copolar de la antena a 27GHz .PD/TD. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

En la siguiente tabla se recogen los datos más importantes de estos diagramas de radiación, que se compararán con los valores de especificaciones de la antena en el siguiente capítulo.

FRECUENCIA (GHz)	MAX SUM/MAX DELTA (dB)	MAX SUM/MIN DELTA (dB)
25.5	14.51	98.3
26.25	13.86	103.6
27	5.87	103.7

Tabla 7 Max Sum/Max Delta y Max Sum/Min Delta para PD/TD

6.3.2 Diagramas de radiación secundarios PI/TI

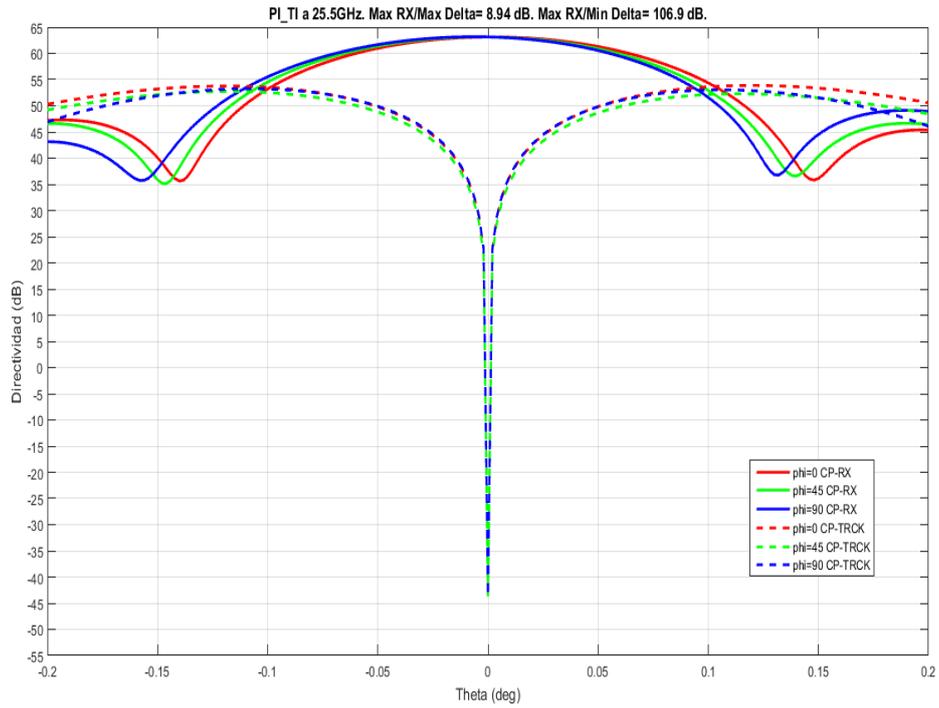


Figura 47 Diagrama de radiación copolar de la antena a 25.5GHz .PI/TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

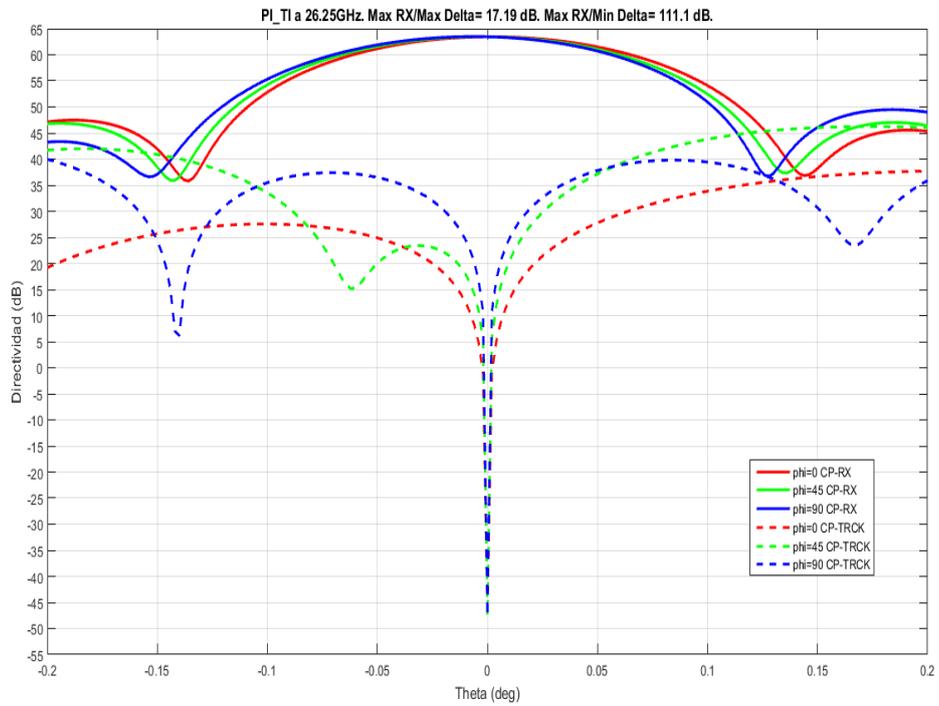


Figura 48 Diagrama de radiación copolar de la antena a 26.25GHz .PI/TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

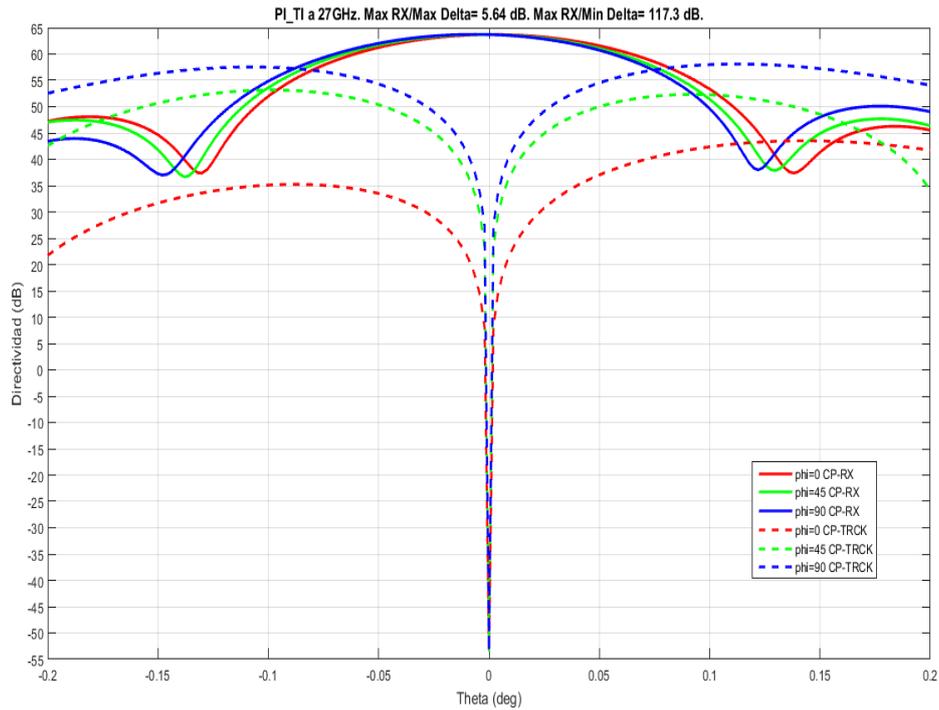


Figura 49 Diagrama de radiación copolar de la antena a 27GHz .PI/TI. Cortes $\phi=0^\circ$, $\phi=45^\circ$, $\phi=90^\circ$

En la siguiente tabla se muestran los parámetros Max Sum/Max Delta y Max Sum/Min Delta de la comparación entre las puertas PI y TI para las diferentes frecuencias:

FRECUENCIA (GHz)	MAX SUM/MAX DELTA (dB)	MAX SUM/MIN DELTA (dB)
25.5	8.94	106.9
26.25	17.19	111.1
27	5.64	117.3

Tabla 8 Max Sum/Max Delta y Max Sum/Min Delta para PI/TI

7 RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LOS DIAGRAMAS DE RADIACIÓN SECUNDARIOS

Los resultados obtenidos a partir de los diagramas de radiación secundarios se mostrarán en una tabla resumen. En la tabla aparecen estos resultados comparados con los valores de las especificaciones propias de la antena que se ha diseñado.

BANDA S			
DIRECTIVIDAD (dBi)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (P2)	LHCP (P1)
2.025	39.8	39.49	39.49
2.12	40.3	40.12	40.11
2.2	40.8	40.64	40.64
2.3	41.2	41.25	41.19
RELACIÓN CP/XP A -1dB (dB)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (P2)	LHCP (P1)
2.025	24.7	24.61	24.39
2.12	24.7	41.3	40.77
2.2	24.7	32.55	31.72
2.3	24.7	24.89	25.51
BANDA K (RX Y TRACKING)			
DIRECTIVIDAD (dBi)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (PD)	LHCP (PI)
25.5	63.1	63.15	63.17
26.25	63.4	63.48	63.49
27	63.8	63.72	63.73
RELACIÓN CP/XP A -1dB (dB)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (PD)	LHCP (PI)
25.5	30.7	38.3	39.58
26.25	30.7	32.55	32.46
27	30.7	35.99	33.85
MAX SUM/MAX DELTA (dB)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (PD/TD)	LHCP (PI/TI)
25.5	10	14.51	8.94
26.25	10	13.86	17.19
27	10	5.87	5.64
MAX SUM/MIN DELTA (dB)			
FRECUENCIA(GHz)	ESPECIFICACIÓN	RHCP (PD/TD)	LHCP (PI/TI)
25.5	40	98.3	106.9
26.25	40	103.6	111.1
27	40	103.7	117.3

Tabla 9 Resumen de resultados de los diagramas de radiación secundarios en comparación con las especificaciones de la antena

Se puede observar en la tabla anterior, que la mayoría de los valores simulados de la antena cumplen con las especificaciones. Los únicos datos que varían significativamente con respecto a las especificaciones son la relación MAX SUM/MAX DELTA (dB) para las puertas TD y TI a

27GHz. Este valor es consecuencia del desbalanceo que se produce entre los diferentes cortes como ya se explicó en el capítulo anterior.

Como estimación de la eficiencia de la antena, se comparará la directividad obtenida en las simulaciones de los diagramas de radiación secundarios mediante GRASP8, con los valores teóricos que se obtendrían si la eficiencia fuese del 100%, haciendo uso de la expresión:

$$D = \frac{\pi^2 D^2}{\lambda^2}$$

EFICIENCIA		
FRECUENCIA(GHz)	RHCP (P2)	LHCP (P1)
2.025	0.549	0.549
2.12	0.579	0.578
2.2	0.606	0.606
2.3	0.639	0.630
FRECUENCIA(GHz)	RHCP (PD)	LHCP (PI)
25.5	0.805	0.808
26.25	0.819	0.821
27	0.818	0.820

Tabla 10 Eficiencia estimada para las diferentes puertas en banda S y banda K (RX)

8 CONCLUSIONES

Los objetivos fijados para este Trabajo Fin de Grado eran:

- Simulación de los diagramas de radiación secundarios de la antena.
- Cumplimiento de las especificaciones fijadas por parte de la antena en cuanto a directividad y relación CP-XP en banda S y K.
- Correcto funcionamiento de las puertas de Tracking.
- Cumplimiento del gálibo de la ITU-R S.580-6.

Tras lo expuesto en el documento, y de acuerdo con los datos obtenidos y las comparaciones realizadas, las conclusiones finales son:

De los resultados obtenidos en las simulaciones de los diagramas de radiación secundarios se observa en casi todos los casos una buena correspondencia con los valores fijados en las especificaciones, incluso se superan las especificaciones en la mayoría de los casos. Además el gálibo de la ITU-R S.580-6 también se cumple para todas las puertas y frecuencias que han sido simuladas, por lo que se puede corroborar que el diseño ha sido el óptimo.

Sin embargo, la mayor complicación a la hora de realizar este Trabajo Fin de Grado, ha sido el centrado de los diagramas de radiación secundarios de Tracking, teniendo en cuenta los problemas surgidos a la hora de medir el alimentador en la cámara anecoica grande.

En este sentido, ha quedado patente la enorme dificultad existente a la hora de medir con absoluta precisión los diagramas de radiación de determinadas estructuras en la cámara anecoica. En este caso se trata de una estructura muy larga y pesada, lo cual ha derivado en un error de fase en la medida de los diagramas de radiación del alimentador, que aunque no ha tenido repercusión en banda S y en las puertas de RX para banda K, sí lo ha tenido para las puertas de Tracking.

Una vez superado este problema, corrigiendo la fase de los diagramas de radiación del alimentador en Tracking y centrando así los diagramas secundarios con la mayor precisión posible, se puede asegurar que la antena receptora de estación terrena cumple con los objetivos marcados.

Por lo tanto, la antena permite un uso eficiente del espectro radioeléctrico en la gestión de las órbitas de los satélites geoestacionarios y un correcto apuntamiento hacia los mismos.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sputnik I - Wikipedia, la enciclopedia libre.html.
- [2] Sputnik II - Wikipedia, la enciclopedia libre.html.
- [3] Explorer 1 - Wikipedia, la enciclopedia libre.html.
- [4] TIROS-I - Wikipedia, la enciclopedia libre.html.
- [5] A. Cardama, L. Jofre, J.M. Rius, J. Romeu, S. Blanch, M. Ferrando, "Antenas" Edicions UPC, 2002.
- [6] National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Intitute of Medicine, National Research Council, "Earth Observations from Space: The First 50 Years of Scientific Achievements", 2008.
- [7] Apuntes de la asignatura Antenas de la UPM. <http://www.gr.ssr.upm.es/antenas/>
- [8] Frank Jensen, "Reference Manual for GRASP8" TICRA Engineering Consultants, 2002.
- [9] Knud Pontoppidan , "Technical Description of GRASP8" TICRA Engineering Consultants, 2002.
- [10] Frank Jensen, "User's Manual for GRASP8" TICRA Engineering Consultants, 2002.
- [11] Merrill I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems" McGRAW-HILL INTERNATIONAL EDITIONS, 1981.