



ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES

Trabajo Fin de Grado

**CONFORMADO DE HAZ MATEMÁTICO DE
DIAGRAMAS DE RADIACIÓN DE ANTENAS 5G**

**Mathematical beamforming of radiation patterns of 5G
antennas.**

Autor

Miguel Aliende García

Director

Gerson Villalba Arana

Ponente

Arturo Mediano Heredia

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

2020-2021

Resumen

En la nueva generación de antenas 5G se utiliza la técnica de conformado de haz de radiación de modo dinámico, lo que significa que las antenas son capaces de generar multitud diagramas de radiación que el fabricante debe medir para caracterizar la antena y debe ofrecérselos al operador para que este pueda hacer una correcta planificación de red. Medir el diagrama de radiación de las antenas es muy costoso en tiempo y es prácticamente imposible medir la multitud de diagramas de radiación que una antena de conformado de haz puede generar.

El objetivo del trabajo es medir los diagramas de radiación de cada una de las 4 columnas que forman una antena 5G diseñada por TELNET-RI como si fuera el diagrama de radiación de un elemento radiante.

Después basándose en las herramientas matemáticas de los campos generados por agrupaciones, ser capaz de generar virtualmente los diagramas de radiación para cualquier orientación de azimutal y cualquier ancho de haz en todo el rango de inclinación vertical de manera fiable y eficiente.

Finalmente se comprobarán los resultados obtenidos mediante simulación cotejándolos con algunos resultados concretos obtenidos mediante medición real.

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi familia, por el esfuerzo y apoyo durante esta etapa universitaria que hoy culmina, y a los amigos que he conocido durante estos cuatro años.

Por otro lado me gustaría dar las gracias a los profesores que me he encontrado a lo largo de la vida universitaria. En especial agradecer a Arturo por su entusiasmo a la hora de transmitir conocimientos y la confianza depositada en mí para desarrollar este trabajo.

Por último pero no menos importante a mis compañeros de estos últimos meses en Telnet-RI, en especial a Edel y Gerson, por su dedicación y ayuda en mis primeros pasos en el mundo laboral.

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Objetivos	16
2. Marco Teórico	17
2.1. Introducción a antenas de telefonía móvil	17
2.1.1. Polarización	17
2.1.2. Tilt vertical	18
2.2. Telefonía móvil 5G	18
2.2.1. Áreas de aplicación	19
2.2.2. Rendimiento	19
2.2.3. Beamforming	19
2.2.4. <i>Masive MIMO</i>	22
2.3. Fundamentos de Radiación	23
2.3.1. Intensidad de Radiación	23
2.3.2. Diagrama de Radiación	24
2.4. Agrupaciones de antenas	25
2.4.1. Introducción	25
2.4.2. Campos Radiados por agrupaciones	25
2.4.3. Diagrama de radiación de agrupaciones	27
2.5. Calculo de parámetros acorde a BASTA	29
2.5.1. Ancho de haz	29
2.5.2. Ángulo de inclinación vertical <i>Electrical Downtilt Angle</i>	30
2.5.3. Supresión del primer lóbulo lateral superior (<i>First Upper Sidelobe Suppression</i>)	31
2.5.4. Supresión del lóbulo lateral a 20º (<i>Upper Sidelobe Suppression, Peak to 20º</i>)	31
2.5.5. Discriminación <i>Cross-Polar</i> en el máximo de apuntamiento (<i>Cross-Polar Discrimination at boresight</i>)	32

2.5.6. <i>Front-to-Back</i> de la potencia total a $\pm 30^\circ$ y a 0°	32
3. Obtención de medidas y desarrollo del <i>software</i>	33
3.1. Obtención de medidas de columnas individuales	33
3.2. Procesado de las medidas	34
3.2.1. Importación y optimización de los datos en MATLAB	35
3.2.2. Representación de los diagramas de radicación de las columnas individuales	36
3.3. Cálculos de diagramas de radiación simulados	37
3.3.1. Service Beam	37
3.3.2. <i>Broadcast Beam</i> y vectores de fase y amplitud personalizados	42
3.4. Cálculo de valores para la caracterización de la antena	44
3.4.1. Generación de tabla de valores	44
3.5. Generar documentación que caracteriza la antena completa	47
3.5.1. <i>Excel</i> para crear hoja de características	47
3.5.2. Archivos <i>.msi</i> necesarios para los operadores	48
4. Comparativa de resultados y resumen del <i>software</i>	51
4.1. Comparativa de medidas	53
4.2. Resumen del <i>software</i>	57
5. Conclusiones y trabajos futuros	59
5.1. Conclusiones	59
5.2. Trabajos futuros	60
A. Manual de instrucciones del <i>software</i>	61
B. Comparativa entre medidas reales y simuladas	69
Bibliografía	94

Índice de figuras

2.1.	Factores de agrupación totales para diferentes ángulos de antenas con polarización vertical y con polarización cruzada a $\pm 45^\circ$	17
2.2.	Esquemas sobre el Tilt vertical	18
2.3.	Logo tecnologías móviles 5G	19
2.4.	Representación de radiación en función del número de elementos radiantes alimentados en fase.	20
2.5.	Representación de radiación de antena con cuatro elementos radiantes con un desfase de alimentación de 45°	21
2.6.	ejemplo de funcionamiento de antena beamforming en un escenario con varios usuarios	21
2.7.	Esquema de antena <i>beamforming</i>	21
2.8.	Diferentes configuraciones del beamforming	22
2.9.	Sistemas de coordenadas esférico	23
2.10.	Diagramas de radiación en coordenadas esféricas y cilíndricas generados en MATLAB	24
2.11.	Distribución de corriente en una agrupación	25
2.12.	Interferencia de campos radiados por la agrupación	26
2.13.	Representación del Factor de Agrupación de cuatro elementos en su forma cartesiana y en su forma polar	28
2.14.	Definición de ancho de haz horizontal en BASTA	29
2.15.	Caption	29
2.16.	Ángulo de inclinación vertical (<i>Electrical Downtilt Angle</i>) definido en BASTA. . .	30
2.17.	<i>First Upper sidelobe Suppression definido en BASTA</i>	31
2.18.	<i>Upper Sidelobe Suppression, Peak to 20°</i> definido en BASTA	31
2.19.	<i>Cross-polar Discrimination over Sector</i> definido en BASTA	32
2.20.	Definición del <i>Front-to-Back</i> de la potencia total a $\pm 30^\circ$ en BASTA	32
3.1.	©StarLab y Antena 5G	34

3.2. Diagrama de radiación de la ganancia total de Columna 1 a 3600 MHz polarización N45 y Tilt 08	35
3.3. Interfaz para representar los diagramas de radiación de las columnas individuales	36
3.4. Representación del factor de agrupación de cada una de las columnas con <i>Service Beam</i> a 0º	38
3.5. Factores de agrupación totales para diferentes ángulos del <i>Service Beam</i>	38
3.6. Diagrama de radiación para diferentes ángulos de <i>Service Beam</i> de la ganancia total a 3700MHz.	39
3.7. Diagrama de radiación completo en 3D con <i>Service Beam</i> a 0º	40
3.8. Representación de los cortes Horizontal y Vertical del diagrama de radiación de la medida en la polarización N45, <i>Tilt</i> a 7º y <i>Service Beam</i> a 15º	41
3.9. Ejemplos de <i>Sliders</i> y calibres para seleccionar el <i>service beam</i>	41
3.10. Diagramas de radiación en 2D y 3D para <i>tilt</i> 06 y polarización N45 en su conformado de <i>Broadcast Beam</i>	42
3.11. Representación de los cortes Horizontal y Vertical del diagrama de radiación de la medida en la polarización N45, <i>Tilt</i> a 6º en su conformado <i>Broadcast Beam</i>	43
3.12. Introducción de parámetros para conformar <i>Broadcast Beam</i> o cualquier otro conformado	43
3.13. Tabla de valores calculados del diagrama de radiación de <i>Tilt</i> 08º, <i>Service Beam</i> 0º en polarización N45	45
3.14. Diagrama de bloques del funcionamiento del programa	46
3.15. Opciones de Generar documentación	47
3.16. Hoja de características de la antena generada, a partir del conformado simulado	48
3.17. Archivos <i>.msi</i> generados mediante simulación del conformado <i>Service Beam</i> en la polarización N45	49
3.18. Diagrama resumen del trabajo desarrollado	49
 4.1. Esquema y foto de las conexiones necesarias para poder medir los conformados	51
4.2. Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH00	53
4.3. Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación	53
4.4. Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH30	54
4.5. Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH30	54
4.6. Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH-30	55
4.7. Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH-30	55

4.8. Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 BB	56
4.9. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T07 BB	56
4.10. Tabla de tiempos de ejecución de las principales funciones del <i>software</i>	57
A.1. Menú principal	61
A.2. Panel para elegir si se representan las medidas o no	62
A.3. Elegir tipo de conformado	62
A.4. Panel para configurar <i>Service Beam</i> y simular	63
A.5. Representación de los cortes simulados del <i>Service Beam</i>	63
A.6. Representación de la componente $FA(\psi)$ de cada elemento del <i>Service Beam</i>	64
A.7. Representación del $FA(\psi)$ del <i>Service Beam</i>	64
A.8. Representación del diagrama de radiación en 2D del <i>Service Beam</i>	65
A.9. Representación del diagrama de radiación en 3D del <i>Service Beam</i>	65
A.10. Panel para generar la documentación	66
A.11. Panel para configurar y simular un conformado personalizado	66
A.12. Panel para generar Excel de un conformado completo	67
A.13. Panel para generar documentación en formato .msi de un conformado completo	67
A.14. Panel para generar documentación en formato .msi de un conformado completo	68
B.1. Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt</i> 02 <i>Service Beam</i> 0º	70
B.2. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T02 TH00	70
B.3. Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt</i> 07 <i>Service Beam</i> 0º	71
B.4. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T07 TH00	71
B.5. Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt</i> 12 <i>Service Beam</i> 0º	72
B.6. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T12 TH00	72
B.7. Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt</i> 02 <i>Service Beam</i> 0º	73
B.8. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T02 TH00	73
B.9. Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt</i> 07 <i>Service Beam</i> 0º	74
B.10. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T07 TH00	74
B.11. Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt</i> 12 <i>Service Beam</i> 0º	75
B.12. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T12 TH00	75
B.13. Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt</i> 02 <i>Service Beam</i> 30º	76
B.14. Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T02 TH30	76

B.15.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 07 Service Beam</i> 30°	77
B.16.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T07 TH30	77
B.17.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 12 Service Beam</i> 30°	78
B.18.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T12 TH30	78
B.19.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 02 Service Beam</i> 30°	79
B.20.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T02 TH30	79
B.21.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 07 Service Beam</i> 30°	80
B.22.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T07 TH30	80
B.23.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 12 Service Beam</i> 30°	81
B.24.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T12 TH30	81
B.25.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 02 Service Beam</i> -30°	82
B.26.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T02 TH-30	82
B.27.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 07 Service Beam</i> -30°	83
B.28.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T07 TH-30	83
B.29.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 12 Service Beam</i> -30°	84
B.30.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T12 TH-30	84
B.31.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 02 Service Beam</i> -30°	85
B.32.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T02 TH-30	85
B.33.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 07 Service Beam</i> -30°	86
B.34.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T07 TH-30	86
B.35.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 12 Service Beam</i> -30°	87
B.36.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T12 TH-30	87
B.37.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 02 Broadcast Beam</i>	88
B.38.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T02 BB	88
B.39.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 07 Broadcast Beam</i>	89
B.40.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T07 BB	89
B.41.Comparación cortes polarización +45 <i>Tilt 12 Broadcast Beam</i>	90
B.42.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación P45 T12 BB	90
B.43.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 02 Broadcast Beam</i>	91
B.44.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T02 BB	91
B.45.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 07 Broadcast Beam</i>	92
B.46.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T07 BB	92

B.47.Comparación cortes polarización -45 <i>Tilt 12 Broadcast Beam</i>	93
B.48.Comparativa de tablas medidas en ©StarLAb y mediante simulación N45 T12 BB	93

Capítulo 1

Introducción

El mundo de las telecomunicaciones esta en constante cambio, y ahora nos toca vivir como se pasa de la cuarta generación de las tecnologías de telefonía móvil (4G) a la quinta generación (5G). La tecnológica 4G, cuyo despliegue en España comenzó en 2013 y es la que a día de hoy utilizamos para comunicarnos con nuestros dispositivos móviles [1]. La velocidad de la transmisión de datos es uno de los estándares más claros de esta tecnología, y llega a alcanzar velocidades de 12 MB/s para una movilidad alta y de 125 MB/s para una movilidad baja [2]. Esto nos permite ver vídeos en *streaming*, navegar por internet...

La llegada del 5G va a suponer muchas mejoras respecto al 4G, las más importantes son la mejora del a velocidad de transmisión que se promete que será entre 10 y 20 veces más rápido que la de la actual 4G [3]. La velocidad a la que permite navegar esta tecnología en dispositivos móviles es de hasta 1.2 Gbs [4], también se consigue una mejora en la latencia que pasa de los 100 ms del 4G a los 8 o 10 ms en 5G [5]. Otra gran ventaja del 5G es que se pueden llegar a conectar 100 dispositivos más por metro cuadrado sin que colapse la red [6].

Esto es bastante importante debido al auge del *IoT (Internet of Things)*, que nos permitirá hacer operaciones quirúrgicas a distancia y coches de conducción autónoma entre muchas otras cosas [7].

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se ha realizado en la empresa Telnet-RI de Zaragoza (España) en la modalidad de prácticas en empresa vía UNIVERSA. En Telnet-RI se ha diseñado la antena TNA330A00 que radia en la banda de 3,5 GHz. Esta antena esta compuesta por cuatro columnas de elementos radiantes. Dicha antena esta diseñada de tal manera que en función de las amplitudes y las fases de alimentación de cada una de las columnas se consigue generar un haz cuyo diagrama de radiación esta compuesto por los diagramas de radiación de las 4 columnas teniendo en cuenta el factor de agrupación ($FA|\psi|$) de cada una de estas.

Dado el número de combinaciones posibles de haces que es capaz de generar esta antena es imposible medir todos los diagramas de radiación, porque puede combinar diferentes anchuras del lóbulo principal con todas las direcciones de apuntamiento horizontal entre los 30º y los -30º para todos los grados de inclinación vertical, que van desde los 2º a los 12º.

Por este motivo este trabajo va consistir en crear una aplicación que en función de diferentes parámetros se generen virtualmente los diagramas de radiación deseados.

Este trabajo es el primero realizado en esta línea dentro de la empresa y se ha culminado cumpliendo todos los objetivos iniciales satisfactoriamente.

1.1. Objetivos

El objetivo principal del trabajo es el cálculo de diagramas de radiación completos de una antena 5G desarrollada por Telnet-RI. Se diseñará un programa, empleando MATLAB¹, que a partir de los diagramas de radiación de cada una de las 4 columnas que forman la antena poder conformar el diagrama completo de la antena en función de parámetros introducidos por el usuario como fase y alimentación de cada columna y la separación entre estas. Además de calcular los valores y datos relevantes del diagrama de radiación simulado y generar automáticamente la documentación que es necesario ofrecer al operador cuando se vende una antena.

Los diagramas de radiación son medidos mediante el sistema multi-sonda de medida de campos radiados ©StarLab de SATIMO². El primer paso será medir los diagramas de radiación de cada columna, extraer y optimizar estos datos para usarlos en MATLAB.

Una vez tomadas todas las medidas de cada columna se comenzará con el procesado de estas en MATLAB, la generación de los diagramas de radiación completos y el cálculo de los diferentes parámetros que nos dan información sobre las características de estos diagramas de radiación simulados.

Para hacer más sencillo el proceso de simulación para el usuario se desarrollará una interfaz gráfica sencilla e intuitiva que además se le incluirán funcionalidades para generar la documentación relativa a la antena y que es necesaria incluir en la hoja de características o entregar al operador que compra la antena.

El último paso es volver a medir mediante ©StarLab alguno de los conformados utilizando unos cables y atenuadores para desfasar y atenuar la alimentación de cada columna y hacer así el *beamforming*, para después compararlos con las medidas obtenidas mediante simulación.

¹<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>

²<https://www.mvg-world.com/es/products/antenna-measurement/multi-probe-systems/starlab>

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo vamos a hablar sobre las particularidades de las antenas 5G de conformado de haces (*beamforming*) y sobre los sistemas de agrupaciones de antenas, que son los dos aspectos teóricos fundamentales en los que se basa este trabajo.

2.1. Introducción a antenas de telefonía móvil

En este capítulo hablaremos sobre los parámetros básicos que tienen las antenas de telefonía móvil y expondremos las principales diferencias de las antenas 5G con las de generaciones anteriores.

2.1.1. Polarización

La polarización se puede definir como la dirección de oscilación del vector de campo eléctrico, es una propiedad de la onda que produce la antena y describe como la onda varia en el espacio con el tiempo.

Este es un concepto importante, porque para que una onda transmitida con una polarización determinada pueda ser recibida por otra antena, la antena receptora debe poder recibir esta polarización y estar orientada para hacerlo[8], de esta manera conseguimos la multiplexación por división de polarización, que apareció con la tecnología móvil 3G. Esta técnica permite que dos canales de información se transmitan en la misma frecuencia de portadora mediante el uso de ondas con polarización lineal ortogonal [9].



(a) Esquema de antena con una sola polarización



(b) Esquema de antena con dos polarizaciones, a $\pm 45^\circ$

Figura 2.1: Factores de agrupación totales para diferentes ángulos de antenas con polarización vertical y con polarización cruzada a $\pm 45^\circ$

La forma que tienen actualmente las antenas de telefonía es similar al esquema mostrado en la figura 2.1b, de esta manera podemos dar el doble de servicio en el mismo espacio.

2.1.2. Tilt vertical

El tilt representa la inclinación de la antena respecto al horizonte, hay dos maneras de hacer que el máximo de radiación de una antena no apunte al horizonte. Una manera es inclinado mecánicamente la antena, y la otra manera es mediante RET(*Remote Electrical Tilt*) que consiste en modificar el tilt a distancia mediante un sistema que alimenta cada elemento radiante de la antena con una fase distinta y de esta manera se puede modificar el tilt de la antena sin necesidad de inclinar la antena manualmente [10].

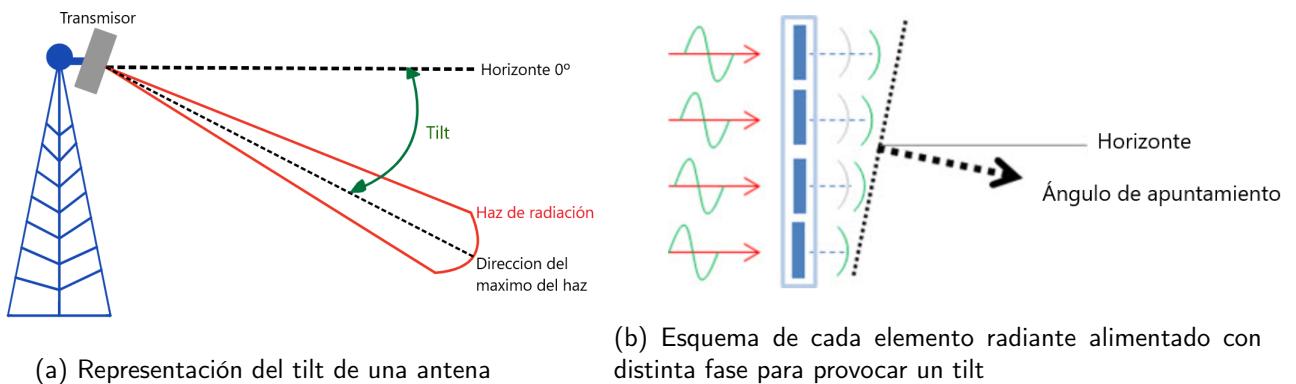


Figura 2.2: Esquemas sobre el Tilt vertical

El operador de la antena es encargado de controlar el *tilt*, pero no es algo que se este constantemente modificando. El *tilt* se modifica en ciertos casos, como por ejemplo si en una zona céntrica de una ciudad grande se amplia el número de antenas para dar servicio a un mayor numero de personas se reducirá la celda y por lo tanto habrá que inclinar el *tilt* para evitar interferencias entre las celdas.

2.2. Telefonía móvil 5G

En telecomunicaciones, 5G son las siglas utilizadas para referirse a la quinta generación de tecnologías de telefonía móvil. Es la sucesora de la tecnología 4G. Actualmente está disponible su primera versión estandarizada (*Relese 15-Stand Alone*), aunque las empresas de telecomunicaciones continúan investigando nuevas tecnologías para posteriores versiones. Aunque en 2019 se lanzaron las primeras redes se prevé que su uso se extienda exponencialmente a los largo del 2021 [11].

Como sus predecesoras las redes 5G son redes móviles, en las que el área de servicio se divide en pequeñas áreas geográficas llamadas celdas. Todos los dispositivos inalámbricos 5G en una celda están conectados a Internet y la red telefónica mediante ondas de radio a través de una antena localizada en la celda.

La principal ventaja de las nuevas redes es que tendrán un mayor ancho de banda, ofreciendo mayores velocidades de transmisión[3]. Se espera que estas redes no sirvan exclusivamente para teléfonos móviles, sino que también debido a que se pueden conectar a ellas muchos más dispositivos

que en su predecesora se podrán usar también como proveedores generales de servicios de internet y también hará posibles nuevas aplicaciones del internet de las cosas (*IoT*) [7].



Figura 2.3: Logo tecnologías móviles 5G

2.2.1. Áreas de aplicación

El Sector de Radiocomunicaciones de la Unión internacional de Telecomunicaciones (*UIT-R*) ha definido tres áreas de aplicación principales para las capacidades mejoradas de 5G. son la banda ancha móvil mejorada (*eMBB*), las comunicaciones de baja latencia ultra fiables (*URLLC*) y las comunicaciones de tipo maquina masiva (*mMTC*) [12].

la banda ancha móvil mejorada (*eMBB*) utiliza 5G como una progresión del 4G LTE, con conexiones más rápidas, mayor rendimiento y más capacidad.

Las comunicaciones de baja latencia ultra fiables (*URLLC*) se refieren al uso de la red para aplicaciones de misión critica que necesitan un intercambio de datos seguro e ininterrumpido, como por ejemplo podría ser una operación quirúrgica a distancia [13].

2.2.2. Rendimiento

Velocidad

Las velocidades del 5G oscilarán entre los 50 Mbit/s y 1Gbit/s [14]. El 5G más rápido que se conoce se conoce como *mmWave*, y el 3 de Julio de 2019 alcanzó una velocidad máxima 1.8 Gbit/s en la red 5G de AT&T [14].

El 5G de banda media (*mid-band 5G*, mucho más común, entregará entre 100 y 400 Mbits/s, pero tendrá un alcance mucho mayor que el *mmWare*, especialmente en exteriores [3].

Latencia

Se han conseguido valores de latencia de las redes 5G en el aire de 8 a 12 ms [5]. La empresa *Verizon* ha realizado las primeras pruebas desplegando la primera red comercial 5G en zonas de Chicago, y se midieron latencias totales de 30 ms, colocando servidores cercanos a las antenas se redujo esta latencia a los 15 ms [15].

2.2.3. Beamforming

El *Beamforming* o conformado de haces es una de las características más importantes y sorprendentes de las nuevas antenas 5G y en lo que se fundamenta este trabajo. Las antenas de las anteriores generaciones (2G, 3G y 4G) emitían su señal en un arco fijo con tanta potencia como

la regulación del país lo permitía, por lo tanto las posibilidades de captar una buena señal en estas redes dependía de numerosos factores, como por ejemplo, la distancia a la antena y las posición respecto al lóbulo principal de radicación. El nuevo tipo de antenas 5G emplea la tecnología *beamforming* para conectar de cierta manera el móvil con la antena. Estas nuevas antenas son capaces de rastrear donde se encuentra el dispositivo, incluso si esta en movimiento y apuntar su su máximo de radiación hacia este. También es capaz de ajustar la potencia de manera inteligente para hacer más eficiente el consumo y colocar nulos para evitar interferencias con celdas vecinas, BTS y usuarios vecinos [16].

El *beamforming* es la aplicación de múltiples elementos radiantes que transmiten la misma señal a la misma longitud de onda, que se combinan para crear una única antena reforzando las ondas en una dirección específica, pero este concepto no es algo nuevo, se utilizó por primera vez en 1901 para las comunicaciones por radio transoceánicas [17].

Cuantos más elementos radiantes componen la antena más estrecho es el haz y más débiles son los lóbulos laterales [18]. Como se puede ver en la figura 2.4.

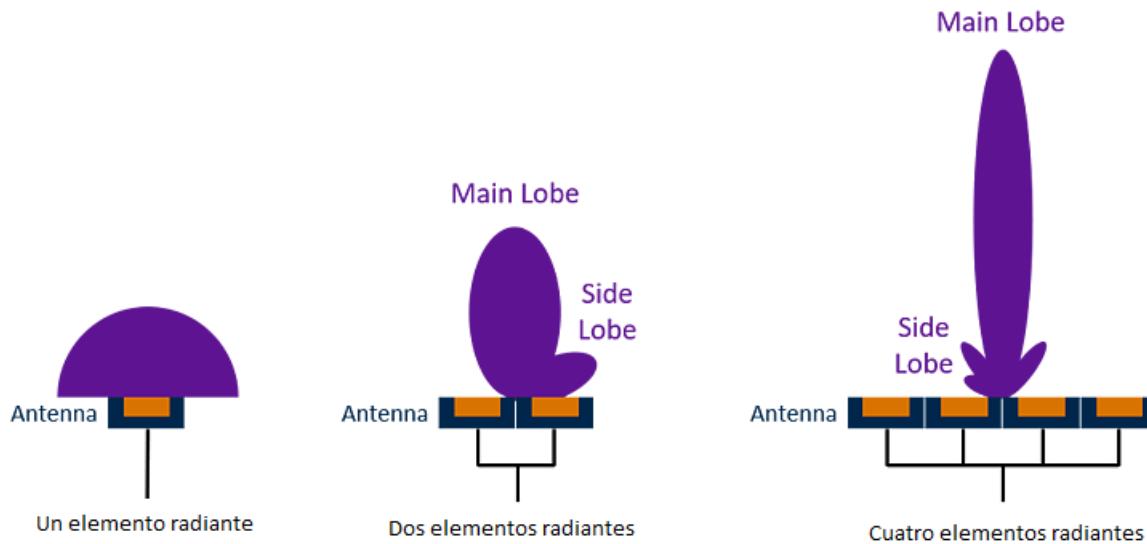


Figura 2.4: Representación de radiación en función del número de elementos radiantes alimentados en fase.

Dirección de haz

La dirección en la que se apunta el haz se logra cambiando la fase de alimentación de las columnas de elementos radiantes. El cambio de fase permite que la señal se dirija a un receptor específico [18], como se puede ver en la figura 2.5

Las nuevas estaciones base 5G son capaces de detectar donde se encuentra un usuario y orientar el haz de radiación hacia él. Los cálculos involucrados en esto son muy complejos y se realizan mediante algoritmos de inteligencia artificial [16]. De esta manera se puede ajustar la cantidad de energía emitida para llegar a cada usuario con la mayor calidad de señal y un uso eficiente de la potencia.

Cuando hay varios usuarios (escenario más común) el máximo de radiación va commutando rápidamente entre los diferentes usuarios dando la sensación a cada uno de ellos de que tienen la antena apuntando hacia ellos continuamente [19].

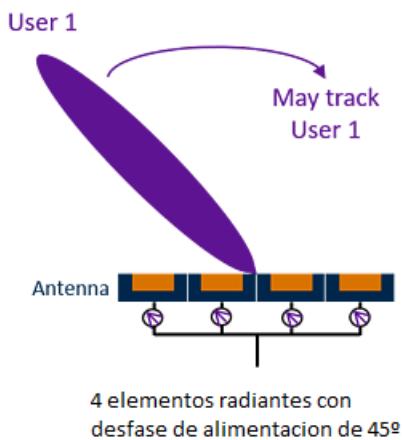


Figura 2.5: Representación de radiación de antena con cuatro elementos radiantes con un desfase de alimentación de 45º.

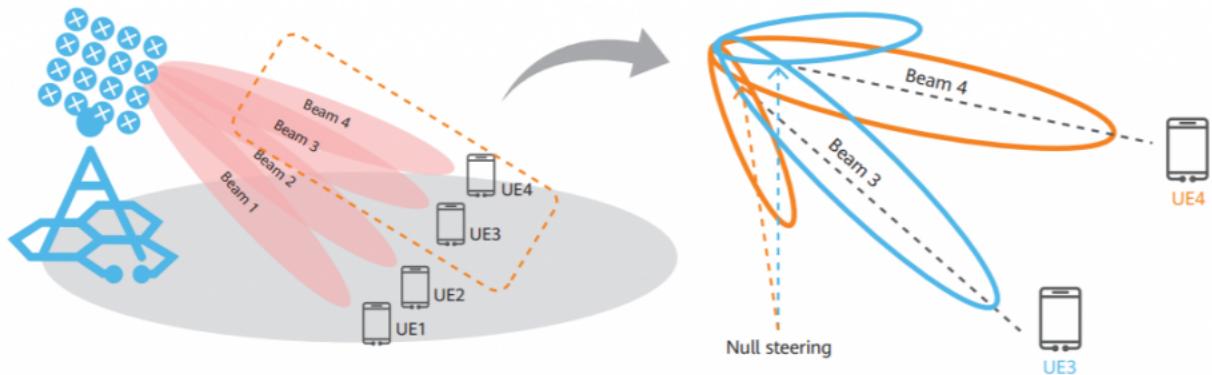


Figura 2.6: ejemplo de funcionamiento de antena beamforming en un escenario con varios usuarios

En la figura 2.6 podemos ver claramente como se comportan estas antenas con varios usuarios, se puede ver como a cada usuario lo apunta con un haz diferente para que le llegue a cada uno la máxima potencia.

Para conseguir esto lo que se hace es diseñar una antena con elementos radiantes alienados tanto vertical como horizontalmente, como hemos visto en la sección 2.1.2 el desfase en la alimentación de los elementos radiantes alineados verticalmente va a producir una inclinación del máximo del haz de radiación en el plano vertical, de la misma manera si alimentamos con desfase las distintas columnas verticales conseguiremos una inclinación en el plano horizontal. Por lo tanto las antenas *beamforming* tendrán un diseño similar al siguiente esquema.

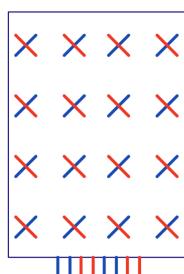


Figura 2.7: Esquema de antena *beamforming*

Service Beam y Broadcast Beam

Gracias al beamforming las nuevas antenas 5G van poder cambiar tanto el ancho del haz principal como la dirección de apuntamiento de este, esto da lugar a muchísimas configuraciones, pero las fundamentales son dos, el *Service Beam* que consiste en alimentar todas las columnas con la misma amplitud pero con desfase constante entre ellas dando lugar a conformados con mayor directividad horizontal y ganancia. La otra configuración es el *Broadcast Beam*, cuyo diagrama de radiación tiene una forma similar a los de antenas 4G, con menos ganancia y directividad, pero da cobertura a toda la celda [20].

El *Service Beam* se utiliza para dar servicio a los usuarios y el *Broadcast Beam* se utiliza para procesar el canal de transmisión, el canal de control y las señales de referencia de todos los dispositivos en una celda



Figura 2.8: Diferentes configuraciones del beamforming

Para formar el *Broadcast Beam* se alimenta cada columna de elementos radiantes con una amplitud y fases concretas para que forme este conformado.

2.2.4. *Masive MIMO*

MIMO son las siglas en inglés de *Multiple-input Multiple-output*, si bien esto implica varias tecnologías se puede reducir en este único principio: una red inalámbrica que permite la transmisión y recepción de más de una señal de datos simultáneamente sobre el mismo canal de radio [21]. La tecnología MIMO no es algo nuevo, habitualmente los equipos MIMO incorporan dos o cuatro antenas.

En la tecnología 5G se van a utilizar equipos *massiveMIMO*, que no es otra cosa que los equipos MIMO clásicos pero en vez de un par de antenas incorporarán decenas de ellas. Esto nos va a permitir mejorar las velocidades de conexión y aumentar el número de dispositivos conectados [22].

Por lo tanto las características más importantes y sorprendentes del 5G son las tecnologías de conformado de haces (*beamforming*) y las incorporación de equipos *massiveMIMO*.

2.3. Fundamentos de Radiación

2.3.1. Intensidad de Radiación

Una de las características más importantes de una antena es que pueda radiar con una cierta direccionalidad, es decir, que pueda orientar su radiación a ciertas direcciones del espacio. El sistema de coordenadas utilizado en antenas es normalmente el esférico.

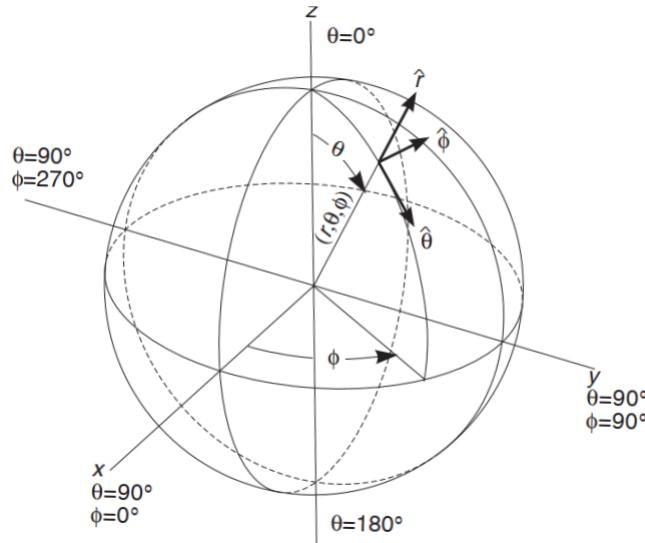


Figura 2.9: Sistemas de coordenadas esférico

Para especificar una dirección del espacio se utilizan dos ángulos, ϕ y θ , se definen los vectores unitarios que forman una base ortogonal.

La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico $\vec{E}(V/m)$ y un campo magnético $\vec{H}(A/m)$, ambos están ligados por las ecuaciones de *Maxwell*, y a partir de sus valores eficaces podemos calcular la densidad de flujo por unidad de superficie [23].

$$\vec{\rho}(\theta, \phi) = Re(\vec{E}x\vec{H}) \quad (2.1)$$

Para los campos radiados, los módulos del campo eléctrico y magnético están relacionados con la impedancia característica del medio η , por lo tanto la densidad de potencia radiada también se puede calcular mediante las componentes transversales del campo eléctrico [23].

$$\rho(\theta, \phi) = \frac{|E_\theta|^2 + |E_\phi|^2}{\eta} \quad (2.2)$$

La intensidad total radiada se puede obtener como la integral de la densidad de potencia en una superficie esférica que encierre a la antena.

$$P_r = \int \int_S \vec{\rho}(\theta, \phi) r^2 \quad (2.3)$$

La intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección.

2.3.2. Diagrama de Radiación

Un diagrama de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena. Como hemos dicho antes se suele representar en coordenadas esféricas con la antena situada en el origen, pero también se puede representar en coordenadas cilíndricas, manteniendo constante la distancia se expresa el campo eléctrico en función de las variables angulares (θ, ϕ).

Al observar a gran distancia una antena, su radiación parece provenir de un único punto, por lo tanto los frentes de onda serían esféricos.

El diagrama de radiación se puede representar en forma tridimensional utilizando el sistema de coordenadas esféricas o cilíndricas.

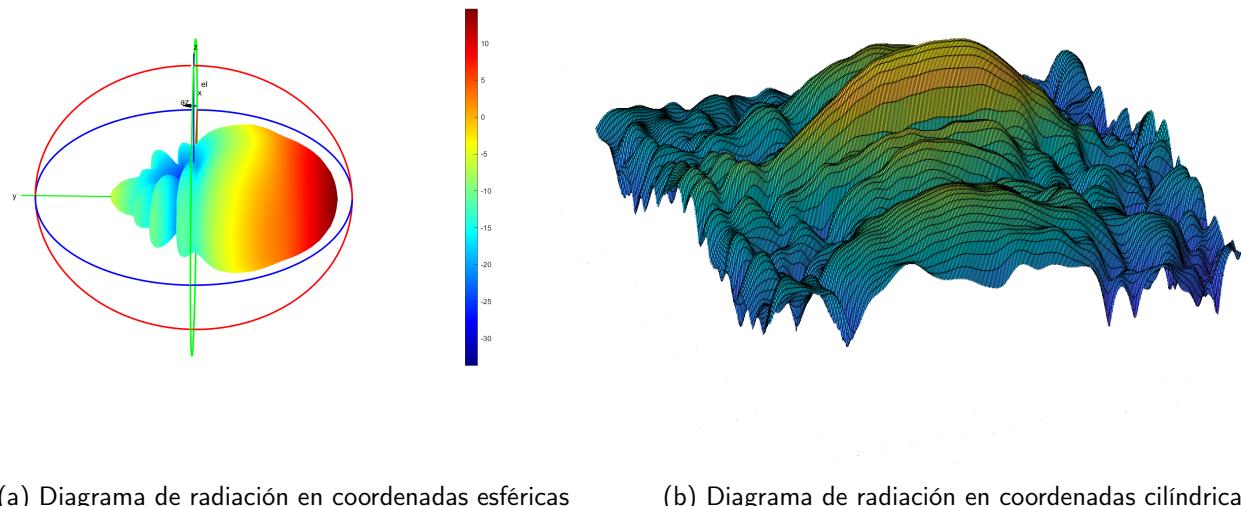


Figura 2.10: Diagramas de radiación en coordenadas esféricas y cilíndricas generados en MATLAB

En muchos casos puede ser interesante y suficiente representar un corte del diagrama completo en 3 dimensiones. Los cortes se pueden hacer de muchas maneras, las más habituales son fijando los valores de θ y ϕ en el punto de máxima radiación y obteniendo de esa manera los cortes horizontales y verticales del diagrama de radiación respectivamente, esta técnica de representar los cortes suele ser suficiente para caracterizar la radiación de la antena. Se pueden representar en coordenadas polares o cartesianas, las coordenadas cartesianas permiten observar los detalles de antenas muy directivas, mientras que la polar proporcionar información más clara sobre la distribución de la potencia en el espacio.

2.4. Agrupaciones de antenas

En esta sección estudiaremos más a fondo los conceptos teóricos de agrupaciones de antenas sobre los que se fundamentan las tecnologías de conformado de haces y también la base matemática necesaria para desarrollar este trabajo.

2.4.1. Introducción

Las antenas básicas proporcionan grandes anchos de haz y valores de directividad reducidos. Si bien en teoría se puede obtenerse cualquier diagrama de radiación diseñando una distribución de corriente cuya transformada de Fourier sea el diagrama deseado, en la práctica no es posible. Para obtener un haz omnidireccional de ancho -3dB igual a 6° , sería necesaria una distribución lineal uniforme de longitud de orden 10λ , lo cual no es posible para un dipolo [24].

Este problema puede solucionarse con ayuda de una agrupación de antenas, alimentadas con amplitudes y fases tales que la interferencia de los campos radiados por todas las antenas nos proporcione el diagrama deseado.

2.4.2. Campos Radiados por agrupaciones

Se define agrupación como un conjunto de N antenas iguales que radian o reciben simultáneamente. El diagrama de radiación del conjunto se obtiene como la interferencia de los campos radiados por cada una de las antenas [25].

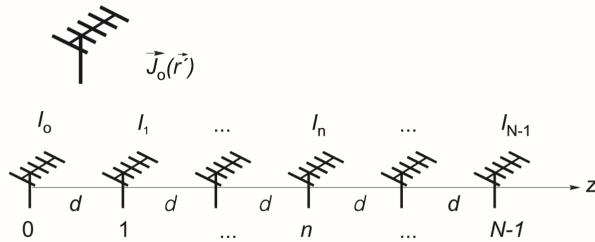


Figura 2.11: Distribución de corriente en una agrupación

En la figura 2.11 puede verse una agrupación de N antenas equiespaciadas una distancia d en el eje z , y alimentadas con corrientes I_n .

Si la distribución de corrientes con fasor de alimentación unitario sobre la antena básica situada en $z = 0$ es $\vec{J}_0(\vec{r}')$ y cada antena se excita con un fasor de corrientes I_n [26], la distribución de corrientes sobre el conjunto es

$$\vec{J}(\vec{r}') = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \vec{J}_0(\vec{r}' - nd\hat{z}) \quad (2.4)$$

El vector de radiación $\vec{N}(\hat{r})$ se puede expresar como la transformada de Fourier de la distribución de corrientes.

$$\vec{N}(\hat{r}) = TF_{3D}[\vec{J}(\vec{r}')] = \vec{N}_0(\hat{r}) \cdot TF_{3D}[I(n)] \quad (2.5)$$

donde $\vec{N}_0(\hat{r})$ es el vector de radiación de la antena básica situada en el origen, cuando el fasor de alimentación es la unidad. Como $I(n)$ es separable podemos escribir su transformada total como el producto de sus transformadas en cada dirección[27].

$$TF_{3D} = 1 \cdot 1 \cdot TF_z[I(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} I_n \cdot e^{j\omega_z n} \quad (2.6)$$

La frecuencia digital ω_z es el producto de la frecuencia espacial analógica k_z por el periodo de muestreo que es d [28].

$$\omega_z = k_z \cdot d = k \cdot d \cdot \cos(\theta) \quad (2.7)$$

donde θ es el ángulo respecto al eje de agrupación. Como normalmente I_n presenta una fase progresiva entre cada antena suele escribirse como $I_n = a_n e^{j n \alpha}$

Por lo tanto el vector de radiación se puede expresar como

$$\vec{N}(\hat{r}) = \vec{N}_0(\hat{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{j n (k d \cos \theta + \alpha)} \quad (2.8)$$

Gracias al vector de radiación podemos obtener diversos valores, el que más nos interesa es el campo eléctrico radiado, que puede definirse como

$$\vec{E}(\hat{r}) = \vec{E}_0(\hat{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{j n (k d \cos \theta + \alpha)} \quad (2.9)$$

En la ecuación 2.9, \vec{E}_0 es el campo radiado por la antena básica con alimentación unitaria.

Para simplificar los cálculos la ecuación anterior suele escribirse en función de Ψ (ángulo eléctrico). $\Psi = k d \cos \theta + \alpha$.

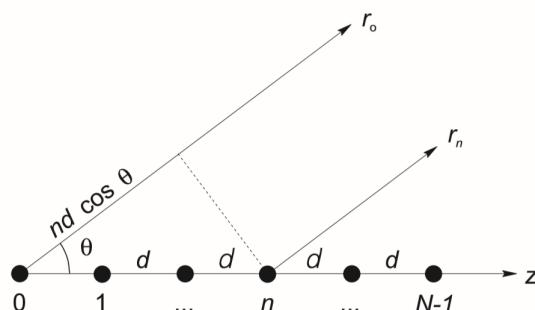


Figura 2.12: Interferencia de campos radiados por la agrupación

Ψ representa la diferencia de fase entre las contribuciones en campo lejano de dos antenas consecutivas. Esta diferencia de fase es igual a la suma de desfase por diferencia de caminos ($kd \cdot \cos\theta$), más la fase progresiva de la alimentación α [29]. Con esta notación podemos escribir el campo eléctrico radiado como

$$\vec{E}(\hat{r}) = \vec{E}_0(\hat{r}) \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.10)$$

2.4.3. Diagrama de radiación de agrupaciones

En la ecuación 2.10 se expresa el campo eléctrico radiado como el producto del diagrama de la antena básica, $\vec{E}_0(\hat{r})$, multiplicado por un factor que depende únicamente de la separación entre los elementos radiantes, la frecuencia de trabajo y la alimentación. Este parámetro se conoce como *Factor de Agrupación o Factor de Array* (FA) [30].

$$FA(\psi) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n e^{jn\psi} \quad (2.11)$$

La ecuación 2.11 es especialmente importante porque podemos expresar el diagrama de radiación total en función de dos parámetros, la antena básica y el factor de agrupación.

Factor de Agrupación

Las propiedades más importantes y útiles del Factor de agrupación $FA(\psi)$ para este trabajo son[30]:

- Es una función periódica de periodo 2π , los coeficientes de su serie de Fourier son los coeficientes de alimentación a_n .
- Por lo tanto el factor de agrupación es la transformada de Fourier discreta de los coeficientes de alimentación a_n .
- Si los coeficientes de alimentación a_n son reales y positivos, el máximo del factor de agrupación se encuentra en el origen $\psi = 0$.
- Como el ángulo θ indica la dirección de radiación en el espacio, solo toma valores reales entre 0 y π , los cuales corresponden a un intervalo de variación de ψ .

$$\psi \in [-kd + \alpha, kd + \alpha] \quad (2.12)$$

Únicamente la parte del Factor de Agrupación $FA(\psi)$ comprendidos en el intervalo 2.12 pertenece al diagrama de radiación, a este intervalo se le conoce como *margen visible*.

- Como hemos comentado antes para coeficientes de alimentación positivos y reales $\psi = 0$, según 2.12, $|\alpha| \leq kd$

- La dirección de máximo apuntamiento puede controlarse variando la fase progresiva, este es el principio de funcionamiento de las agrupaciones con barrido de fase (*phased array*) que es el caso de la antena usada en este trabajo.

$$\psi = kd \cos \theta_{max} + \alpha = 0 \quad (2.13)$$

$$\theta_{max} = \arccos\left(-\frac{\alpha}{kd}\right), |\alpha| \leq kd \quad (2.14)$$

En la ecuación 2.14 podemos calcular fácilmente el valor de α necesario para orientar el máximo de radiación a un ángulo determinado, que es básicamente en lo que consiste el *beamforming*.

Representación del Factor de Agrupación

A partir del $FA(\psi)$ en coordenadas cartesianas se puede obtener el factor de agrupación en el espacio real $FA(\theta)$ en coordenadas polares. Para ello se realiza un cambio de variable $\psi = kd \cos \theta + \alpha$, con ayuda de un círculo de radio kd y centrado en $\psi = \alpha$. [30]

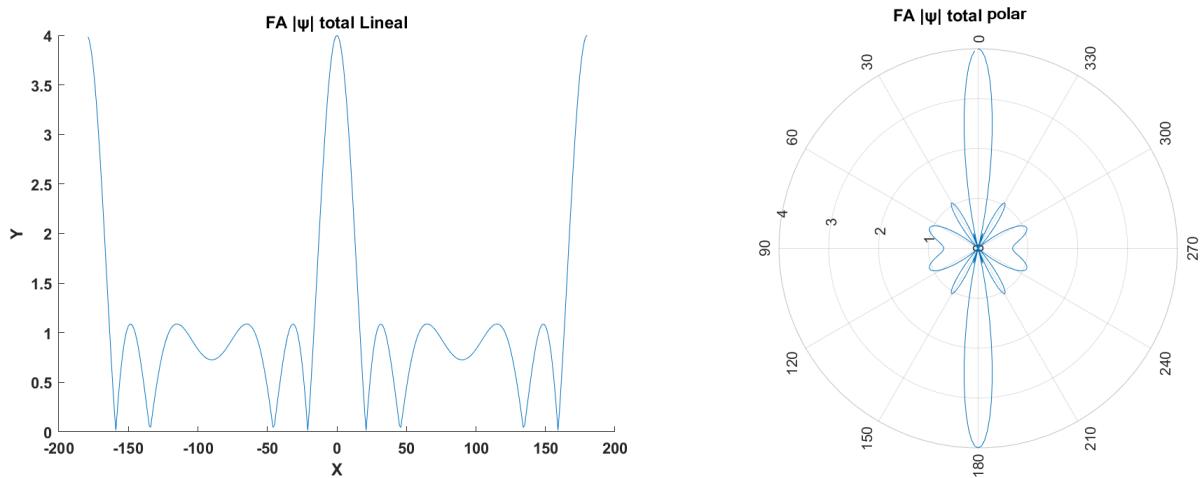


Figura 2.13: Representación del Factor de Agrupación de cuatro elementos en su forma cartesiana y en su forma polar

En la figura 2.13 esta representado el $FA(\psi)$ y $FA(\theta)$ de una agrupación de 4 antenas alimentadas con la misma fase y a la misma potencia, como hemos dicho antes el Factor de Agrupación es periódico de periodo 2π .

2.5. Calculo de parámetros acorde a BASTA

Como una vez generados los diagramas de radiación tendremos que calcular ciertos valores de estos diagramas lo vamos a hacer como se indica en el BASTA (*Base Station Antenna Standards*)[31]. En esta sección explicaremos como BASTA define estos valores que necesitamos calcular para caracterizar correctamente la antena.

2.5.1. Ancho de haz

Ancho de haz horizontal (*Azimuth Beamwidth*)

El ancho de haz horizontal a -3dB (o mitad de potencia) se define como el ancho angular entre los dos puntos cuya ganancia cae 3dB desde el máximo principal de la componente co-polar del corte horizontal del diagrama de radiación. Este valor se expresa en grados ($^{\circ}$) [31].

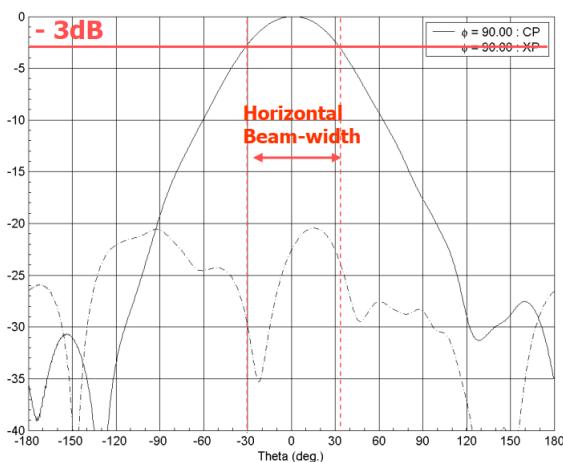


Figura 2.14: Definición de ancho de haz horizontal en BASTA

Ancho de haz vertical (*Elevation Beamwidth*)

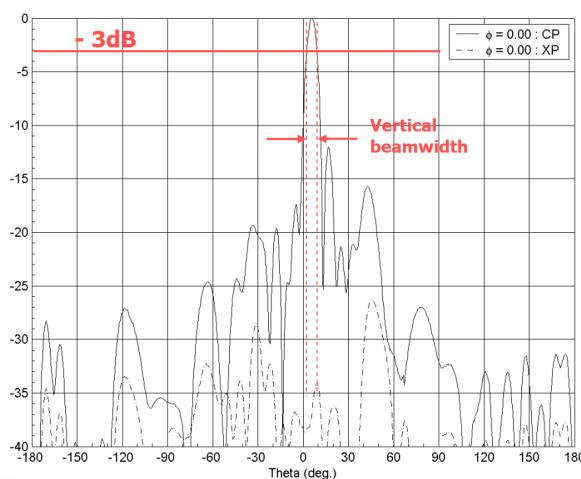


Figura 2.15: Caption

El ancho de haz vertical (*Elevation Beamwidth*) se define exactamente igual que el horizontal pero en el corte vertical.

2.5.2. Ángulo de inclinación vertical *Electrical Downtilt Angle*

El ángulo de inclinación vertical o Tilt vertical se define en BASTA como el ángulo entre el apuntamiento mecánico de la antena y el eje del haz a -3dB en el corte vertical [31]. La inclinación eléctrica se logra ajustando la fase de alimentación de los elementos radiantes de una antena, y no inclinando mecánicamente la propia antena.

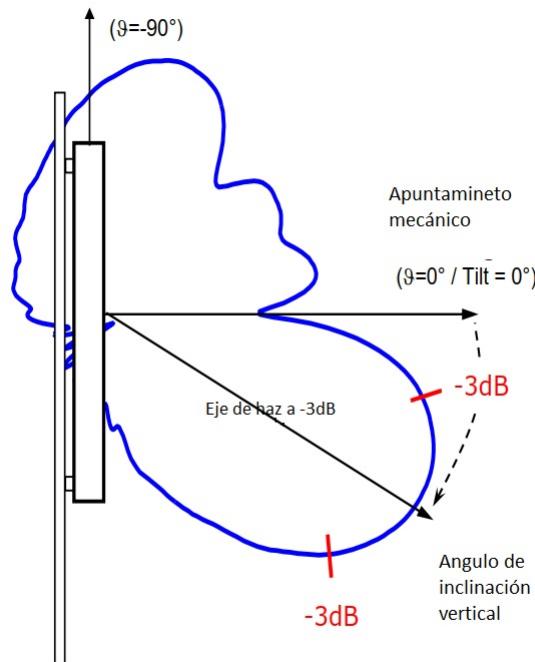


Figura 2.16: Ángulo de inclinación vertical (*Electrical Downtilt Angle*) definido en BASTA.

Como nuestra antena es de conformado de haces, también tendrá un ángulo de inclinación horizontal, BASTA lo define de la misma manera que el vertical pero en este caso en el corte horizontal.

También hay que indicar la desviación del Tilt, es decir la diferencia entre el Tilt medido de la manera anterior y el Tilt teórico.

2.5.3. Supresión del primer lóbulo lateral superior (*First Upper Sidelobe Suppression*)

Este parámetro se define como la diferencia de ganancia entre el pico del haz principal y el pico del lóbulo lateral más cercano por encima de él [31]. Este parámetro se calcula en el corte vertical.

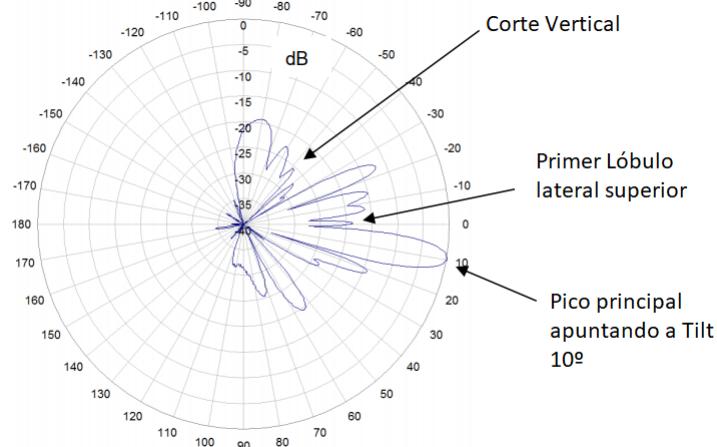


Figura 2.17: *First Upper sidelobe Suppression* definido en BASTA

2.5.4. Supresión del lóbulo lateral a 20º (*Upper Sidelobe Suppression, Peak to 20º*)

BASTA define este parámetro como la diferencia entre el máximo pico del haz principal y el nivel más alto del lóbulo secundario que esté en la región de 20º por encima de el pico del haz principal [31]. Es posible que en el rango de 20º encontremos el máximo de un lóbulo secundario, que no encontraremos un máximo pero si una porción de un lóbulo secundario o que solo encontraremos el lóbulo principal.

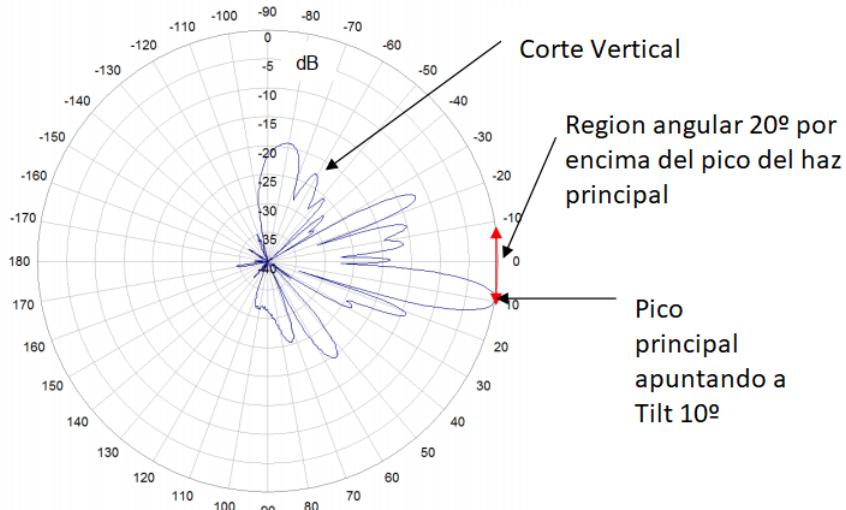


Figura 2.18: *Upper Sidelobe Suppression, Peak to 20º* definido en BASTA

2.5.5. Discriminación *Cross-Polar* en el máximo de apuntamiento (*Cross-Polar Discrimination at boresight*)

La discriminación *cross-polar* abreviado XPD o CPD se define en BASTA como la relación más baja entre la componente *co-polar* de una polarización concreta y la componente de la polarización cruzada ortogonal (típicamente a $+45^\circ$ a -45° o viceversa) [31]. Por lo tanto calcularemos la diferencia entre ambas componentes en el máximo de apuntamiento. Este parámetro nos indica lo que interfiere una polarización sobre la otra

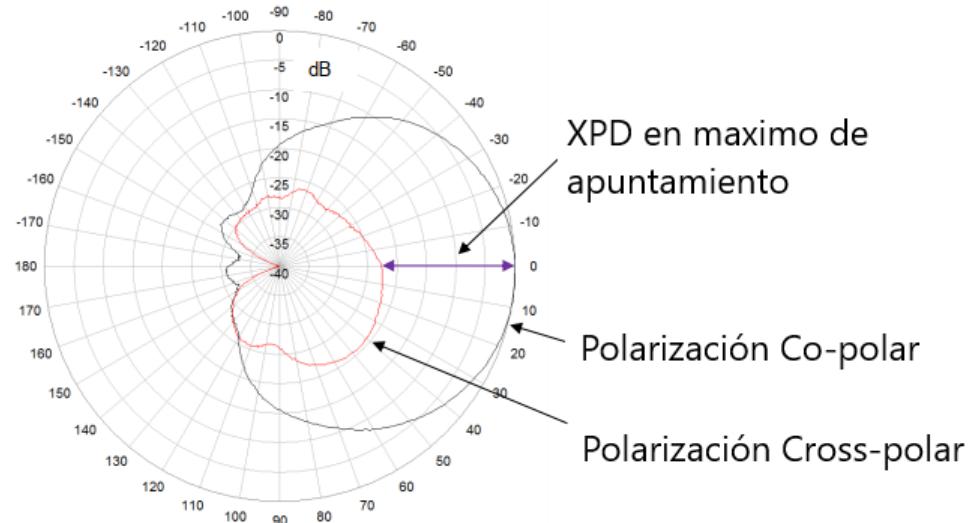


Figura 2.19: *Cross-polar Discrimination over Sector* definido en BASTA

2.5.6. *Front-to-Back* de la potencia total a $\pm 30^\circ$ y a 0°

El Front-to-Back es la relación de ganancia de la potencia total entre el pico del haz principal y el Valor de la potencia total en la región angular de 60° del corte horizontal contenido entre dos límites, cada uno de 30° respecto a 180° (corresponde con la parte trasera de la antena).

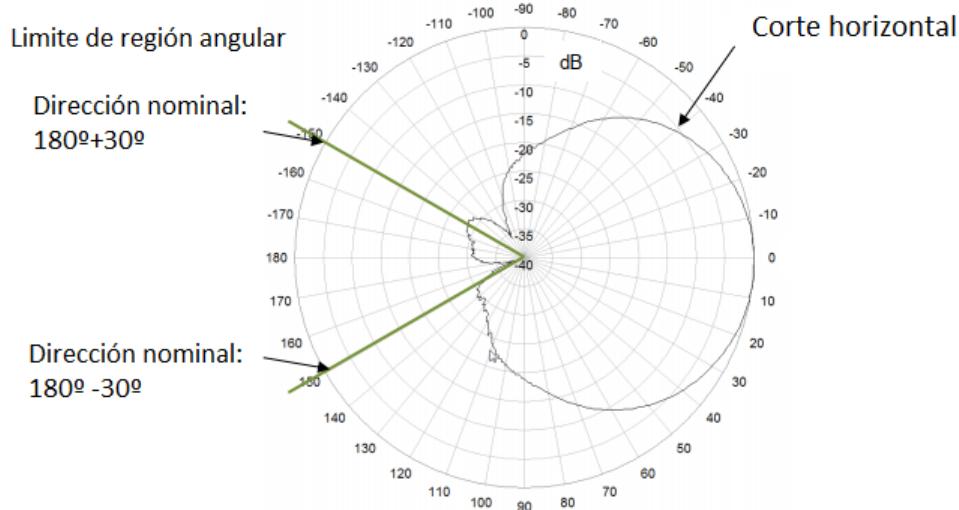


Figura 2.20: Definición del *Front-to-Back* de la potencia total a $\pm 30^\circ$ en BASTA

Capítulo 3

Obtención de medidas y desarrollo del *software*

La primera parte del trabajo consiste en medir los diagramas de radiación para cada una de las 4 columnas de la antena, para ello se empleó el sistema multi-sonda de medida de campos radiados ©StarLab de SATIMO . Después de hacer las medidas, se procesan mediante el *software SatEnv*¹, de aquí obtenemos unos archivos de texto que contienen la información de los diagramas completos de radiación. El ultimo paso del procesamiento de los datos es importarlos en MATLAB.

3.1. Obtención de medidas de columnas individuales

Para medir el diagrama de radiación de cada columna por separado lo que hacemos es alimentar únicamente la columna en la polarización que queremos medir y fijar el ángulo de orientación vertical (mediante un desfasador que al desplazarlo cambia la fase de alimentación de cada elemento radiante y por lo tanto inclina el haz principal en el plano vertical). En concreto la antena *TNA330A00*, que es la que se usará para desarrollar el trabajo tiene 4 columnas, lo que quiere decir que tiene 8 puertos de alimentación (un puerto para cada polarización y cada columna) y un puerto adicional de calibración.

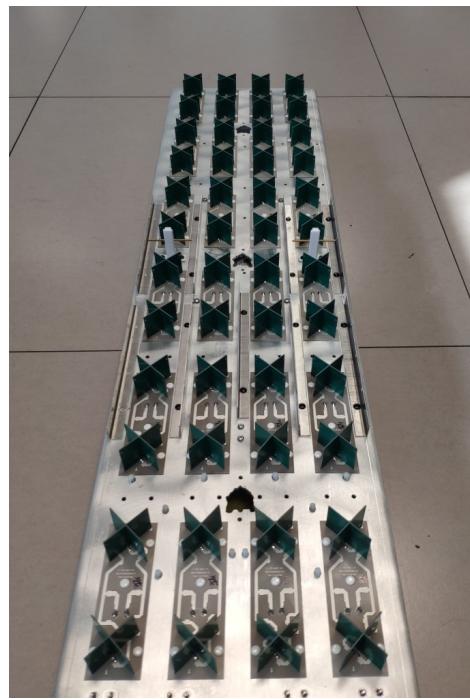
El *tilt* vertical va desde los 2º a los 12º, para seleccionar cada uno de los ángulos moveremos el desfasador manualmente, pero en la práctica este movimiento del desfasador lo realiza un motor que es controlado mediante radiofrecuencia por los operadores que compran la antena.

En la ©StarLab medimos campos radiados en campo cercano con un sistema de coordenadas cilíndrico. Para medir colocamos la antena en el riel central y la fijamos, configuramos los parámetros de medición necesarios y se comienza a medir, este proceso hay que repetirlo para cada *tilt* y cada polarización en cada una de las 4 columnas que componen la antena. Una vez finalizada cada medida se exportan los datos obtenidos a *SatEnv*(*software* de SATIMO). Mediante *SatEnv* hacemos la transformación de campo cercano a campo lejano para así obtener luego los diagramas de radiación.

¹<http://www.satenv.com/satenvdescription.htm>



(a) Sistema de medida multi-sonda ©StarLab



(b) Antena 5G TNA330A00 diseñada por TELNET-RI

Figura 3.1: ©StarLab y Antena 5G

3.2. Procesado de las medidas

Una vez que se han hecho las medidas se procede a procesarlas mediante el software *SatEnv* con el que previamente habíamos hecho la transformación de campo cercano a lejano. Para poder procesar los diagramas de radiación completos tuve que crear una Macro que se ejecutaba en este software, debido a que nunca antes se había tenido interés en sacar los diagramas de radiación completos, sino que se procesaban directamente los cortes horizontales y verticales.

Esta Macro lo que hace es que a partir de un fichero de frecuencias (contiene las frecuencias en las que nos interesa analizar esta antena, en nuestro caso este fichero va de 3300 MHz hasta 4200 MHz con paso de 50MHz) guarda en un archivo .txt los datos correspondientes al diagrama de radiación para cada una de las frecuencias que le hemos indicado anteriormente.

El archivo .txt generado por *SatEnv* contiene la información para una polarización en un determinado tilt de una de las columnas. Para caracterizar la antena completa por lo tanto necesitamos 88 de estos archivos (11 *titles*, 2 polarizaciones y 4 columnas). Este archivo esta organizado de tal manera que contiene los valores en DBi de las componentes Co polar +45, Cross polar -45 y la ganancia total para cada una de las frecuencias y en todos los ángulos posibles de ϕ y θ . Para cada uno de los 360° de ϕ se calculan todas las componentes anteriores para los 180° de θ , de esta manera tenemos el diagrama de radiación completo en coordenadas cilíndricas.

Estos archivos que contiene los datos del diagrama de radiación son muy grandes, superando los 50 *Mbytes*. Por lo tanto hemos generados aproximadamente 4.5 *GBytes* de datos que después debemos procesar.

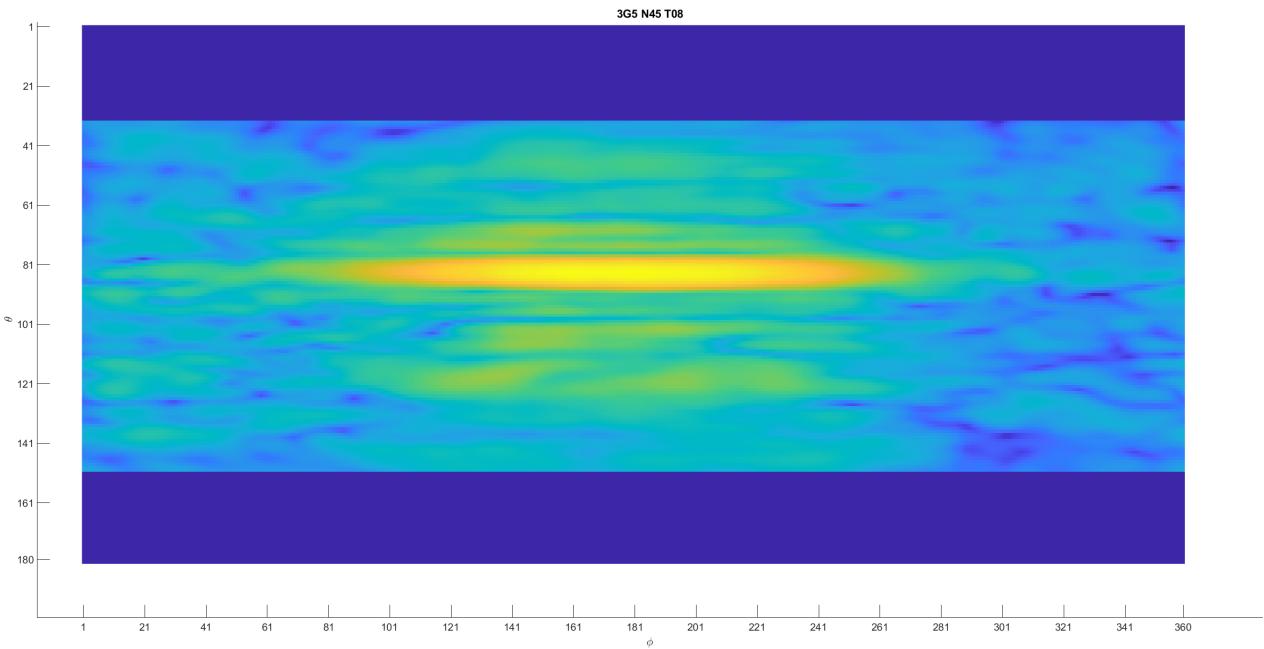


Figura 3.2: Diagrama de radiación de la ganancia total de Columna 1 a 3600 MHz polarización N45 y Tilt 08

En la figura 3.2 se ilustra bastante bien lo que contienen los ficheros, las zonas del diagrama con colores más vivos quiere decir que la ganancia es mayor. En este caso hemos cogido la ganancia total de la Columna 1 en la polarización negativa con el Tilt a 8° . La frecuencia la hemos fijado a 3600 MHz.

3.2.1. Importación y optimización de los datos en MATLAB

Para desarrollar los cálculos necesarios vamos a utilizar MATLAB ya que esta optimizado para realizar cálculos matriciales. El primer paso es abrir los archivos *.txt* en MATLAB, lo que se hace es que cuando se selecciona para abrir por ejemplo el archivo '*RadiationPattern 3G5 P1 N45 T08.txt*' (Archivo generado por *SatEnv* que corresponde a el diagrama de radiación completo de la Columna 1 en la polarización N45 y *Tilt* 8.) el programa desarrollado busca en la carpeta en la que están todos los archivos generados por *SatEnv* aquellos que correspondan a la misma polarización y mismo *Tilt* pero de las otras 3 columnas restantes, de esta manera no habrá problemas de mezclar archivos de diferentes medidas y cargaremos las medidas de las 4 columnas seleccionando únicamente una de ellas.

Optimización de datos del diagrama de radiación

El único inconveniente de este método es que MATLAB cuándo lee un archivo lo hace linea a linea y lo guarda en un vector, el problema es que estos archivos son tan grandes que cada uno se guarda en un vector dimensiones $[1 \times 3.844.440]$. Esta manera de almacenar la información es muy poco eficiente para realizar los cálculos que necesitamos y el proceso de abrir los archivos es lento (aproximadamente 30 segundos para abrir los 4 archivos).

Para solucionar este problema lo que hacemos es organizar este vector de otra manera y convertirlo en una matriz de 4 dimensiones. Cada una de las dimensiones corresponden a las componentes (Co polar +45, Croos polar -45 y Ganancia total), las 19 frecuencias en las que hemos analizado la antena, los 180° de ϕ y los 360° de θ respectivamente. Por lo tanto las dimensiones de esta matriz serán $[3 \times 19 \times 181 \times 360]$.

Para compactar aun más las medidas lo que hacemos es guardar las 4 matrices anteriores correspondientes a cada una de las 4 columnas en una única matriz de 5 dimensiones, de esta manera el diagrama de radiación en una polarización y un tilt de la antena completa va a estar almacenado en una única matriz. Mediante un script que he desarrollado en MATLAB transformo todos los archivos *.txt* generados por *SatEnv* en archivos *.mat* que contienen estas matrices de 5 dimensiones.

Obtención de información de la cabecera

En la cabecera de los archivos *.txt* se encuentra la información sobre las frecuencias en las que se ha medido la antena, por lo tanto necesitamos extraer esta información y guardarlo en otro archivo *.mat* que contendrá los valores de las frecuencias en MHz de las frecuencias.

De esta manera cuando queramos abrir un diagrama con MATLAB lo que haremos sera abrir el *.mat* en vez del *.txt*, ya que el tiempo que tarda MATLAB en abrir los *.mat* es mucho menor y contiene la misma información tanto de los diagramas de radiación como de la cabecera.

3.2.2. Representación de los diagramas de radicación de las columnas individuales

Una vez tengamos hechas las medidas y las carguemos en MATLAB, antes de empezar a hacer las simulaciones es buena idea comprobar que las medias obtenidas están bien y que no encontramos nada raro en ellas. Para ello en el *software* desarrollado una vez hayamos abierto la medida que deseamos tendremos la opción de representar su diagrama de radiación tanto en 2D como en 3D.

Mediante la sencilla interfaz que se ve en la figura 3.3 podemos seleccionar cual de las 4 columnas queremos representar, además de las diferentes componentes (Co-polar +45, Croos-polar -45 y Ganancia total) y la frecuencias.

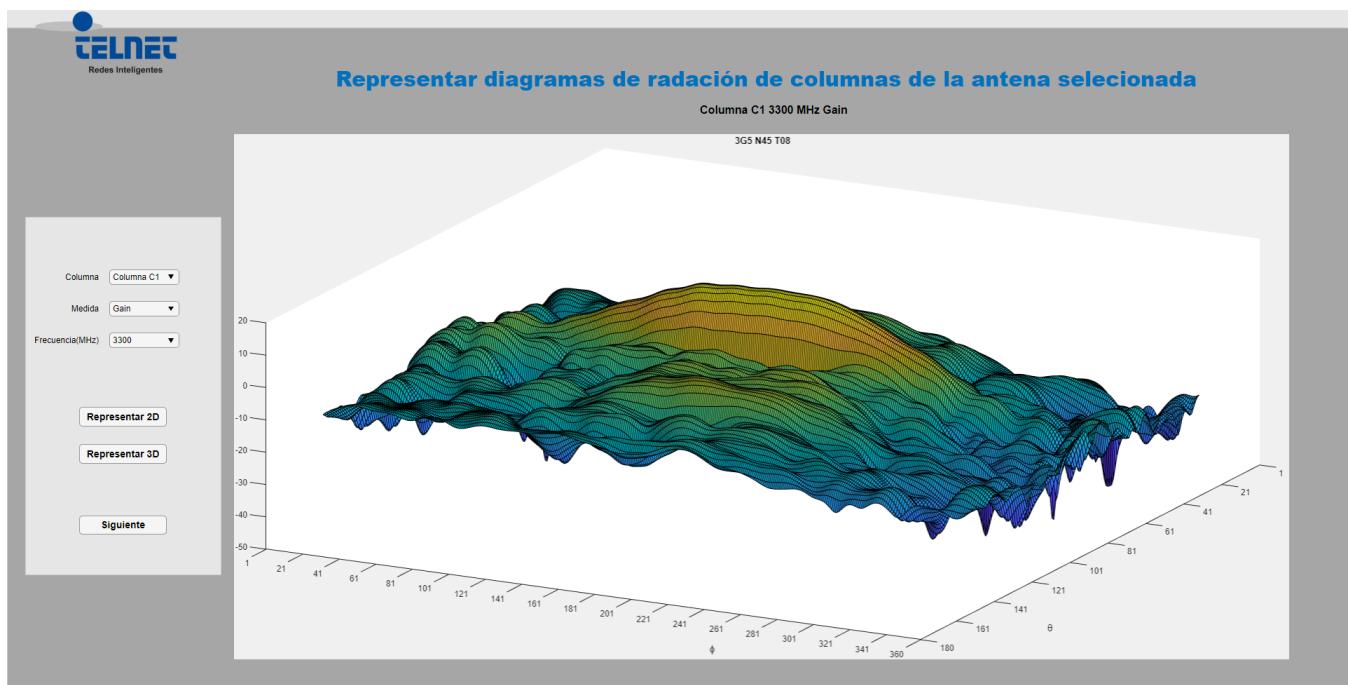


Figura 3.3: Interfaz para representar los diagramas de radiación de las columnas individuales

En la figura 3.3 hemos representado la ganancia total a 3300 MHz de la columna 1 en el *Tilt 08* y polarización N45, la idea es que en el programa final una vez que hayamos abierto las medidas nos salga un cuadro de dialogo preguntando si queremos representar las medidas que acabamos de abrir, en caso afirmativo nos llevara a la ventana de la figura 3.3.

3.3. Cálculos de diagramas de radiación simulados

Una vez llegados a el punto en el que tenemos las medidas de las 4 columnas que componen la antena optimizadas en MATLAB vamos a proceder a realizar las simulaciones. Como se ha contado en el capítulo 2.4 sobre agrupaciones de antenas, cuando hacemos un conformado de haz vamos a poder apuntar el máximo de este haz a la dirección que deseemos del espacio cambiando el desfase de alimentación de las columnas, esto es lo que se conoce como *beamforming*. A parte de modificar la fase también podremos modificar la amplitud de la alimentación de cada columna, de esta manera influiremos en el tamaño del ancho del haz principal.

Debido a todos estos parámetros que podemos variar y el alto número de diagramas de radiación resultantes se dividirán las opciones de simulación del programa en dos, *Service Beam*, donde indicaremos el ángulo de apuntamiento en el intervalo $[-30^\circ, +30^\circ]$ y el programa se encargará de calcular las fases y amplitudes necesarias, y la opción *Personalizado* donde introduciremos manualmente un vector de fases y otro de amplitudes.

Por tanto una vez procesadas las medias el programa pregunta que opción de simulación quieres, *Service Beam* o *Personalizado*

3.3.1. Service Beam

En esta opción tendremos que indicar el ángulo al que queremos apuntar el haz principal en el plano horizontal del espacio, para calcular el desplazamiento de fase necesario en función del ángulo de apuntamiento usaremos la ecuación 2.14.

Factor de agrupación $FA(\psi)$

El siguiente paso es calcular la componente del $FA(\psi)$ de cada una de las columnas para cada frecuencia, utilizaremos para ello la ecuación 2.11. Este cálculo debemos repetirlo para cada frecuencia, debido a que el parámetro $k = \frac{2\pi f}{c}$ depende de la frecuencia y será distinto para cada una de ellas.

En la figura 3.4 podemos ver la componente del factor de agrupación de cada una de las columnas que componen la antena en la forma cartesiana, si representamos la suma de los cuatro factores de agrupación en forma polar veremos claramente el apuntamiento de la antena.

En la versión final del programa estará la opción de representar tanto las componentes del factor de agrupación de cada columna como el factor de agrupación total, para poder identificar fácilmente posibles errores.

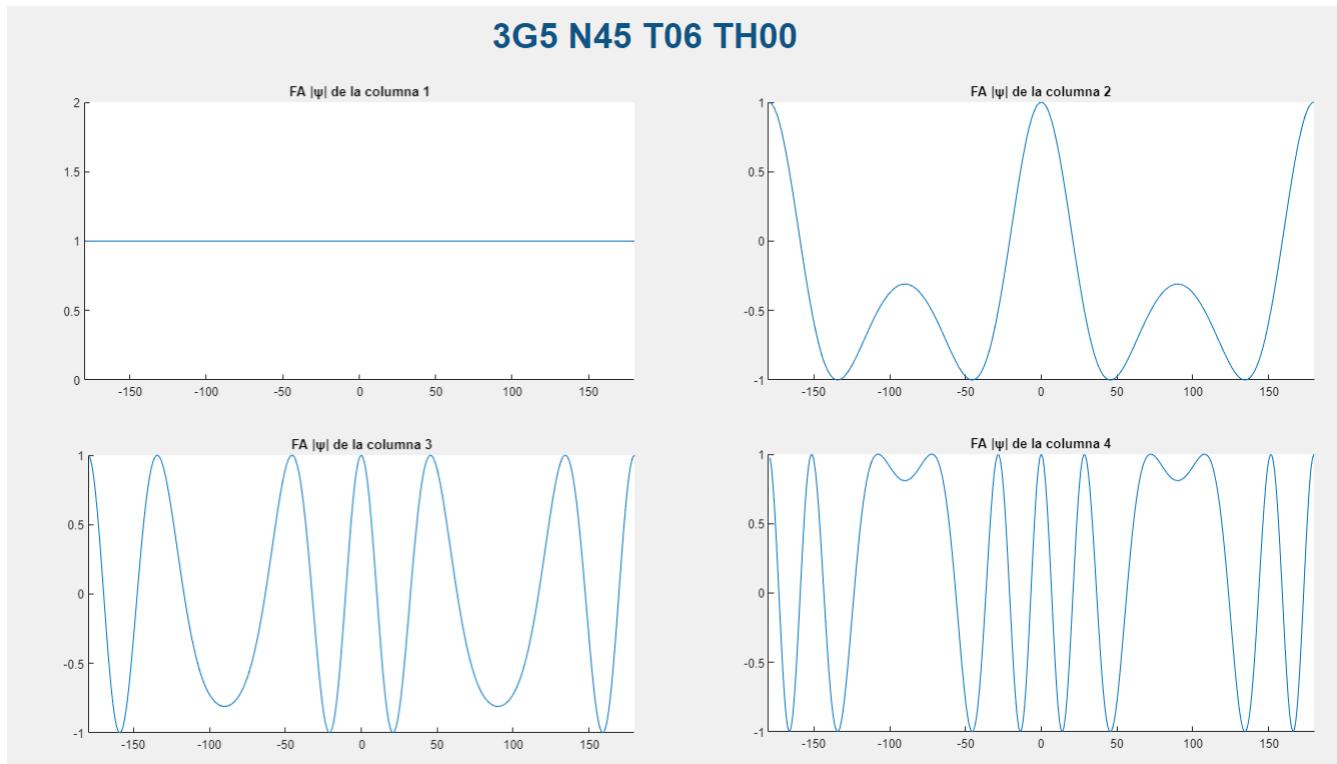


Figura 3.4: Representación del factor de agrupación de cada una de las columnas con *Service Beam* a 0°

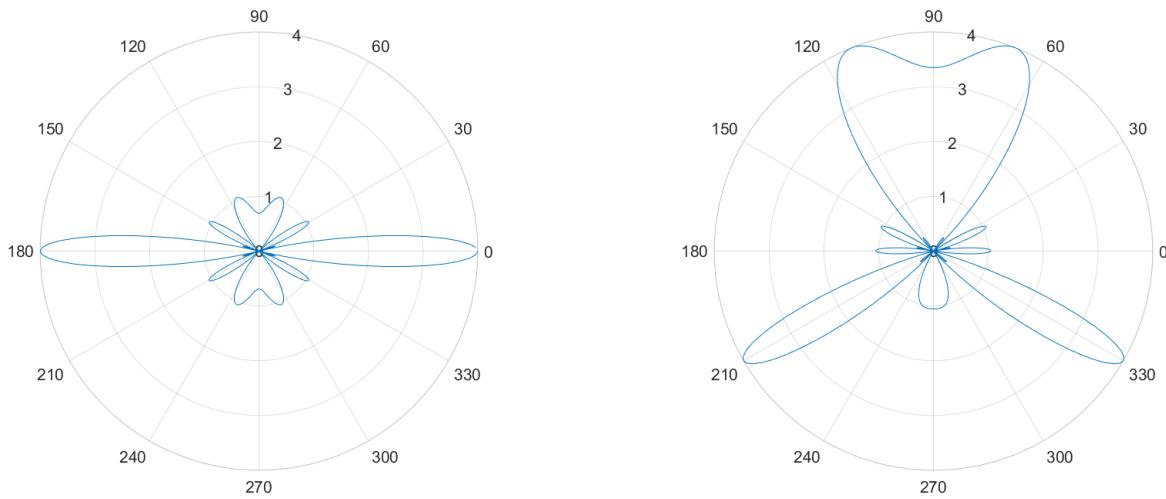


Figura 3.5: Factores de agrupación totales para diferentes ángulos del *Service Beam*

Calculo de diagrama de radiación total

Una vez tengamos los componentes del factor de agrupación de cada columna lo que tenemos que hacer es el producto del diagrama de radiación de cada columna medido anteriormente y la componente de los factores de agrupación calculados. Por ultimo hacer el sumatorio de cada uno de estos productos como indica la ecuación 2.10.

Este proceso lo haremos para cada frecuencia y cada componente, el resultado de estas operaciones lo guardaremos en una matriz de 4 dimensiones similar a la que guardábamos los diagramas de las columnas individuales con la diferencia que esta matriz contendrá el diagrama completo simulado de la antena, se guarda de esta manera para posteriormente facilitar la representación y

el cálculo de valores. Esta matriz tendrá dimensiones $[3 \ 19 \ 181 \ 360]$, valores que corresponden a los 3 tipos de componentes, las 19 frecuencias y los valores de ϕ y de θ respectivamente.

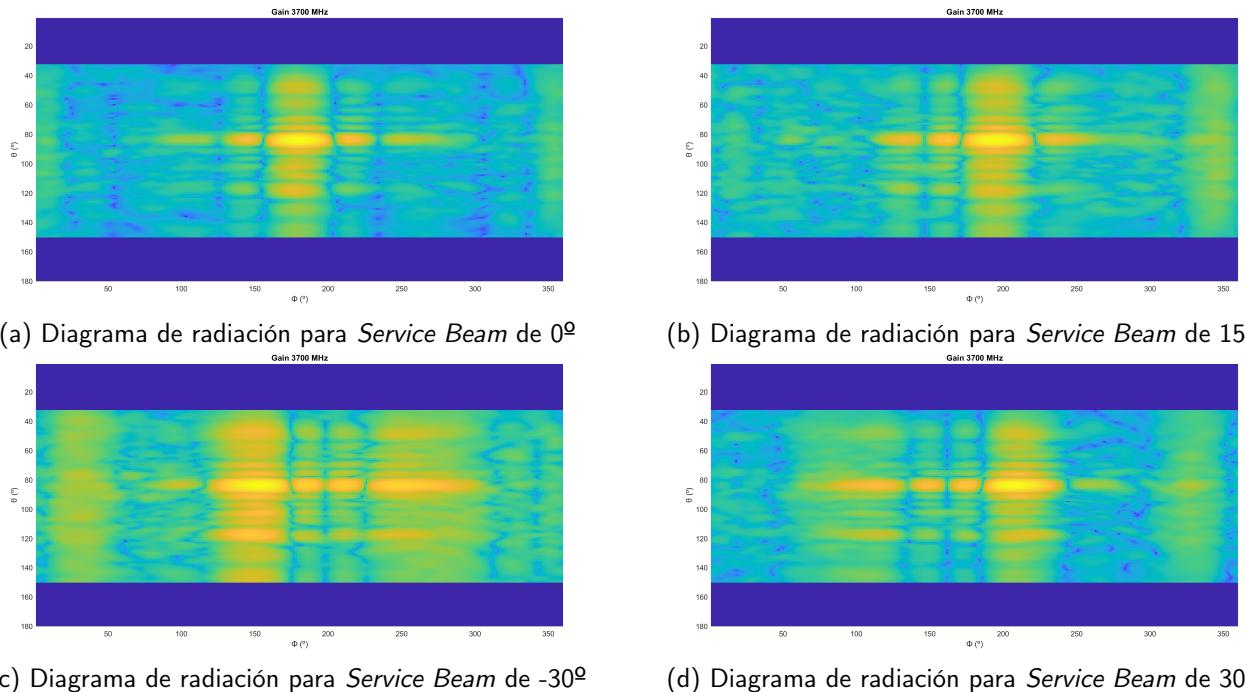


Figura 3.6: Diagrama de radiación para diferentes ángulos de *Service Beam* de la ganancia total a 3700MHz.

El hecho de guardar el diagrama de radiación como una matriz de 4 dimensiones hace más sencillo trabajar con datos tan grandes porque tenemos el diagrama de radiación completo de dimensiones $[181 \ 360]$ para cada frecuencia y componente, por lo tanto de esta manera esta organizado y podremos acceder a cada valor mediante la indexación de diferentes parámetros en la matriz.

En la figura 3.6 vemos unos cuantos diagramas de radiación en donde podemos ver claramente el *beamforming*. Podemos ver como aumenta la directividad y como se orienta el haz principal hacia un lado u otro del plano horizontal en función del ángulo que se ha seleccionando.

Por lo tanto llegados este punto ya hemos alcanzado uno de los objetivos de este trabajo que era simular diagramas de radiación *beamforming* en función de un ángulo seleccionado.

La figura 3.7 representa lo mismo que cuando en la ©StarLab de Satimo medimos una configuración *beamforming* utilizando unos cables o '*latiguillos*' para conseguir de esa manera desfasar cada columna lo que deseemos. La diferencia es que para hacer estas medias primero necesitamos calcular la longitud de los cables que desfasan, cortarlos a mano por lo que se pierde precisión y después de eso comenzar las medidas.

Todo esto es muy laborioso y además solo se podría hacer para unos cuantos ángulos del *Service Beam* como 0° y 30° ya que a la más mínima desviación en la longitud del cable se traduce en un desfase que no deseamos debido a la alta frecuencia con la que trabaja esta antena.

Este proceso de medida es muy costoso en tiempo y puede generar errores por la falta de precisión, con el *software* que se ha desarrollado se pude realizar este mismo proceso en apenas 5 segundos y con la posibilidad de configurarlo para cualquier ángulo desde -30° a 30° .

La parte que más le cuesta calcular al programa es la conversión de Dbi a lineal los diagramas de radiación que hemos obtenido de las columnas para realizar las operaciones y luego volver a pasarlos a Db para la representación y el calculo de valores.

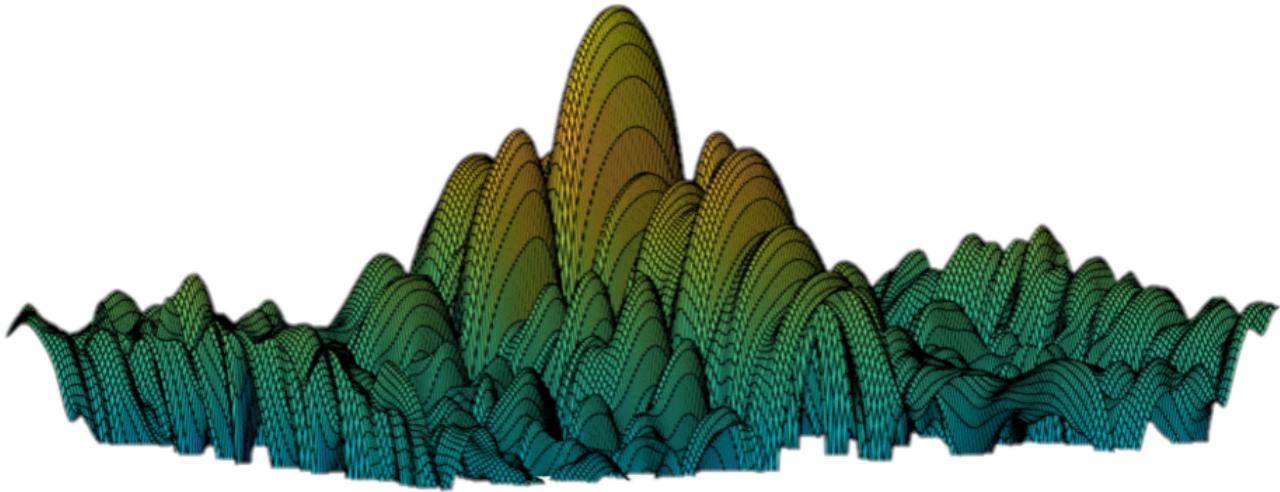


Figura 3.7: Diagrama de radiación completo en 3D con *Service Beam* a 0°

Procesado de cortes Horizontales y Verticales

Una vez generado el diagrama de radiación completo lo que vamos a hacer son los cortes tanto en el plano vertical como en el plano horizontal.

Para esto buscamos el ángulo de ϕ y θ correspondientes a el máximo de radiación, una vez tengamos estos ángulos calculados fijamos las coordenadas y hacemos el corte en ambos planos. En el corte horizontal vamos a necesitar calcular la componente *co-polar* y la *cross-polar*, mientras que del corte vertical únicamente necesitaremos la componente *co-polar* para caracterizar completamente el diagrama según estipula el *BASTA*(*Base Station Antenna Standards*).

Para que la representación de los cortes sea más clara hemos dividido ambos cortes en dos subbandas frecuenciales, la primera que va desde los 3300 MHz hasta los 3800 MHz y la segunda banda entre 3800 y 4200 MHz. Cada una de las líneas que componen la gráfica representan el valor del corte del diagrama de radiación para cada frecuencia, como podemos ver en la figura 3.8.

En los cortes horizontales que es necesario representar la polarización *co-polar* como la *cross-polar* lo que hacemos es representar la polarización $+45$ con linea continua y la polarización -45 con linea discontinua si la medida es de polarización P45, y al revés si la polarización es N45. De esta manera nos podemos hacer una idea de como se comporta la antena en parámetros de discriminación *cross-polar*.

Estas cuatro gráficas que vemos en la figura 3.8 son suficientes para caracterizar la antena en cada *Tilt* y cada polarización. Cuando se mide un antena mediante ©StarLab el archivo final generado son también estas gráficas.

3G5 N45 T07 TH15

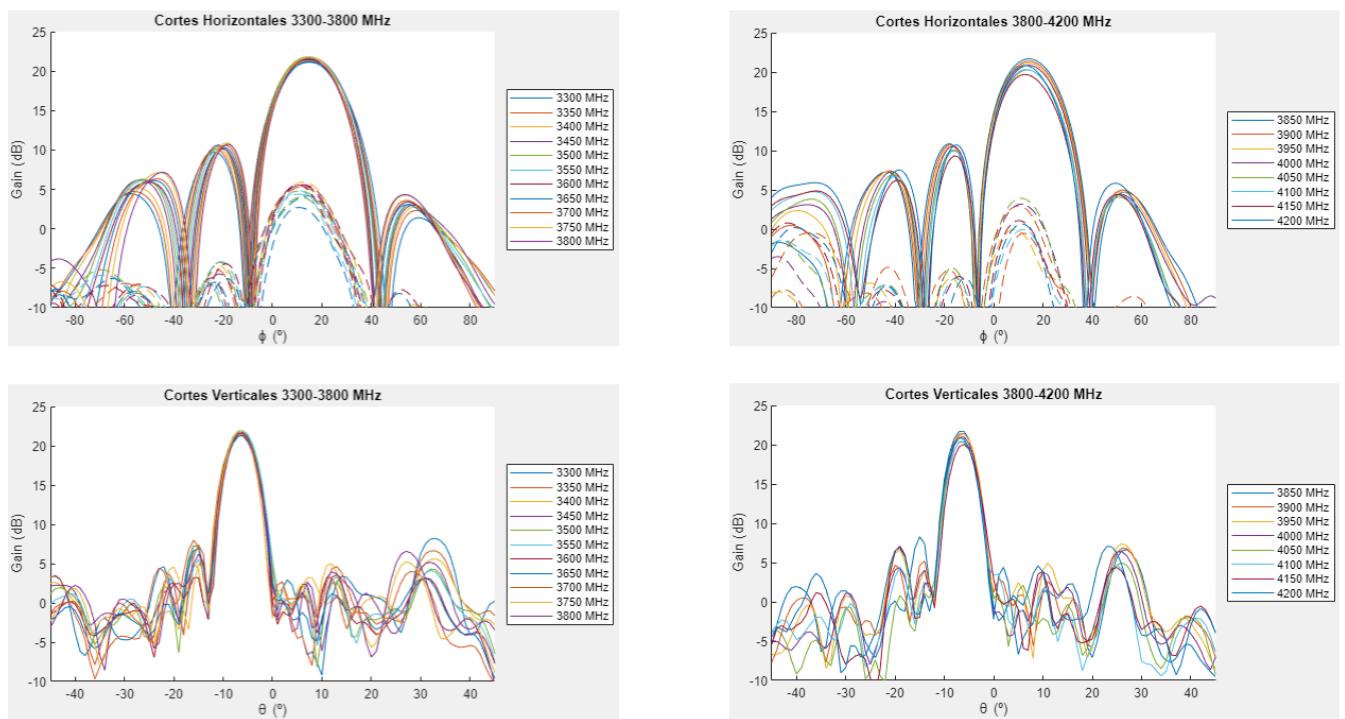


Figura 3.8: Representación de los cortes Horizontal y Vertical del diagrama de radiación de la medida en la polarización N45, *Tilt* a 7° y *Service Beam* a 15°

Introducción de parámetros del *Service Beam*

Como he comentado al comienzo de esta sección la idea de la opción de representación *Service Beam* es introducir como parámetro el ángulo al que queremos que apunte el máximo del haz principal conformado a partir de las cuatro columnas.

Para facilitar la introducción de parámetros en la interfaz gráfica del programa se ha incluido un '*Slider*' en el que seleccionaremos el ángulo del *service beam* entre -30° y $+30^\circ$.

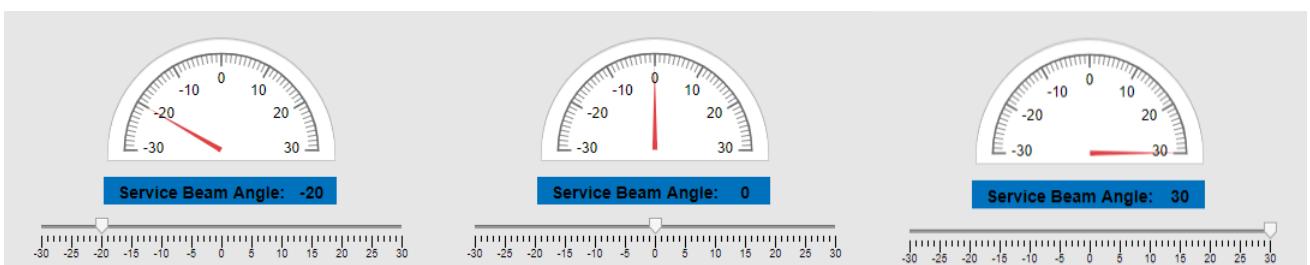


Figura 3.9: Ejemplos de *Sliders* y calibres para seleccionar el *service beam*

Como vemos en la figura 3.9 modificamos el ángulo hacia donde apuntamos la antena mediante el cursor del *slider*, y en los calibres podemos ver de manera gráfica hacia donde esta apuntando la antena. De esta sencilla manera podemos generar los diagramas de radiación de cualquier *service beam* sin necesidad de preocuparse por configurar los vectores de alimentación y de fase.

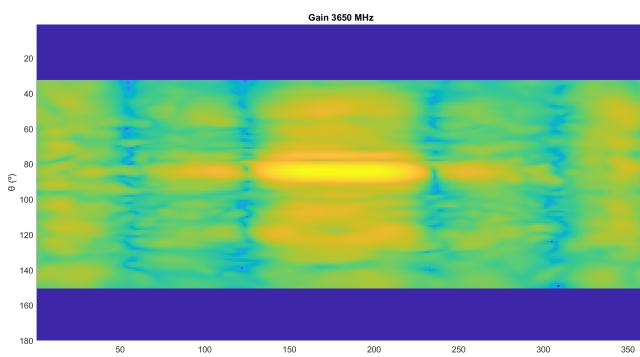
3.3.2. *Broadcast Beam* y vectores de fase y amplitud personalizados

Debido que la opción anterior no abarca todos los diagramas de radiación posibles que puede generar esta antena, había que añadir al programa la opción de introducir de forma manual los vectores de alimentación y fase, que son los dos parámetros de los que depende el beamforming, aparte de la distancia entre las columnas.

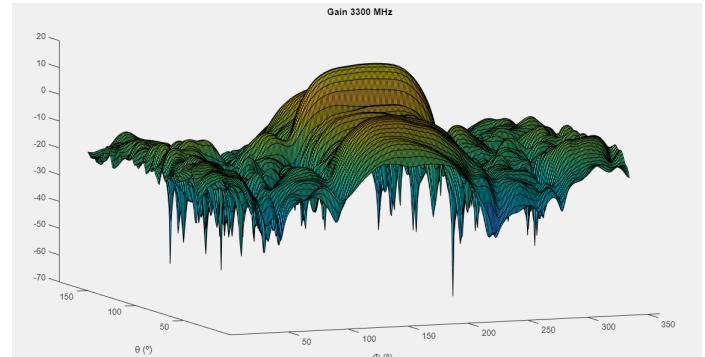
La mayor utilidad de esto va a ser generar el diagrama de radiación correspondiente al *Broadcast Beam*, que se trata de un conformado que es similar a los de las antenas de la generación 4G, con un ancho de haz a -3dB de aproximadamente 60° , este conformado es especialmente importante porqué se utiliza para procesar el canal de transmisión, el canal de control y las señales de referencia de todos los dispositivos de usuario en una celda.[20].

En concreto los vectores de alimentación y fase con los que hay que alimentar las columnas de esta antena para conformar el *Broadcast Beam* son $[-6 \ 0 \ 0 \ -6]$ en dB y $[120 \ 0 \ 0 \ 120]$ en grados($^\circ$) respectivamente. El vector de alimentación hace referencia a las atenuaciones de cada columna y el vector de fases a la fase en grados aplicada a la entrada de alimentación de cada columna. Estos vectores tienen 4 componentes ya que esta antena esta formada por 4 columnas.

La única diferencia en las operaciones usadas en el apartado 3.3.1 es que para calcular el *Service Beam* necesitamos primero calcular primero el vector de fases en función del ángulo *Service Beam*, y ahora introducimos el vector directamente, por lo tanto estos cálculos son ligeramente más rápidos. Evidentemente podemos llegar a los mismos diagramas que generamos en *Service Beam* si introducimos los vectores que forman estos conformados.



(a) Diagrama de radiación *broadcast beam* en 2D



(b) Diagrama de radiación *broadcast beam* en 3D

Figura 3.10: Diagramas de radiación en 2D y 3D para *tilt* 06 y polarización N45 en su conformado de *Broadcast Beam*.

A priori se puede observar en la figura 3.10 que este conformado tiene menos directividad que los conformados *Service Beam*, ya que como hemos dicho antes estamos buscando un ancho de haz horizontal a -3dB de unos 60° . Este aumento del ancho de haz también se vera reflejada en una ganancia menor.

Procesado de cortes del *Broadcast Beam*

Se generan los mismos cortes que en el caso del *Service Beam*, en el corte horizontal se puede ver muy claramente las diferencias entre un tipo de conformado y el otro.

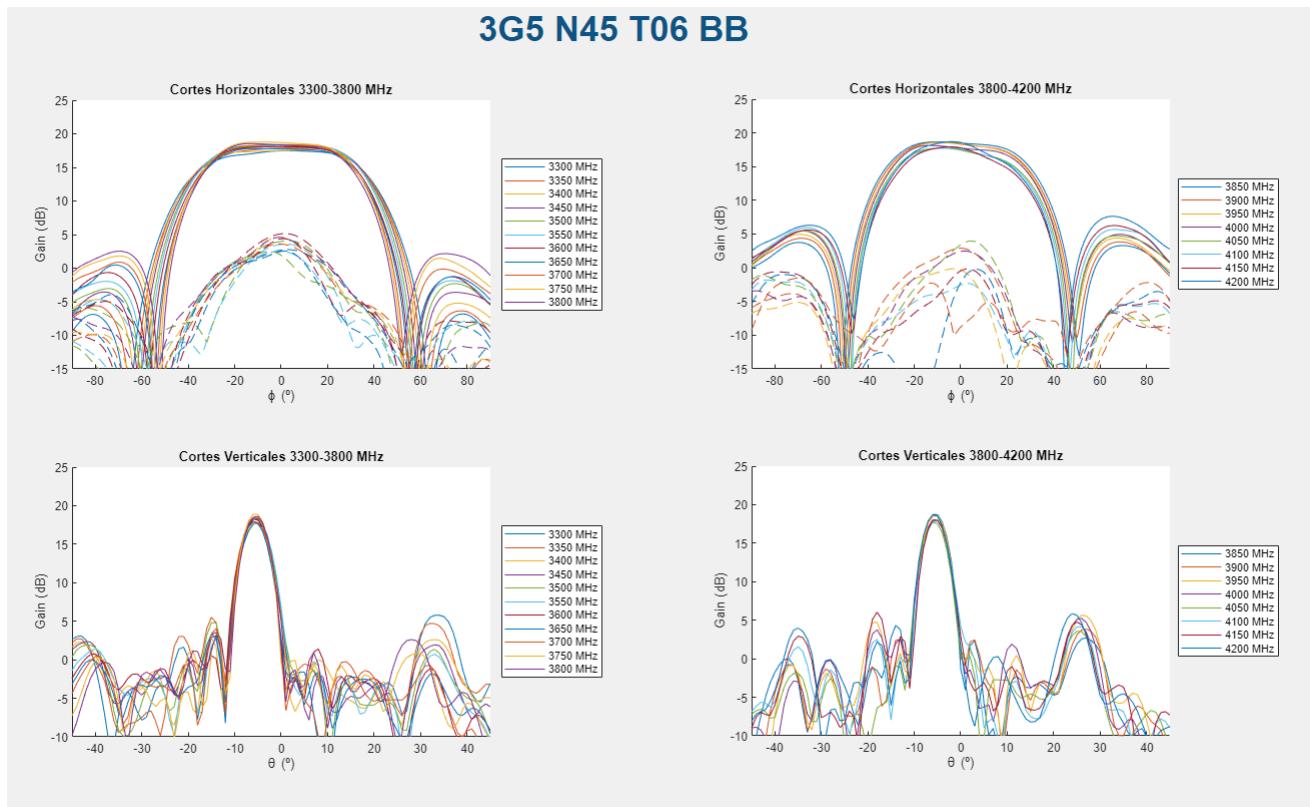


Figura 3.11: Representación de los cortes Horizontal y Vertical del diagrama de radiación de la medida en la polarización N45, Tilt a 6º en su conformado *Broadcast Beam*

Introducción de parámetros del *Broadcast Beam*

Para introducir los distintos parámetros necesarios para conformar estos haces se ha diseñado un sistema de introducción de valores por teclado mediante cuadros de texto.

Nombre	3G5 N45 T06 BB
Vector de Amplitudes (dB)	-6 0 0 -6
Vector de Fases (º)	120 0 0 120
Distancia entre arrays(mm)	50
Vectores Correctos	

Nombre	3G5 N45 T06 BB
Vector de Amplitudes (dB)	-6 0 0
Vector de Fases (º)	120 0 0 120 360
Distancia entre arrays(mm)	50
Vectores Correctos	
Error en vector de amplitudes	
Error en vector de fases	

(a) Introducción de vectores de fase y alimentación correctos

(b) Introducción de vectores de fase y alimentación incorrectos

Figura 3.12: Introducción de parámetros para conformar *Broadcast Beam* o cualquier otro conformado

Como se puede verán la figura 4.1 podemos modificar el nombre de la medida, el vector de amplitud en dB, el vector de fases en grados ($^{\circ}$) y por último la distancia entre las columnas que componen la antena. También se ha incluido un sistema que comprueba que ambos vectores introducidos por el usuario son correctos. Si son correctos (la dimensión del vector concuerda con el número de antenas configurado al principio del programa) lo indicará con un LED verde, mientras que si no lo son se indicará mediante un mensaje donde se explica el error y un LED rojo, además de no permitir hacer las simulaciones si no son correctos los vectores.

Llegados a este punto ya hemos cumplido uno de los objetivos de el trabajo, y el programa es capaz de generar cualquier diagrama de radiación de conformado de haces posible y procesar los cortes, y de esta manera caracterizar la antena.

3.4. Cálculo de valores para la caracterización de la antena

Una vez generados los diagramas de radiación de los diferentes conformados lo que tenemos que hacer es calcular los valores que hemos explicado en la sección 2.5. Estos datos nos darán información adicional sobre los cortes y nos permitirá hacer una mejor comparación entre conformados medidos mediante ©StarLab y simulados.

3.4.1. Generación de tabla de valores

Para organizar los valores usaremos una tabla desglosada en las distintas frecuencias que tenemos. A continuación una breve explicación de los valores que se han calculado.

- **Ganancia:** Para calcular la ganancia máxima simplemente buscamos el valor máximo de esta en cada frecuencia.
- **Ancho de haz horizontal y ancho de haz vertical:** Para calcular estos valores lo primero que hacemos es una interpolación lineal del los cortes para tener más resolución a la hora de calcularlos. Nos situamos en el valor máximo de ganancia y miramos en que punto la ganancia ha caído 3dB a ambos lados del máximo. El resultado sera el distancia entre dos puntos, se calcular la misma manera el horizontal y el vertical pero en sus respectivos cortes.
- **Tilt horizontal y Tilt vertical medidos:** Este valor nos indica el ángulo de inclinación real medido, es el punto medio de los puntos a -3dB calculados anteriormente.
- **Desviación del Tilt:** la desviación es la diferencia entre el ángulo de inclinación teórico (indicado en el nombre de la medida) y el realmente medido).
- **Supresión del primer lóbulo lateral superior:** Calculamos la diferencia de ganancia del máximo de radiación principal con el máximo del primer lóbulo secundario por encima de él en el plano horizontal. Para calcular este dato hay que tener en cuenta que en algunos casos el primer máximo secundario puede formar parte del lóbulo principal, por lo tanto debemos analizar la pendiente de la curva por si se da este caso.
- **Supresión del lóbulo lateral a 20 $^{\circ}$:** Es un parámetro similar al anterior, solo que analizamos en el rango de 20 $^{\circ}$ por encima del máximo del lóbulo principal del plano vertical, por lo tanto tenemos tres opciones: encontrarnos el máximo del lóbulo lateral, encontrarnos con parte del lóbulo lateral pero no el máximo o que el lóbulo lateral forme parte del lóbulo principal.

- **Discriminación cross-polar en el máximo de apuntamiento:** Se trata de la diferencia entre las componentes *cross-polar* y *co-polar* en su valor máximo.
- **Front-to-Back a $\pm 30^\circ$:** Diferencia entre el máximo de ganancia y la ganancia en la región angular de ± 30 desde 180° del plano horizontal.
- **Front-to-back a 0° :** Diferencia entre el máximo de ganancia y la ganancia en el punto a 180° (Parte trasera de la antena)

	TILT(deg)	TILT H (deg)	FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	T_meas(deg)	TILT_DEV (deg)	T_meas H (deg)	TILT_DEV H(deg)	FIRST_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_max (dB)	FTB_0 (dB)	FTB_30 (dB)
3300	8	0	3300	21.7100	23.6000	5.7400	7.4000	0.6000	-0.0100	0.0100	18.4300	13.3362	18.4259	15.3868	29.7361	27.9986
3350	8	0	3350	21.9500	22.9400	5.9500	7.6550	0.3450	-0.0500	0.0500	21.5000	13.1481	21.5041	15.9044	30.9427	26.1128
3400	8	0	3400	21.8300	22.9400	5.8900	7.4750	0.5250	-0.1000	0.1000	18.6200	13.3757	18.6227	15.0191	30.5415	27.4720
3450	8	0	3450	22.3100	22.6800	5.5100	7.4050	0.5950	-0.1400	0.1400	21.4900	12.9871	18.7405	17.1687	30.6316	27.1019
3500	8	0	3500	22.4000	22.1600	5.6200	7.4300	0.5700	-0.0700	0.0700	22.0900	13.1112	22.0934	15.0022	31.5653	29.9378
3550	8	0	3550	22.1700	22.0600	5.5800	7.2900	0.7100	-0.2100	0.2100	20.9600	13.2690	20.9577	14.8454	32.2811	30.2901
3600	8	0	3600	22.0700	21.3800	5.5500	7.4250	0.5750	-0.2500	0.2500	24.0800	13.4313	19.5416	14.5471	30.2075	25.7979
3650	8	0	3650	21.6800	21.4400	5.4500	7.5050	0.4950	-0.2900	0.2900	22.1800	12.7179	22.1832	15.3971	28.5764	23.7976
3700	8	0	3700	22.0400	21.1000	5.3600	7.5500	0.4500	-0.2800	0.2800	20.6900	13.1734	20.6905	15.5808	31.2345	29.8544
3750	8	0	3750	22.2800	21.0300	5.2900	7.5450	0.4550	-0.5450	0.5450	22.0500	12.7923	18.5056	15.4211	32.2800	29.1164
3800	8	0	3800	22.0500	20.8100	5.2400	7.4200	0.5800	-0.6350	0.6350	18.6900	12.9125	18.6883	17.4960	30.7663	29.4213
3850	8	0	3850	22.3700	20.2300	5.0700	7.6150	0.3850	-0.5250	0.5250	19.9200	12.9767	19.9183	17.4691	30.9052	28.8494
3900	8	0	3900	22.3200	19.8300	5.0400	7.5400	0.4600	-0.6950	0.6950	20.2800	13.1888	18.7146	19.7802	29.6661	29.3237
3950	8	0	3950	22.1000	19.5200	4.9600	7.3900	0.6100	-0.7000	0.7000	17.5600	13.0091	17.5603	18.2785	31.3042	31.1189
4000	8	0	4000	21.6400	19.5600	4.9900	7.4150	0.5850	-0.7500	0.7500	22.4900	12.8292	17.0649	17.8547	28.9373	27.5228
4050	8	0	4050	21.3800	18.9300	4.8800	7.5900	0.4100	-0.7050	0.7050	19.2100	13.5624	16.3295	21.2411	32.3153	29.2308
4100	8	0	4100	21.8100	18.5500	4.7600	7.3900	0.6100	-0.6350	0.6350	18.6700	13.9915	18.6724	18.7995	29.5638	26.3123
4150	8	0	4150	21.2000	18.3000	4.8600	7.2400	0.7600	-0.7400	0.7400	19.8000	14.0604	16.6230	18.7281	27.3152	26.1157
4200	8	0	4200	22.3900	18.1600	4.0000	7.7200	0.2800	-0.6800	0.6800	20.7600	14.1228	19.4072	25.2671	28.9588	27.2455
Promedio	NaN	NaN	NaN	21.9832	20.8011	5.2916	7.4737	0.5263	-0.4216	0.4216	20.4984	13.2629	19.1707	17.3256	30.4068	28.0326
Mínimo	NaN	NaN	NaN	21.2000	18.1600	4.7600	7.2400	0.2800	-0.7500	0.0100	17.5600	12.7179	16.3295	14.5471	27.3152	23.7976
Máximo	NaN	NaN	NaN	22.4000	23.6000	5.9500	7.7200	0.7600	-0.0100	0.7500	24.0800	14.1228	22.1832	25.2671	32.3153	31.1189
Mínimo Estadístico	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	0.1476	18.7914	12.8450	17.4535	14.6322	29.0498	26.1507

Figura 3.13: Tabla de valores calculados del diagrama de radiación de $Tilt\ 08^\circ$, $Service\ Beam\ 0^\circ$ en polarización N45

El programa calcula todos estos valores para cada frecuencia y los escribe en una tabla como la de la figura 3.13, aparte de calcular los valores hace la media y calcula el mínimo estadístico de alguna de las medidas.

A parte de generar esta tabla también se almacenan estos mismos valores en un fichero .txt con el nombre de la medida, porque puede ser de utilizad para por ejemplo pegar los valores en un documento Excel o enviar este fichero con los valores. De la misma manera también exporta las gráficas de los cortes en formato .png.

Por lo tanto ya tenemos los diagramas de radiación simulados y calculados los valores que nos dan información sobre estos, y por tanto son necesarios para el operador que compra la antena. Este era el objetivo principal del trabajo. A continuación mediante un diagrama de bloques simplificado explicaré el funcionamiento del software que he desarrollado.

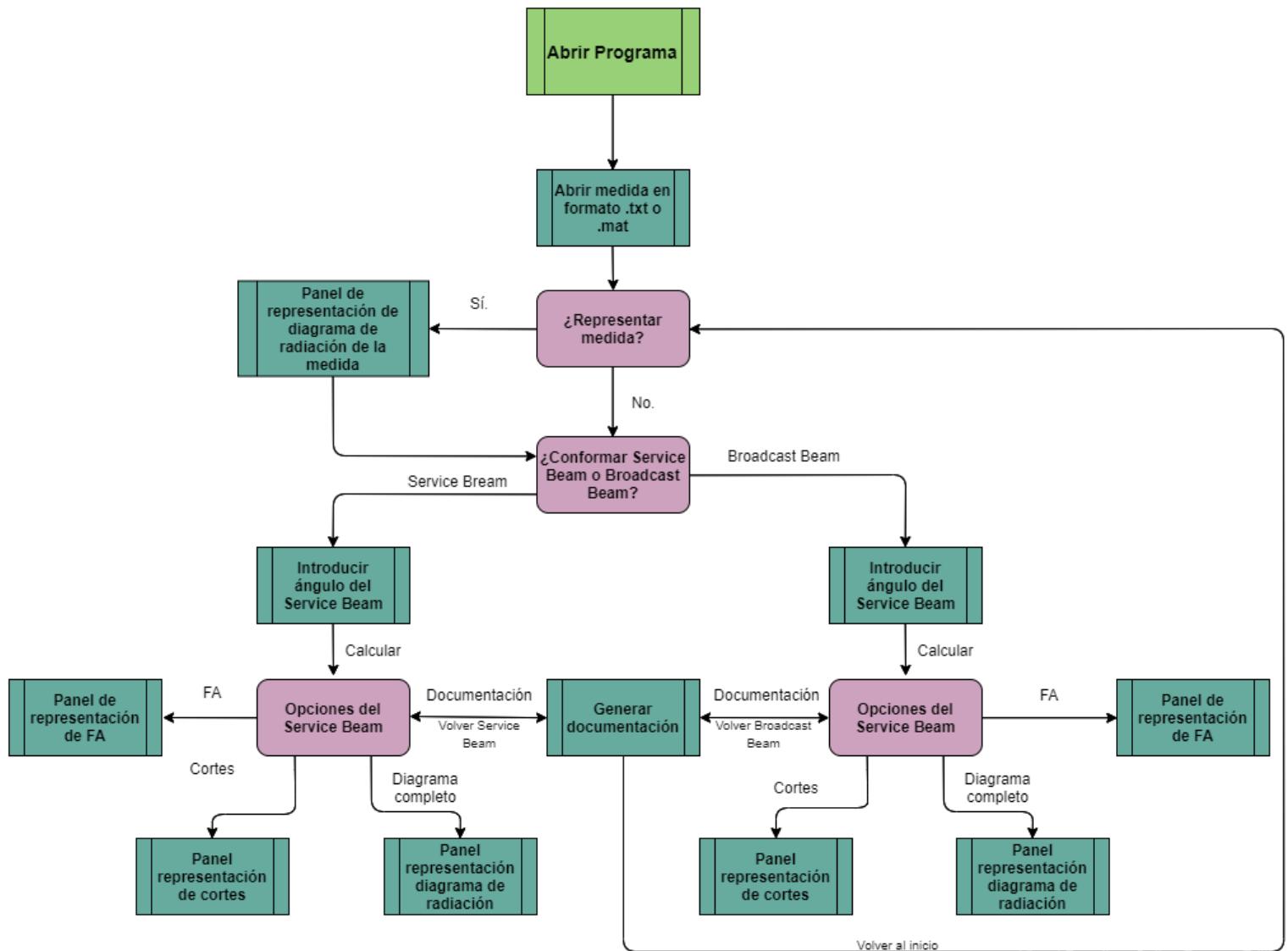


Figura 3.14: Diagrama de bloques del funcionamiento del programa

3.5. Generar documentación que caracteriza la antena completa

Como detalle final del programa ya que podemos calcular todos los valores para cada una de las medidas, lo que vamos a hacer es dar la opción de que el programa calcule los conformados de *Service Beam* que escojamos o de *Broadcast Beam* para todas las medidas de la antena. De esta manera tendremos la antena completa caracterizada mediante simulación en vez de midiendo. Una vez tengamos la antena completa caracterizada seremos capaces de generar la documentación necesaria, interesa generar dos tipos de documentación:

- Archivo de *Excel* que contenga los datos de la tabla de la figura 3.13 pero para todas las medias.
- Archivos en formato *.msi* que son necesarios entregar al operador cuando se vende una antena.

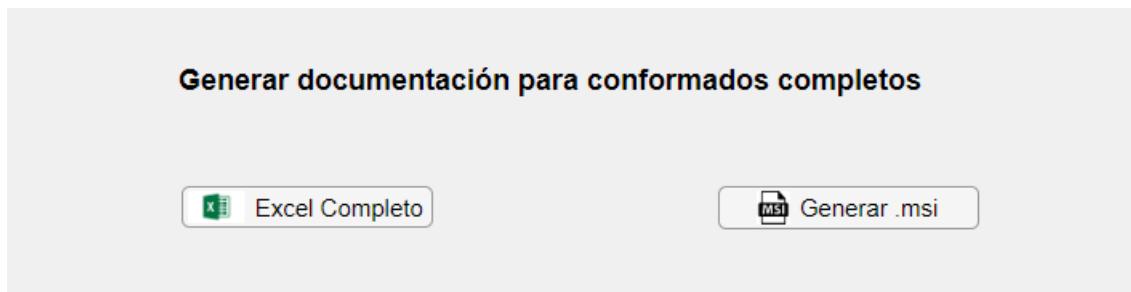


Figura 3.15: Opciones de Generar documentación

3.5.1. *Excel* para crear hoja de características

La idea es una plantilla de *Excel* exportar desde MATLAB todos los datos que caracterizan la antena completa y que esta plantilla de *Excel* utilice esos datos para crear la hoja de características que iría en el catálogo de la antena.

Por ejemplo para hacer la hoja de características del *Service Beam* a 30°, lo que hace el programa es calcular ese conformado para todas las medias, como tenemos 11 *tilts* y dos polarizaciones, en total tendremos que simular el conformado para 22 medidas y calcular los datos vistos en la sección 2.5. Con los datos de los 22 conformados lo que haremos es exportarlos a una plantilla de *Excel* con el formato correcto para que la plantilla interprete bien los valores y genere correctamente la hoja de características.

En la figura 3.16 vemos la hoja de características de la antena que iría en el catálogo. Esta tabla esta generada a partir de los conformados calculados mediante simulación y de manera automática. Generar esta tabla midiendo la antena y copiando los datos de cada medida en el *Excel* de una en una, le puede llegar a costar a un ingeniero entre 2 o 3 días de trabajo dedicados únicamente a medir, hacerlo por simulación y de manera automática le cuesta al programa unos 5 minutos.

		3300-3800	3850-4200
Average Gain (dBi)	Min tilt	21.01	20.40
	Mid tilt	21.38	20.65
	Max tilt	21.12	20.04
	Over all tilts	21.33	20.55
	Average Tolerance	0.48	1.32
HBW (º)	Average	22.44	20.23
	Tolerance	1.79	0.67
VBW (º)	Average	5.47	4.82
	Tolerance	0.43	0.28
Elevation downtilt deviation (max º)		0.58	0.64
First Upper Sidelobe (max dB)		16.80	15.30
USLS 20º (max dB)		16.59	14.73
XPD at Boresight (min dB)		17.94	18.89
XPD over Sector (min dB)		0.00	0.00
F2B Total power 30º (min dB)		24.33	23.67

Figura 3.16: Hoja de características de la antena generada, a partir del conformado simulado

3.5.2. Archivos *.msi* necesarios para los operadores

Los archivos *.msi* hay que entregarlos a los operadores cuando se vende una antena para que estos puedan hacer una buena planificación de red. Son múltiples archivos, uno para cada *tilt* y para cada frecuencia, y en ellos se encuentra el valores de la ganancia para cada uno de los ángulos de ϕ y de θ y datos en la cabecera como el nombre de la antena, la frecuencia para la cual se ha calculado ese archivos y algún otro dato relevante.

La dificultad de generar estos archivos es que lo operadores exigen que se muestre el valor de la ganancia para 360° de ϕ y 360° θ , esto es un problema porque nosotros hemos medido las columnas de la antena en coordenadas cilíndricas, por lo tanto tenemos 360° de ϕ pero solo 180° de θ , ya que en coordenadas cilíndricas solo necesitamos estos valores de ϕ y θ para representar el diagrama de radiación completo. Por lo que para generar estos archivos como exigen los operadores de telefonía móvil el programa tiene que hacer una serie de operaciones y modificaciones en los cortes verticales para que los archivos *.msi* sean correctos.

Entonces el usuario para generar los *.msi* deberá elegir el conformado (*Service Beam 30º*, *Service Beam 0º*, *Broadcast Beam...*) y la polarización para la cual desea generar esta documentación e indicar la carpeta donde están todas las medidas de la antena en formato *.mat*. Automáticamente el programa seleccionará las medidas correspondientes a la polarización indicada por el usuario y comenzará los cálculos.

Para hacer más eficiente esta parte y sabiendo que lo que más le cuesta hacer al programa son las conversiones de dB a lineal y viceversa, lo que se ha tratado es de reducir el número de estas conversiones lo máximo posible. Como no necesitamos el diagrama de radiación completo para generar los *.msi* haremos la conversión de lineal a dB únicamente a los cortes horizontal y vertical, en vez del diagrama completo. De esta manera aceleramos muchísimo el tiempo de ejecución.

Cuando se genera la documentación *.msi* el programa organiza todos los archivos generados con el nombre y formato que exigen los operadores, los guarda dentro de una carpeta con el nombre correspondiente y listos para ser presentados.

(a) Carpeta donde están todos los archivos *.msi*

(b) Contenido de un archivo *.msi*

Nombre	Fecha de modificación
TNA330A00_SB30_-45_3300_T02.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T03.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T04.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T05.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T06.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T07.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T08.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T09.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T10.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T11.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3300_T12.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T02.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T03.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T04.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T05.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T06.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T07.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T08.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T09.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T10.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T11.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3350_T12.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3400_T02.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3400_T03.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3400_T04.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SB30_-45_3400_T05.msi	16/12/2020 9:03
TNA330A00_SR30_-45_3400_T06.msi	16/12/2020 9:03

Figura 3.17: Archivos *.msi* generados mediante simulación del conformado *Service Beam* en la polarización N45

El *software* cumple con su cometido principal, que es simular conformados de haz a partir de las medidas de las columnas completas, además se ha ampliado la idea inicial dándole la capacidad de caracterizar la antena completa para un conformado concreto y generar la documentación y datos necesarios. El siguiente paso es comparar los resultados de los conformados simulados con algún conformado que somos capaces de medir.

El *software* se ha desarrollado con MATLAB, que es una herramienta de pago y puede no estar instalado en todos los dispositivos, además de dar posibles problemas de compatibilidad entre diferentes versiones. Lo que se ha hecho es que mediante una herramienta de compilación se ha creado un instalador para instalar el *software* en *Windows*, y de esta manera el *software* es capaz de correr en un ordenador sin necesidad de que este tenga la licencia o MATLAB instalado.

En el siguiente diagrama se puede ver un sencillo resumen del trabajo realizado.

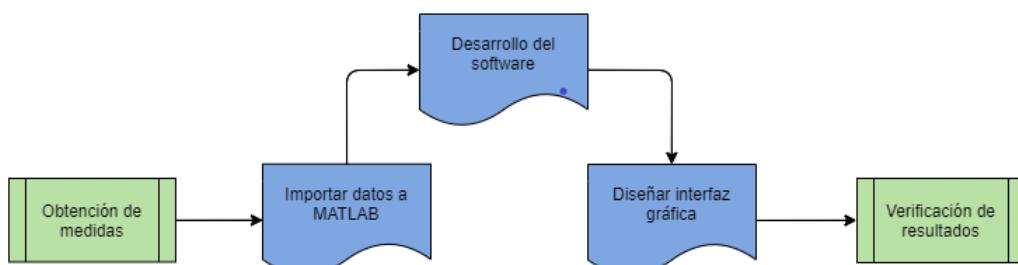


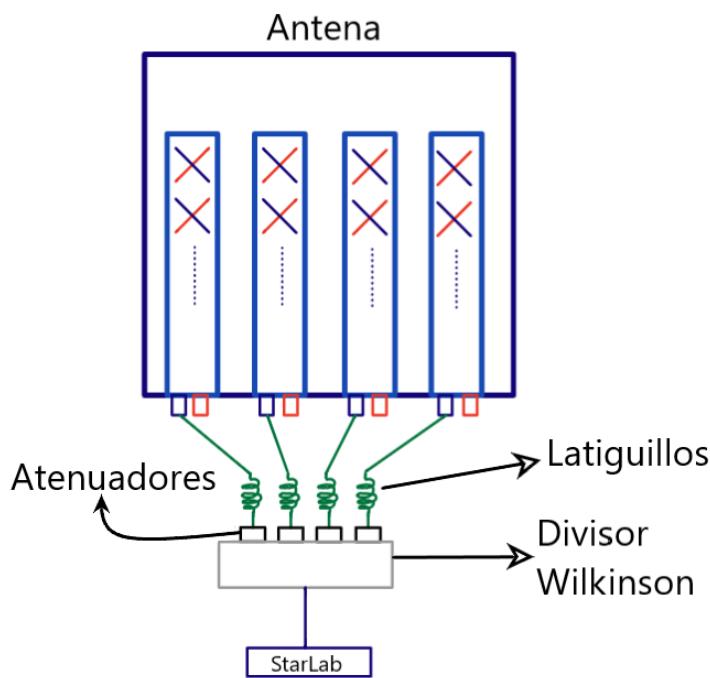
Figura 3.18: Diagrama resumen del trabajo desarrollado

Capítulo 4

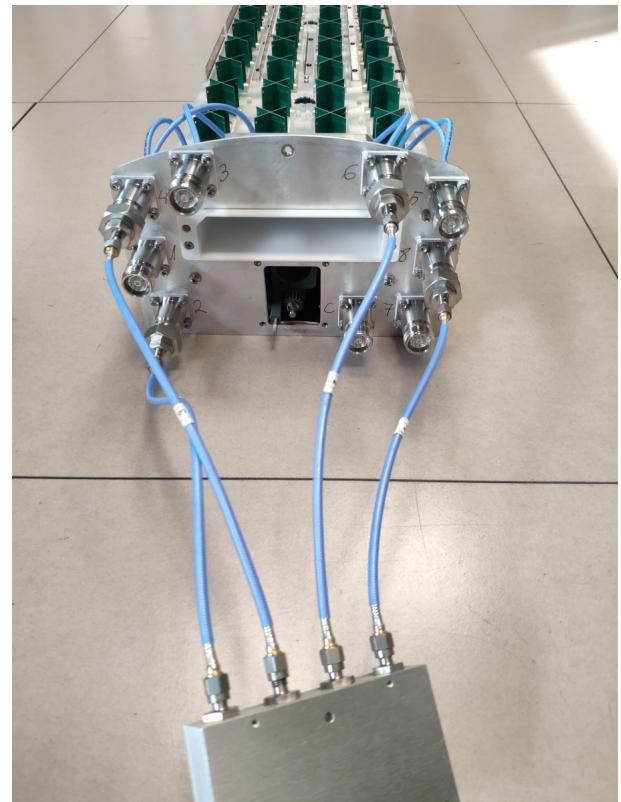
Comparativa de resultados y resumen del *software*

Una vez el programa es capaz de simular los conformados debemos compararlos con ciertos conformados que somos capaces de medir para saber como de fiable ha sido la simulación.

Para medir estos conformados en el laboratorio utilizamos unos cables de diferentes longitudes para poder hacer así el desfase de alimentación entre las distintas columnas, y atenuadores para poder configurar las diferentes amplitudes de alimentación de cada antena, estos cables y atenuadores se conectan a un divisor 1 a 4 *Wilkinson* que a su vez este irá conectado directamente a la ©StarLab como se puede ver en el esquema de la figura 4.1a



(a) Esquema para la medición de diferentes conformados en ©StarLab



(b) Foto de la antena conectada a la ©StarLab mediante latiguillos y divisor Wilkinson

Figura 4.1: Esquema y foto de las conexiones necesarias para poder medir los conformados

Debido a que este sistema para generar conformados no es el que se usará en un escenario real, puede haber diferencias entre las medidas tomadas y el comportamiento real de la antena por diferentes motivos:

- La longitud de los cables se calcula para que el desfase sea exacto en la frecuencias central de toda la banda, que corresponde a 3700 MHz, por lo tanto en las frecuencias de los extremos de la banda el desfase no va a ser el deseado y por lo tanto el conformado generado no va a ser el teóricamente calculado para todas las frecuencias
- Para medir cada conformado debemos calcular una longitud de cables y cortar esos cables de una manera muy precisa, esto es muy costoso por lo que nos limitamos a medir unos cuantos conformados.
- Debido a que los cables utilizados no son muy cortos y el divisor *Wilkinson* no es ideal, introducen pérdidas, aproximadamente unos 0.6 dB por lo tanto la ganancia medida va a ser menor que la realmente ofrecida por la antena con un funcionamiento normal.
- Ciertos conformados con el *Broadcast Beam* se consiguen gracias a que la antena BTS suministra menos potencia a algunas columnas, pero nosotros lo que hacemos es poner atenuadores en algunas columnas, para generar así estos conformados. Esto provoca que la ganancia total medida se vea muy reducida respecto a su comportamiento normal.

Todos estos puntos van a hacer que los conformados medidos y simulados por el *software* difieran, pero estas diferencias son justificables por los motivos anteriores. De esta misma manera los conformados simulados van ser más parecidos a la realidad de la antena que los medidos mediante la técnica expuesta anteriormente.

A continuación compararemos gráficas y datos de unos cuantos conformados simulados con los que hemos podido medir en ©StarLab.

En concreto vamos a comparar unos cuantos conformados de polarización P45 y *tilt* 07 en la banda de frecuencias de 3300-3800 MHz.

4.1. Comparativa de medidas

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam 0°

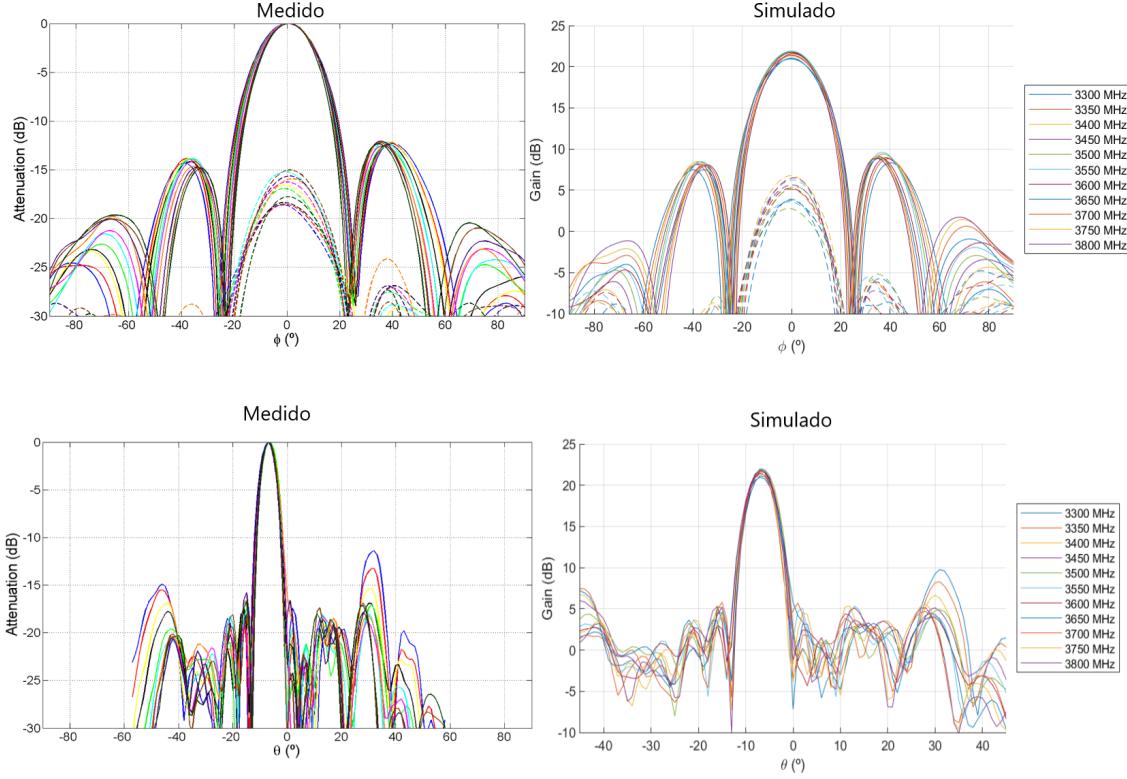


Figura 4.2: Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH00

En la figura 4.2 podemos observar de manera gráfica que ambos conformados a simple vista son muy parecidos, cabe destacar que los conformados medidos mediante ©StarLab se representan la ganancia normalizada mientras que los simulados la ganancia total, no tiene importancia porque estamos comparando gráficamente.

3G5 P45 T07 TH00 Medido							
FREQ [MHz]	GAIN [dBi]	HBW [deg]	VBW [deg]	First_SL [dB]	SL_H_max [dB]	USLS20 [dB]	XPD_0 [dB]
3300	20.68	22.71	6.1	17.41	12.28	17.41	18.66
3350	20.85	22.32	5.98	20.48	12.28	20.48	18.55
3400	21.19	22.06	5.8	19.91	12.11	19.91	16.6
3450	21.37	21.9	5.88	24.22	12.4	23.13	18.38
3500	21.38	21.42	5.76	25.03	12.65	21.18	16.95
3550	21.56	21.24	5.44	19.49	12.16	19.49	15.22
3600	21.1	20.93	5.7	23.51	12.51	23.51	16.24
3650	20.82	20.53	5.57	20.23	12.15	20.23	15.93
3700	20.94	20.51	5.2	16.61	12.07	16.61	15.64
3750	21.34	20.11	5.29	24.18	12.23	22.21	15.02
3800	21.04	19.4	5.39	21.15	12.34	17.99	17.77
PROMEDIO	21.1154545	21.1936364	5.64636364	21.1109091	12.2890909	20.1954545	16.8145455

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH00 Simulado							
FREQ [MHz]	GAIN [dBi]	HBW [deg]	VBW [deg]	First_SL [dB]	SL_H_max [dB]	USLS20 [dB]	XPD_0 [dB]
3300	20.99	23.39	6	17.83	12.62	17.83	18.21
3350	21.4	22.85	5.81	19.56	12.53	19.56	17.79
3400	21.78	22.56	5.52	17.22	12.72	17.22	16.46
3450	21.91	22.34	5.63	21.71	12.94	21.71	18.09
3500	21.9	21.9	5.67	21.82	12.43	20.68	16.7
3550	22.01	22.12	5.34	16.95	12.3	16.95	15.14
3600	21.85	21.07	5.59	20.36	12.77	20.36	16.13
3650	21.14	21.26	5.59	18.38	12.2	19.65	15.72
3700	21.53	21.03	5.1	15.82	12.24	15.82	15.17
3750	21.68	20.91	5.15	21.61	12.44	20.77	15.03
3800	21.68	20.19	5.25	19.26	12.75	17.27	17.75
PROMEDIO	21.6245455	21.7836364	5.51363636	19.1381818	12.54	18.89277273	16.56277273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura 4.3: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación

Podemos observar que los datos obtenidos por simulación son muy similares a los obtenidos mediante ©StarLab, como hemos comentado antes esperábamos un aumento de la ganancia en la simulación por las perdidas de los cables que usamos para medir los conformados.

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam 30°

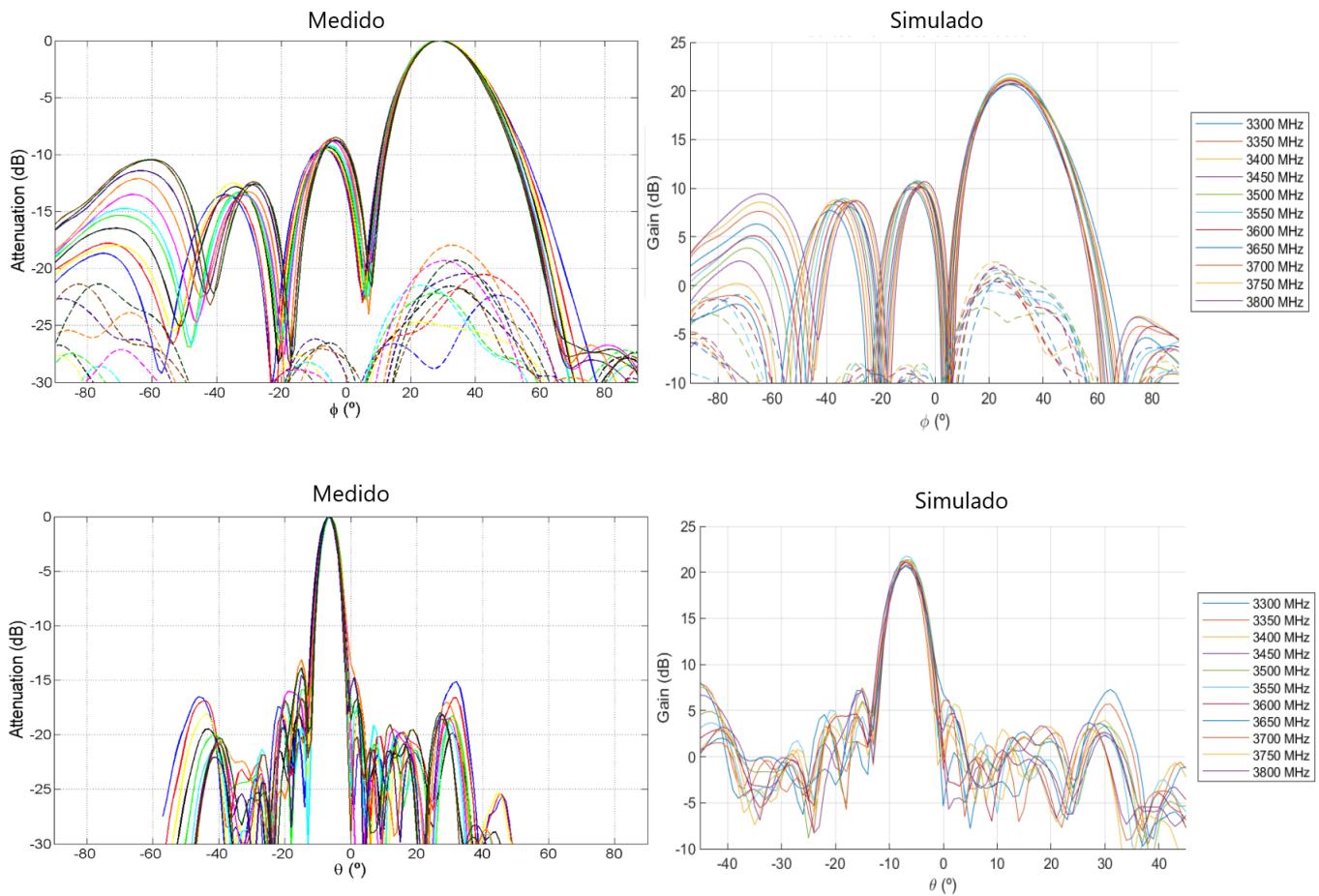


Figura 4.4: Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH30

En este conformado la diferencia de ganancia entre la medida real y la simulada se va a notar más que en el *service Beam* a 0° debido a que los cables para desfasar alguna de las columnas son más largos y añaden más atenuación.

3G5 P45 T07 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.25	24.87	6.01	21.75	9.49	21.75	28.58
3350	20.22	24.84	5.83	17.12	9.51	17.12	23.61
3400	20.74	24.5	5.67	17.35	9.55	17.35	24.99
3450	20.3	24.22	5.94	22.9	9.38	22.9	21.79
3500	20.48	23.79	5.58	17.76	9.28	17.76	22.21
3550	20.73	23.17	5.3	17.31	9.25	17.31	22.06
3600	19.98	23.18	5.72	24.08	8.78	24.08	19.36
3650	19.58	23.12	5.56	25.15	8.63	25.15	18.24
3700	20.15	22.78	5	14.73	8.8	14.73	21.11
3750	20.33	22.55	5.13	20.2	8.5	20.2	22.71
3800	20.06	22.35	5.26	16.67	8.72	16.67	20
PROMEDIO	20.256366	23.5790909	5.54545455	19.5472727	9.08090909	19.5472727	22.2418182

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.67	25.14	5.93	20.21	10.8	20.21	24.16
3350	20.8	24.71	5.74	16.47	10.68	16.47	21.7
3400	21.24	24.31	5.54	15.51	10.78	15.51	21.54
3450	21.36	23.86	5.76	25.84	10.78	22.21	21.12
3500	21.35	23.47	5.52	20.69	10.68	20.69	21.34
3550	21.77	22.64	5.23	16.3	10.98	16.3	20.42
3600	21.09	22.28	5.65	21.22	10.87	21.22	19.45
3650	20.69	22.12	5.51	23.4	10.53	23.4	19.49
3700	21.15	22.21	4.87	15	11.07	15	20.06
3750	21.38	21.84	4.93	18.51	10.88	18.39	20.82
3800	21.12	21.59	5.13	16.42	10.41	16.42	20.37
PROMEDIO	21.1472727	23.1063636	5.43727273	19.0518182	10.7690909	18.7109091	20.9518182

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura 4.5: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH30

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam -30°

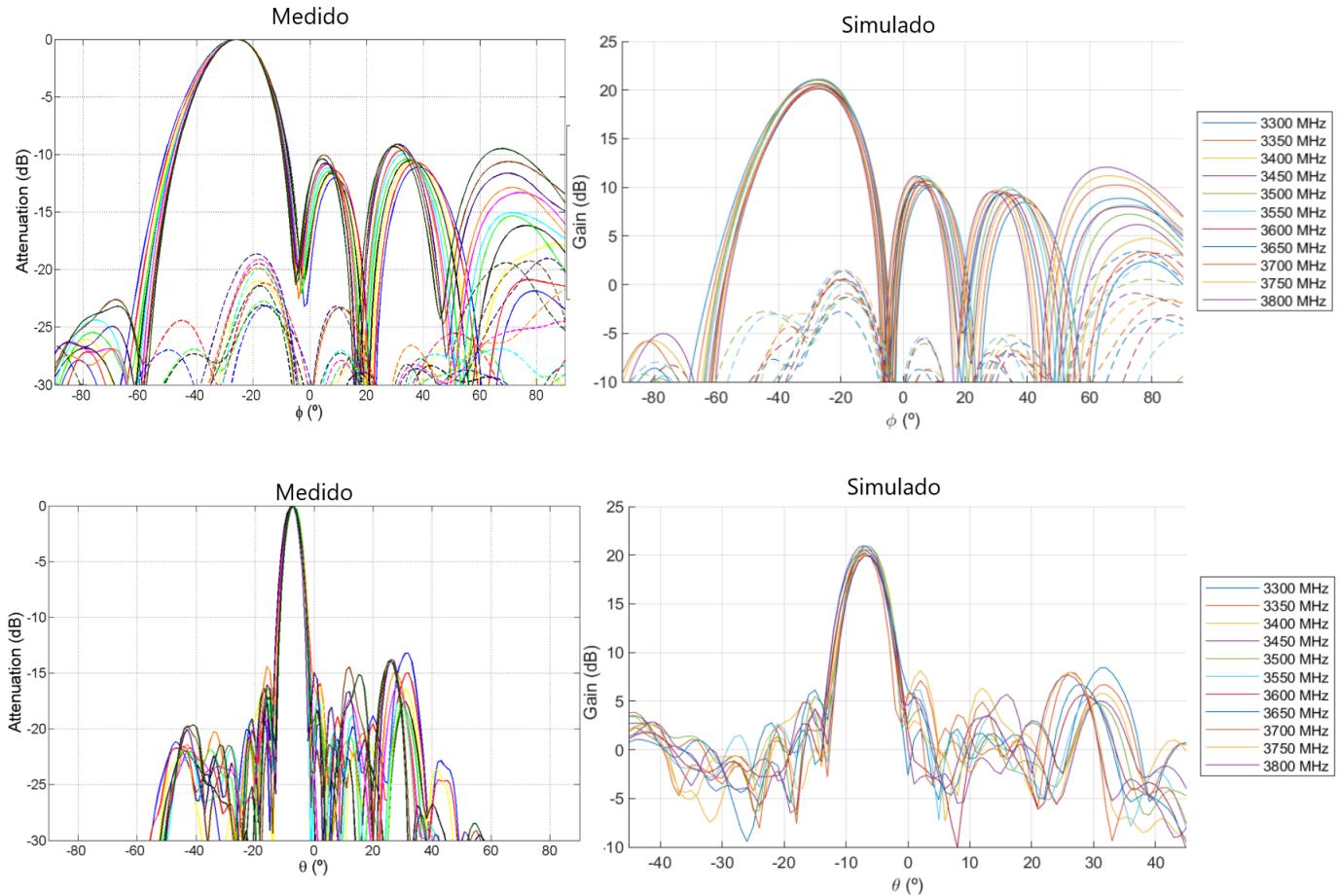


Figura 4.6: Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH-30

Aunque sería lógico pensar que los conformados para *Service Beam* a +30° y -30° deberían ser simétricos se puede observar que no lo son, estas diferencias se pueden dar por el hecho de que el laboratorio donde está la ©StarLab que se usó para medir la antena no es simétrico, por lo tanto si apuntamos la antena hacia un lado u otro nos podremos encontrar pequeñas interferencias diferentes.

3G5 P45 T07 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.34	25.08	6.04	19.58	11.1	19.58	28.08
3350	20.44	24.33	5.95	15.95	10.7	15.95	25.49
3400	20.9	23.94	5.77	16.15	10.62	16.15	23.53
3450	20.39	23.44	6.01	24.61	10.52	22.6	26.04
3500	20.56	23.28	5.6	18.56	10.4	18.56	26.32
3550	20.61	23.15	5.42	17.03	9.94	17.03	23.77
3600	19.79	23.18	5.95	30.64	9.66	30.64	21.86
3650	19.68	22.63	5.51	21.12	9.62	21.12	21.68
3700	19.88	22.53	5.03	14.92	9.12	14.92	20.39
3750	19.84	22.19	5.41	21.88	9.14	21.41	22.17
3800	19.71	21.85	5.33	18.31	9.32	18.31	24.45
PROMEDIO	20.194545	23.2363636	5.63818182	19.8863636	10.0127273	19.6609091	23.98

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.54	24.92	6	18.41	10.52	18.39	26.09
3350	20.58	24.2	5.78	13.46	10.38	13.46	23.99
3400	20.98	23.56	5.62	12.85	10.34	12.85	23.12
3450	20.99	22.97	5.88	23.61	10.44	23.44	25.37
3500	20.87	23.05	5.54	16.64	10.07	16.64	24.93
3550	20.98	22.48	5.25	14.84	9.99	14.84	22.67
3600	20.19	22.03	5.84	16.66	9.77	14.04	21.58
3650	19.99	21.71	5.41	18.3	9.93	14.65	21.93
3700	20.27	21.85	4.9	14.43	9.86	14.43	21.15
3750	20.03	21.79	5.35	17.02	9.04	17.02	22.12
3800	19.95	21.63	5.24	14.49	8.05	14.49	24.74
PROMEDIO	20.4881818	22.7445455	5.52818182	16.4281818	9.85363636	15.8409091	23.4263636

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura 4.7: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH-30

Polarización P45 Tilt 07 Broadcast Beam

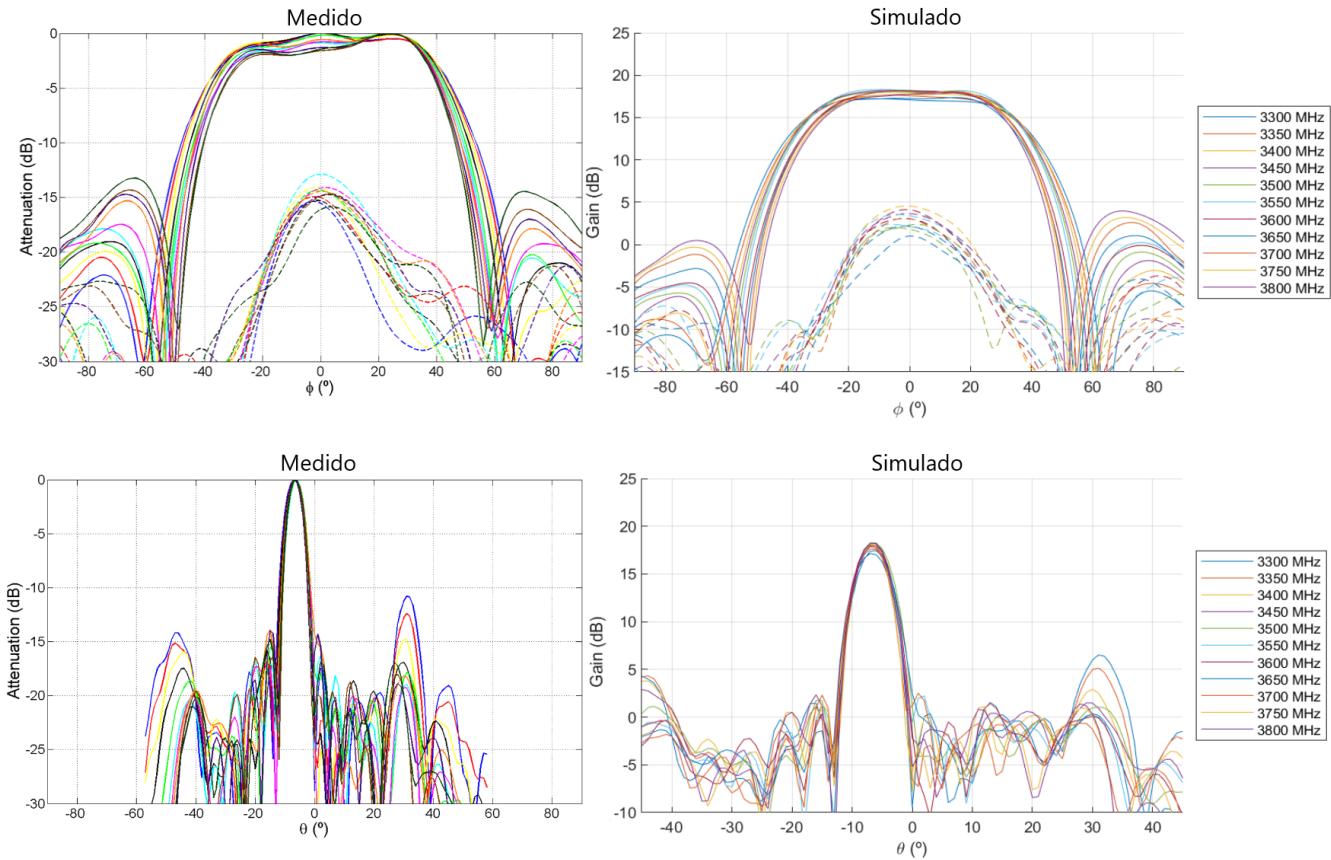


Figura 4.8: Comparativa de gráficas obtenidas mediante ©StarLab y mediante simulación P45 T07 BB

El conformado *Broadcast Beam* es el que mayor diferencia presenta entre el medido y el simulado, esto es debido es que para conformar el *Broadcast Beam* en la medida real es atenuar las columnas exteriores 6dB cada una, en la práctica en un escenario real para conformar *Broadcast Beam* la BTS lo que hace es alimentar con menos potencia las columnas exteriores, por lo tanto la ganancia medida en el laboratorio no se corresponde con la realidad, mientras que es simulado el más parecido.

3G5 P45 T07 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	13.41	75.08	6.1	17.46	32.24	17.46	15.54
3350	13.37	75.28	6	22.29	30.71	22.29	15.04
3400	13.63	75.72	5.73	25.09	30.26	24.67	14.15
3450	13.34	73.53	5.63	23.5	38.35	21.12	15.32
3500	13.57	71.6	5.48	17.98	37.52	17.98	14.14
3550	13.98	69.19	5.15	16.3	31.9	16.3	12
3600	13.39	68.44	5.66	32.24	32.59	22.79	13.38
3650	12.87	71.44	5.66	26.18	33.89	26.18	13.87
3700	13.78	68.56	4.99	14.29	35.87	14.29	13.54
3750	13.89	65.66	5.04	19.95	38.29	18.72	13.29
3800	13.72	66.14	5.31	16.9	31.17	16.9	14.64
PROMEDIO	13.5409091	70.9672727	5.52272727	21.1072727	33.89	19.8818182	14.0827273

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.14	72.87	5.99	16.76	30.41	16.76	15.93
3350	17.61	68.5	5.84	20.55	28.49	20.55	15.23
3400	18.02	68.19	5.52	18.02	32.02	18.02	15.02
3450	18.24	66.12	5.51	20.53	36.48	20.53	16.22
3500	18.11	65.72	5.68	22.3	26.31	21.61	15.17
3550	18.26	64.96	5.33	16.05	22.51	16.05	14.53
3600	18.24	60.8	5.5	18.74	28.97	18.74	14.56
3650	17.37	63.15	5.71	18.72	27.69	17.71	17.19
3700	17.87	61.31	5.14	15.36	28.98	15.36	16.94
3750	17.99	59.6	5.12	21.13	29.51	19.75	16.94
3800	17.95	58.86	5.28	19.21	24.95	17.14	18.74
PROMEDIO	17.8909091	64.5527273	5.51090909	18.8518182	28.7563636	18.3836364	16.0427273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura 4.9: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 BB

Los vectores de amplitudes y fases están calculados para conformar el *Broadcast Beam* a la frecuencia de 3700 MHz, por los tanto en las frecuencias límite de la banda el conformado será peor.

4.2. Resumen del *software*

Una vez comparados los valores y ver que corresponden a los medidos mediante *StarLab* podemos decir que el objetivo del trabajo se ha cumplido exitosamente y el *software* desarrollado es correcto.

Para desarrollar el código del programa se ha utilizado MATLAB en su versión R2020a y para crear la interfaz gráfica se ha utilizado *App Desginer* que es una extensión de MATLAB.

El programa consta de un total de **3949** líneas de código de MATLAB, y para caracterizar una antena completa el programa debe procesar 4.32 *GBytes* de información de las columnas de esta. Se ha compilado en diversos formatos:

- **formato .m**: es el formato del código de MATLAB, el programa podrá ser ejecutado y editado en cualquier ordenador con MATLAB instalado.
- **formato .mlapp**: se trata del formato de aplicación de MATLAB, es interesante este formato porque con él podremos ejecutar el programa y modificar tanto el código como la interfaz gráfica con cualquier ordenador que tenga instalado MATLAB R2017a o superior.
- **Ejecutable de Windows .exe**: Se ha creado un instalador del programa que instala en el ordenador tanto el *software* como un *RUNTIME* de MATLAB si este no se tiene, de esta manera el programa funcionará en cualquier ordenador sin necesidad de MATLAB o licencia alguna.

A continuación presentaré una tabla con los tiempos de ejecución de las principales funciones del programa ejecutado en un ordenador con procesador *Intel i7-4770*, tarjeta gráfica *NVIDIA GeForce GT 710* y 8 *GBytes* de memoria RAM.

Acción	Tiempo(segundos)
Leer datos medida .txt	26.4918
Leer datos medida mat	0.5512
Calcular Service Beam	5.2144
Calcular Broadcast Beam	3.7582
Calcular datos y escribir .txt	0.1068
Generar documentación .msi	35.09259
Generar Excel completo	396.843237

Figura 4.10: Tabla de tiempos de ejecución de las principales funciones del *software*

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

Una vez esté todo el trabajo desarrollado y explicado es indispensable resumir las conclusiones que se han podido obtener de la realización del trabajo y de si este ha tenido éxito o no.

El trabajo ha sido un éxito y ha cumplido con todos los objetivos propuestos por TELNET-RI. Se ha satisfecho exitosamente la necesidad que la empresa tenía. Además de que los resultados obtenidos mediante simulación son más parecidos a los que se darán en el escenario de trabajo real de la antena, se obtienen mucho más rápido que midiendo en ©*StarLab*.

Antes de desarrollar este trabajo para crear un hoja de características como la de la figura 3.16 un ingeniero tenía que estar midiendo y copiando esas medidas en un *Excel* más de 16 horas, el *software* desarrollado en este trabajo tarda unos 6 minutos en crear mediante conformados simulados la hoja de características, lo hace manera automática y más acorde a la realidad de la antena.

El *software* se desarrolló sabiendo que en el futuro se iban a diseñar distintos tipos de antenas *beamforming*, por lo tanto el programa está totalmente parametrizado y funcionará si en un futuro se hace una antena con más de 4 columnas o diferente separación entre estas.

En TELNET-RI se va a desarrollar en un futuro cercano una antena de *beamforming* para la banda de 2.6 GHz, por lo tanto esta va a ser la siguiente antena en la que será necesario utilizar el *software* desarrollado en este trabajo. Gracias a que ha sido programado sabiendo que será utilizado por antenas con distintas características no habrá que cambiar nada de código a pesar de cambiar la antena, ya que las diferentes configuraciones las indicará el usuario desde la interfaz gráfica del *software* y los cálculos se ajustaran a estos parámetros.

5.2. Trabajos futuros

Aunque el trabajo es una programa que ya esta completamente acabado y cerrado se podrían añadir funcionalidades o mejorarlo en ciertos aspectos:

- Aunque se ha tratado de optimizar al máximo los cálculos siempre es bueno acelerar el tiempo de ejecución del programa. Los algoritmos más costoso de ejecutar para el programa son las conversiones entre dB y lineal, por lo tanto se podría investigar diversas maneras de realizar estas conversiones mediante otros algoritmos o mediante aproximaciones que aceleren el tiempo de cálculo de los diagramas simulados.
- Una funcionalidad que podría ser útil y ahorraría tiempo de mediciones seria conformar el diagrama de radiación a partir de un elemento radiante individual en vez la columna completa. De esta manera con obtener el diagrama de uno de los elementos que componen cada columna podríamos conformar el diagrama de la columna sin necesidad de medirla. De esta manera podríamos simular conformados completos a partir de un elemento radiante configurando los ángulos de inclinación vertical y horizontal.

Apéndice A

Manual de instrucciones del software

Panel Principal

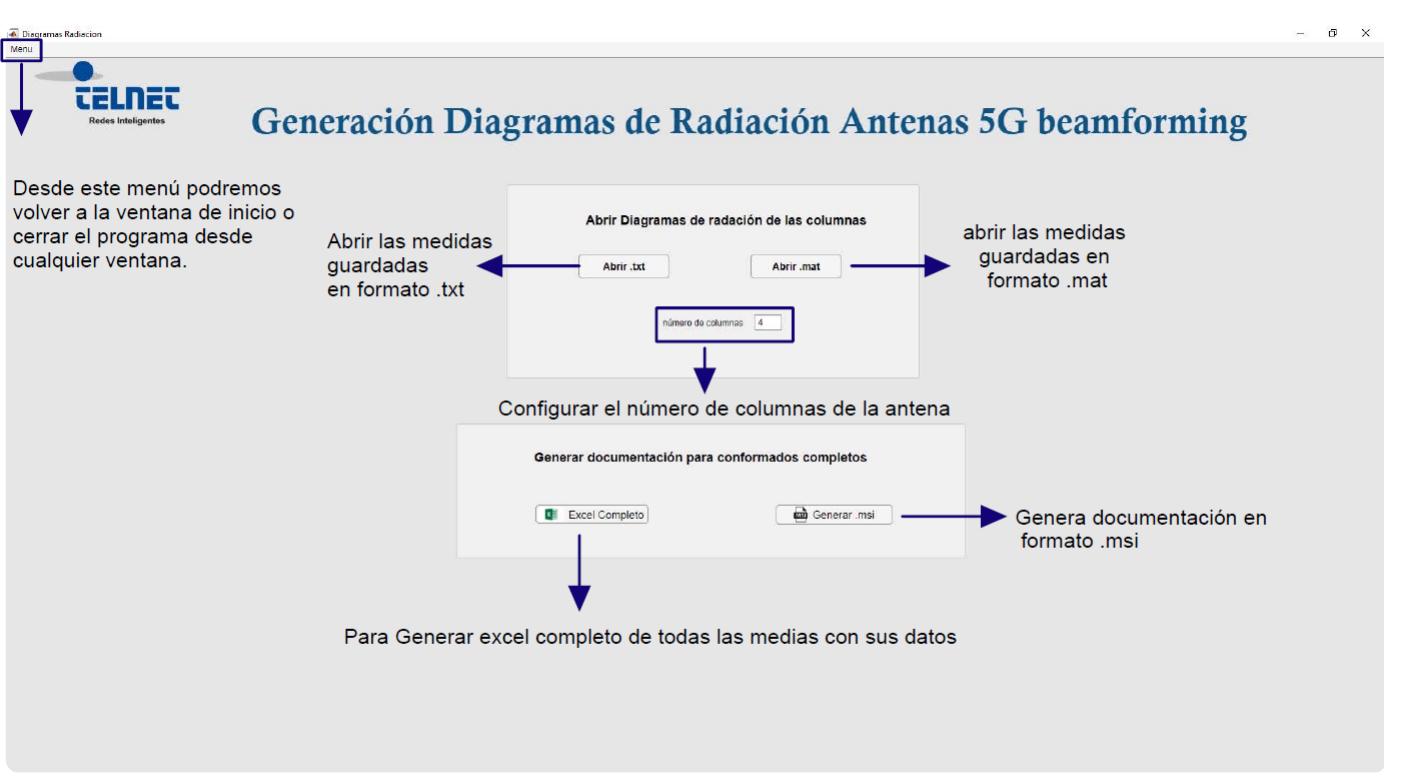


Figura A.1: Menú principal

Si hacemos click en el botón *abrir .txt* o *abrir .mat* nos saldrá la opción de representar las medidas que hemos tomado en la antena.

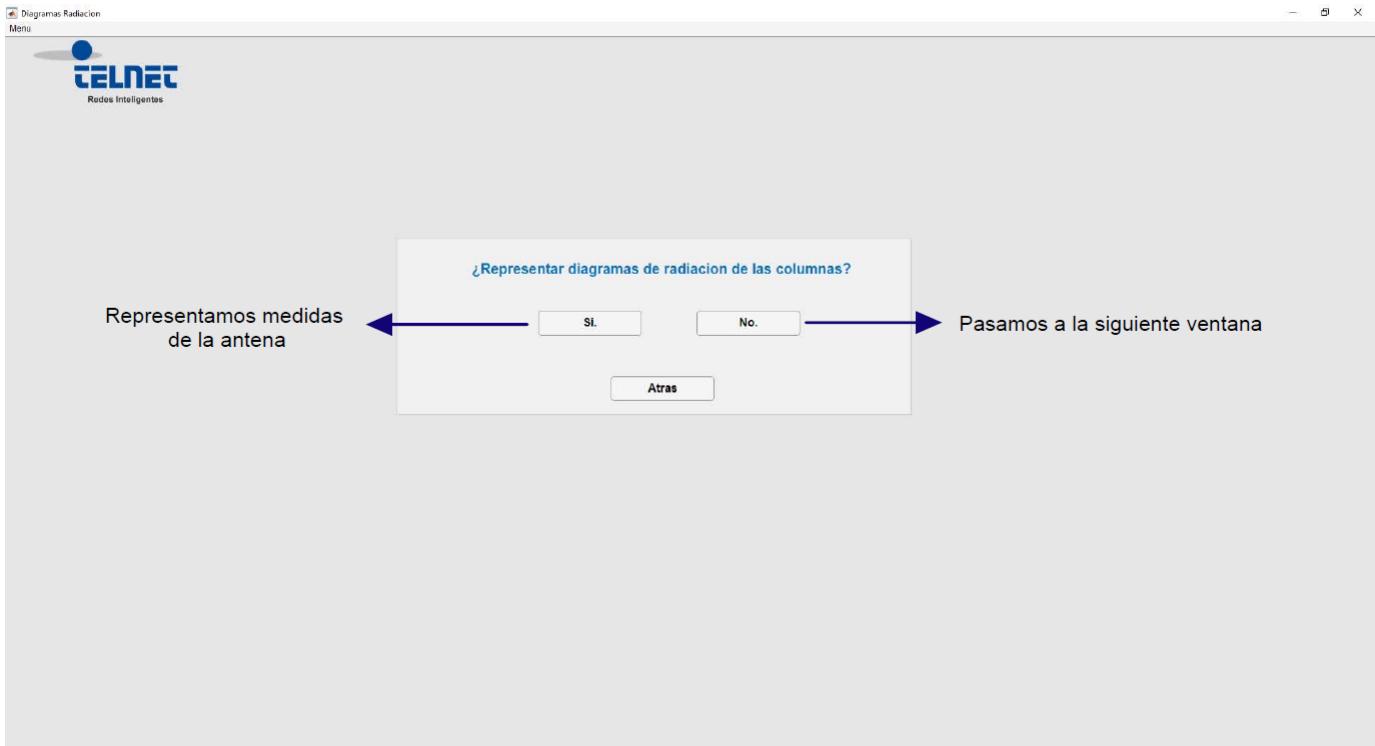


Figura A.2: Panel para elegir si se representan las medidas o no

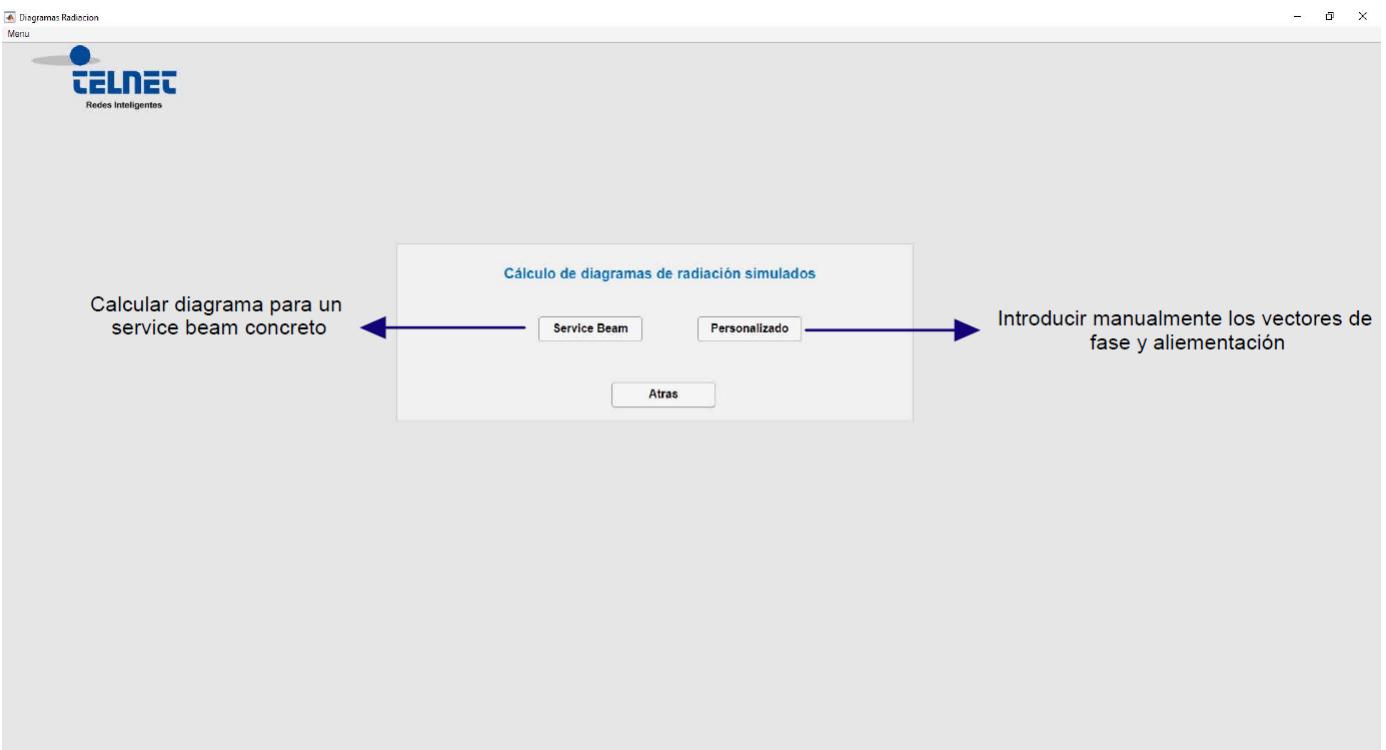


Figura A.3: Elegir tipo de conformado

En esta ventana elegimos el tipo de conformado que vamos a simular

Panel Service Beam

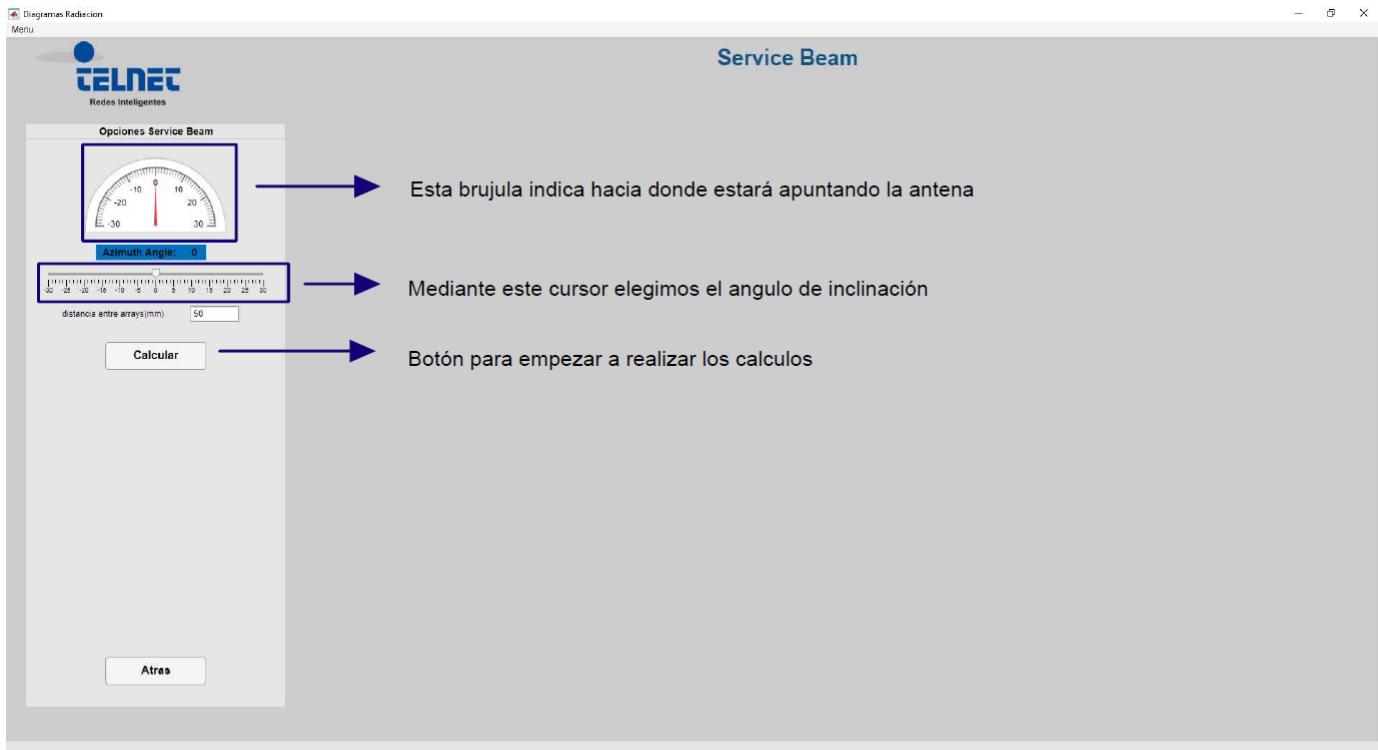


Figura A.4: Panel para configurar Service Beam y simular

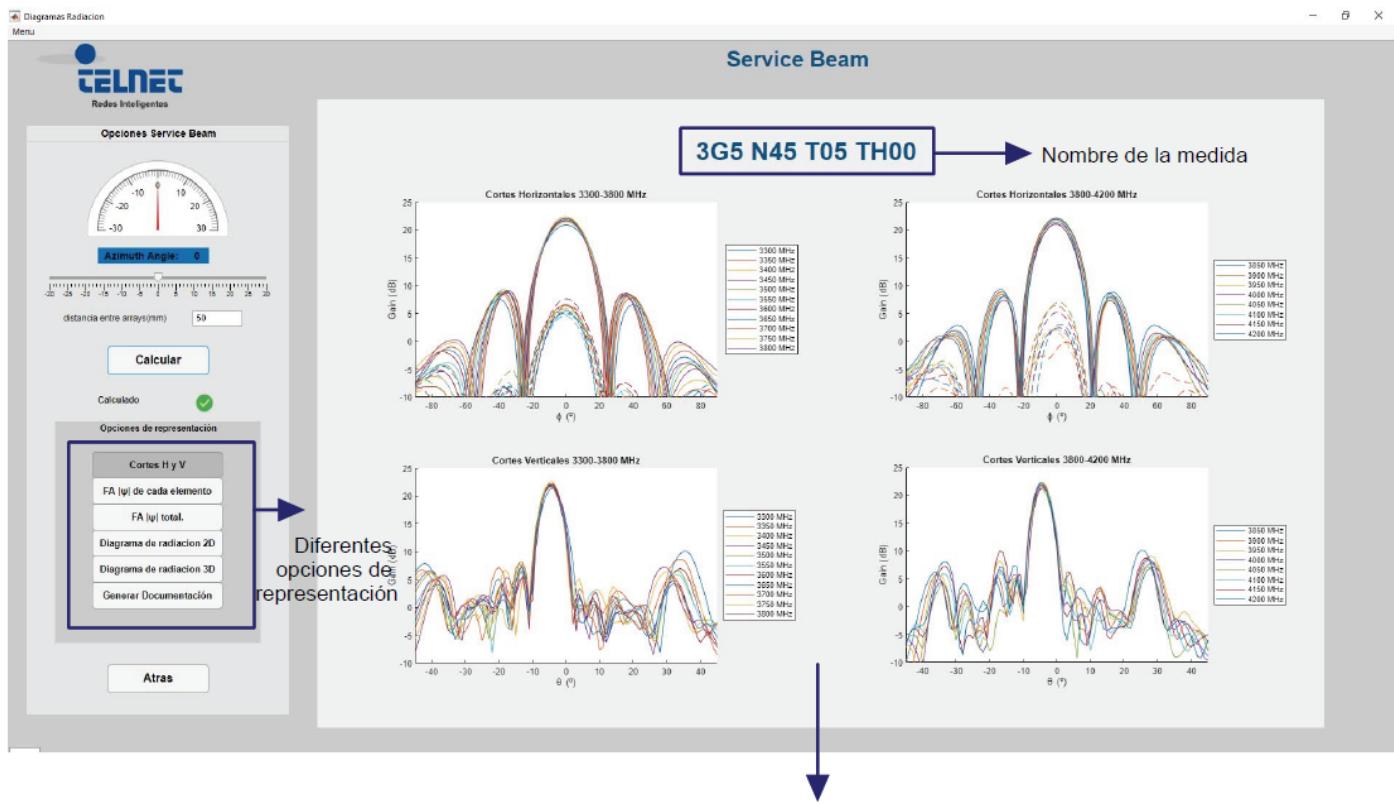
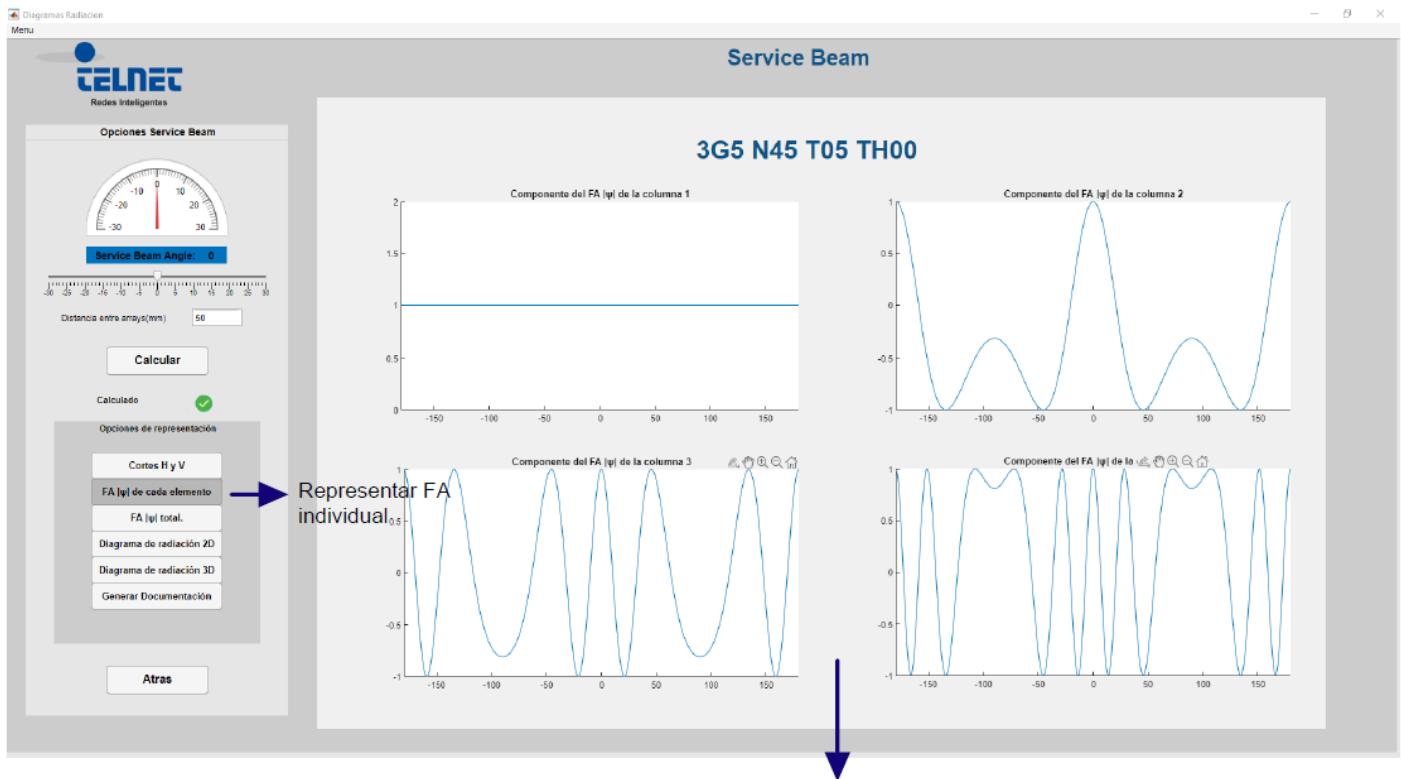
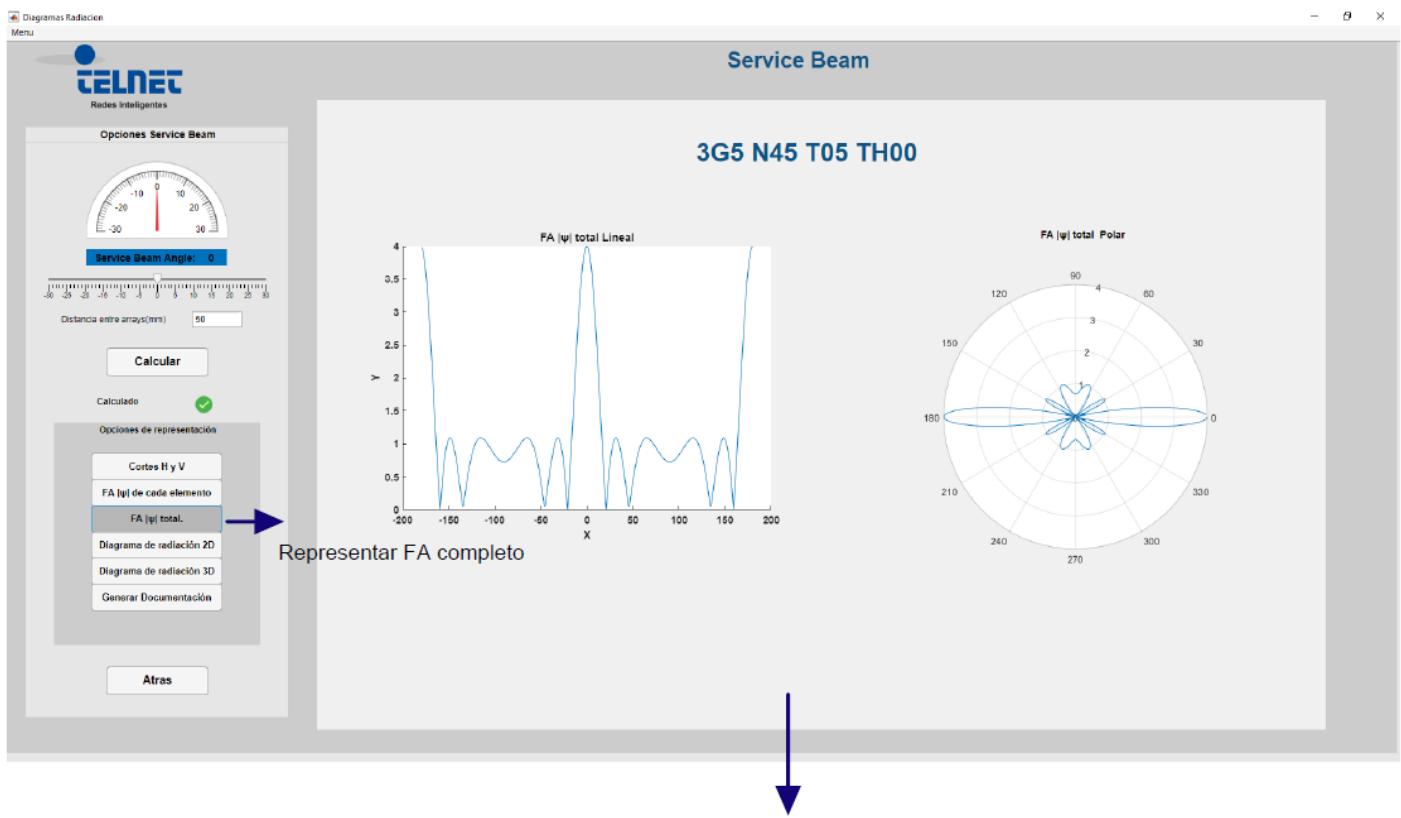


Figura A.5: Representación de los cortes simulados del Service Beam



Se representa la componente del Factor de agrupación para columna

Figura A.6: Representación de la componente $FA(\psi)$ de cada elemento del *Service Beam*



Se representa el Factor de agrupación en coordenadas cartesianas y polares

Figura A.7: Representación del $FA(\psi)$ del *Service Beam*

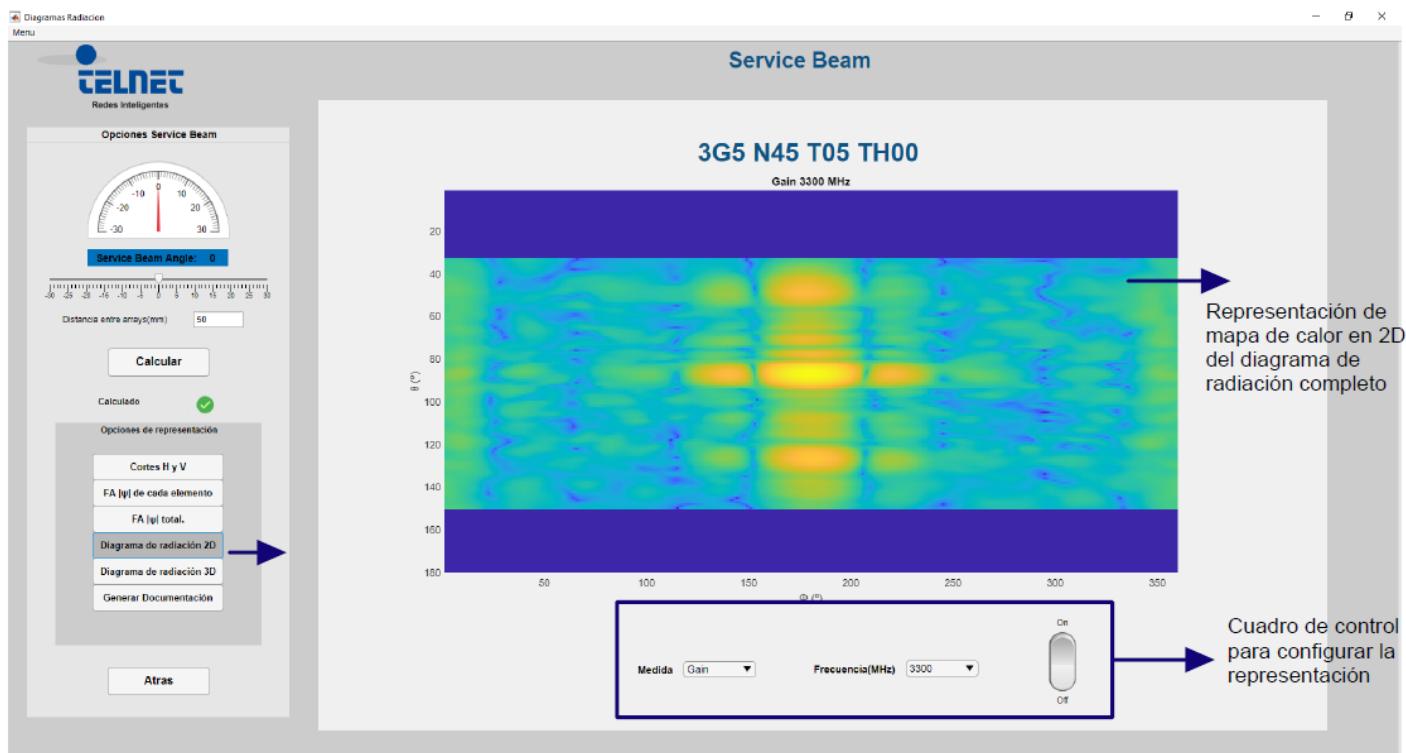


Figura A.8: Representación del diagrama de radiación en 2D del *Service Beam*

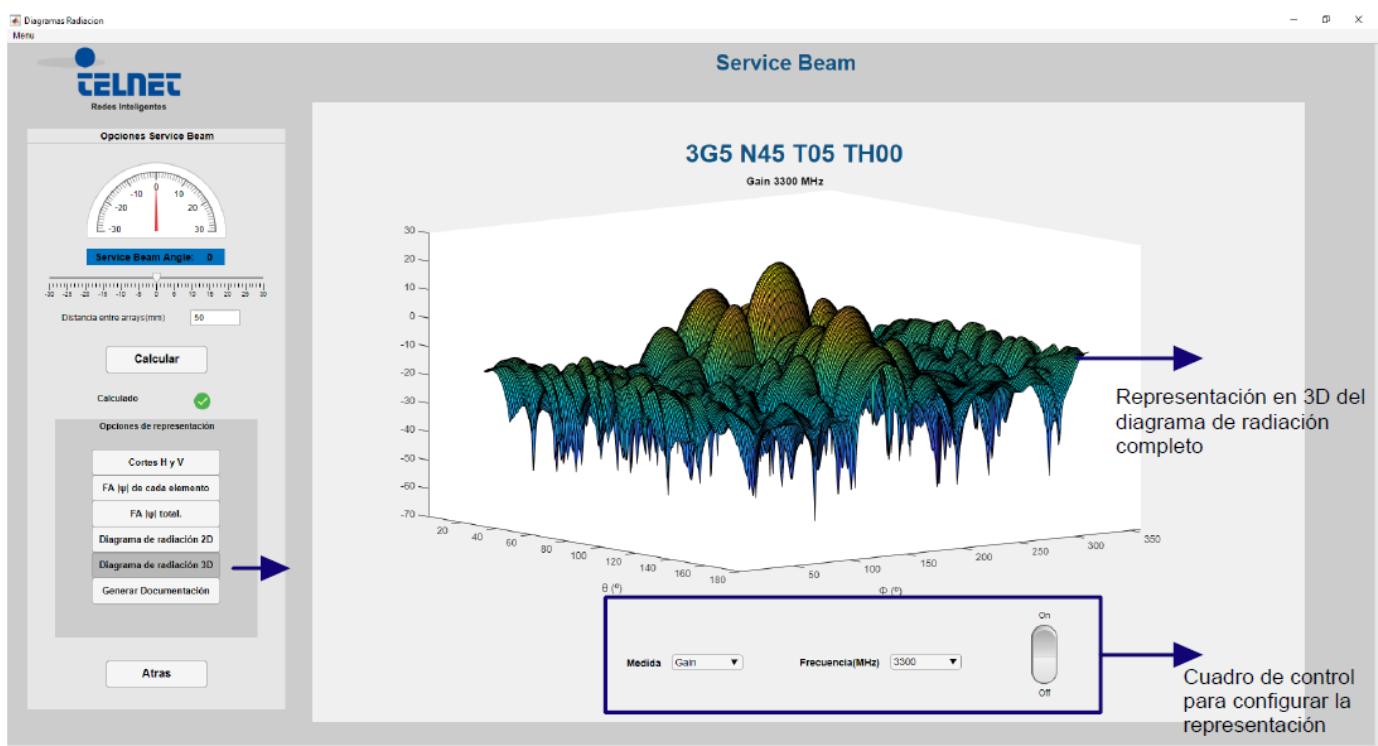


Figura A.9: Representación del diagrama de radiación en 3D del *Service Beam*

Si en las opciones de representación seleccionamos *Generar documentación* se nos abrirá la siguiente ventana.

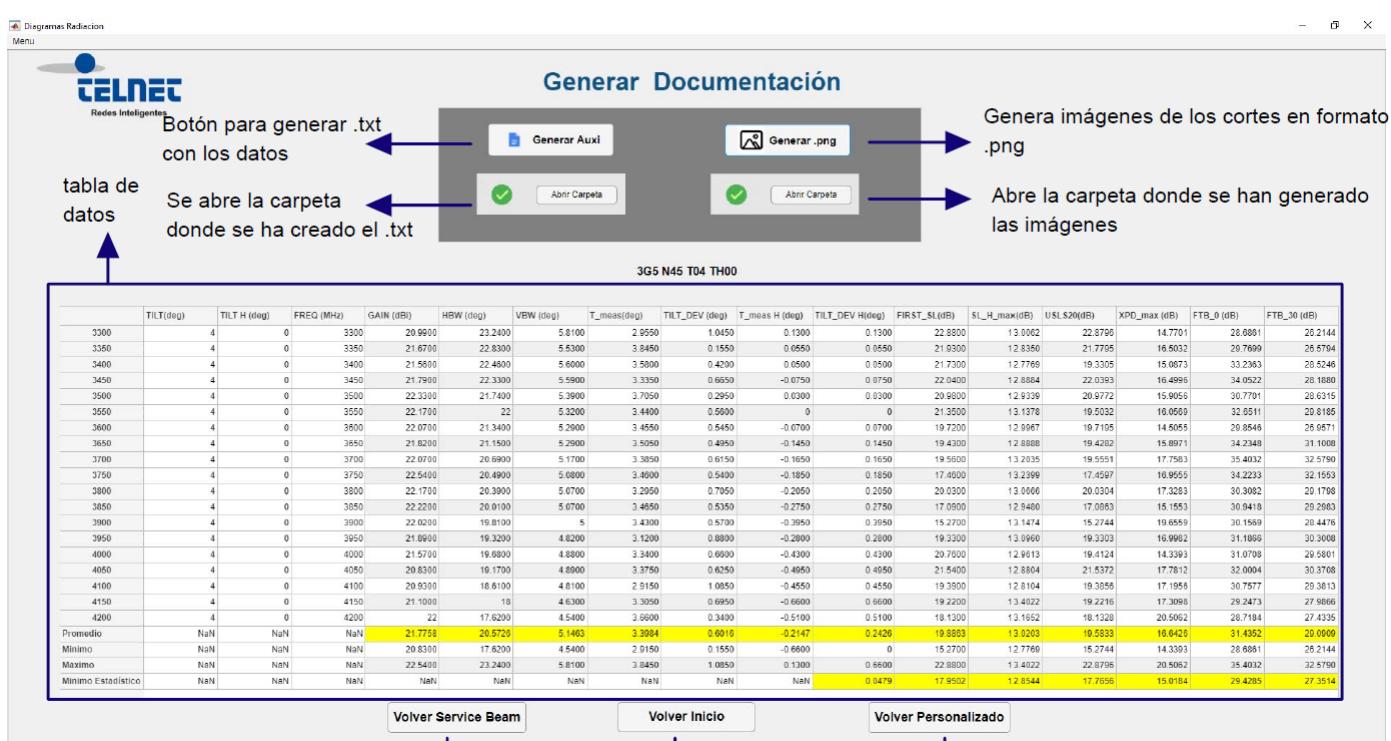


Figura A.10: Panel para generar la documentación

Si en la figura A.3 seleccionamos la opción de *Personalizado* nos llevará a la siguiente ventana.

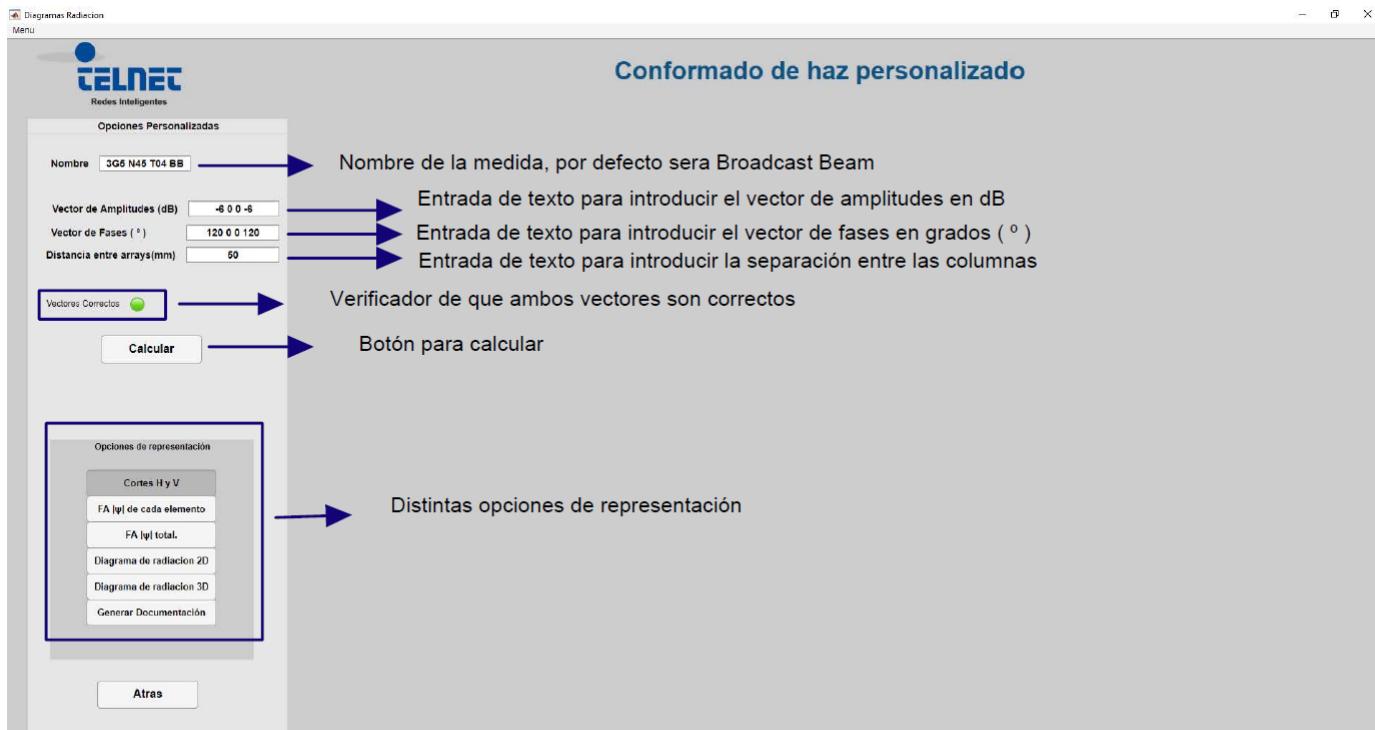


Figura A.11: Panel para configurar y simular un conformado personalizado

Si en el menú principal (figura A.1) seleccionamos cualquiera de las opciones del grupo de *Generar documentación para conformados completos* nos llevará a las siguientes ventanas

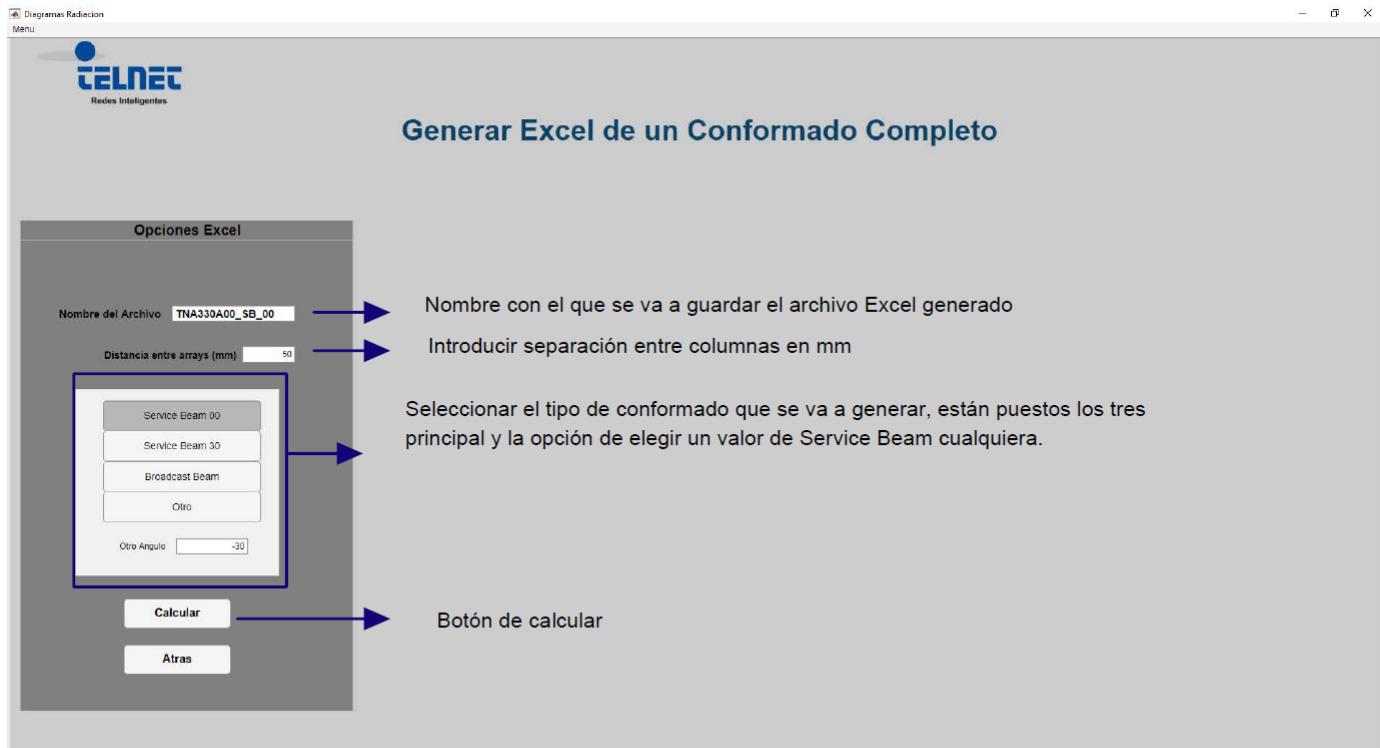


Figura A.12: Panel para generar Excel de un conformado completo

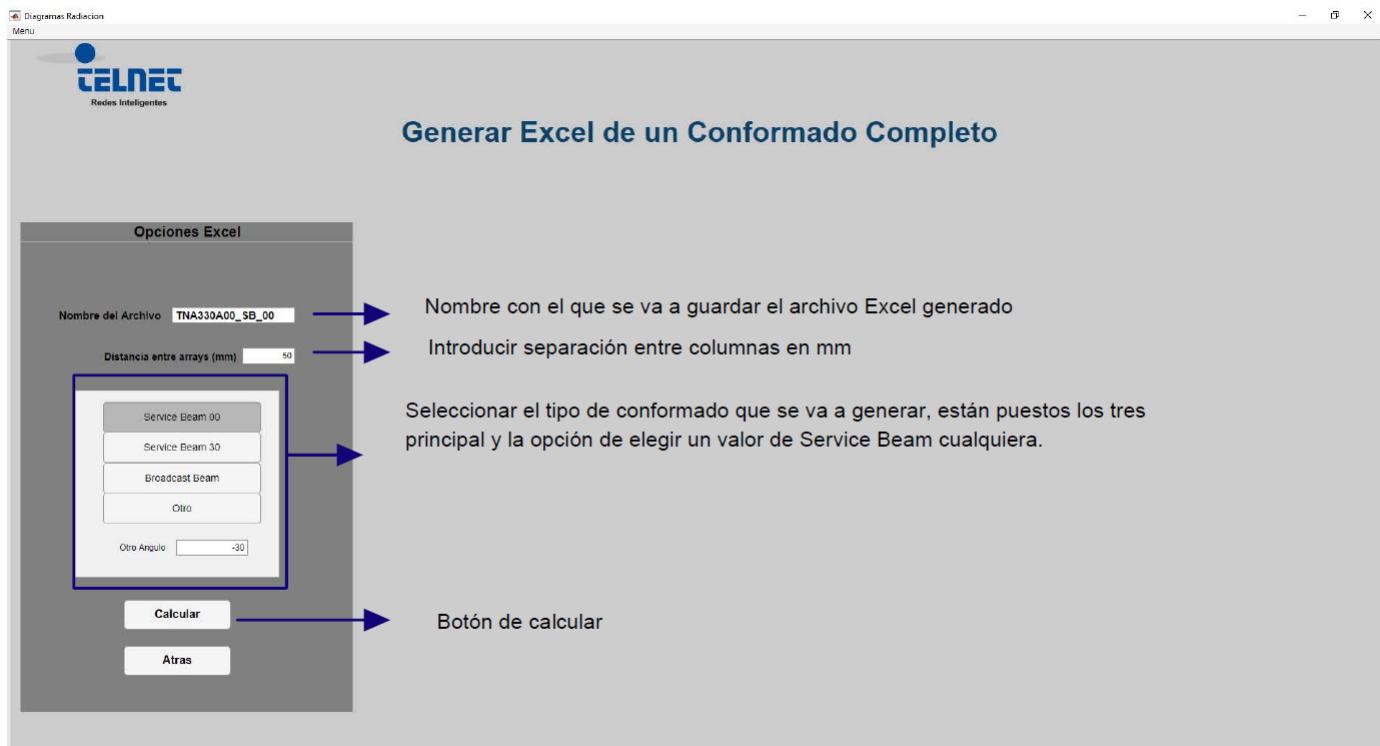


Figura A.13: Panel para generar documentación en formato .msi de un conformado completo

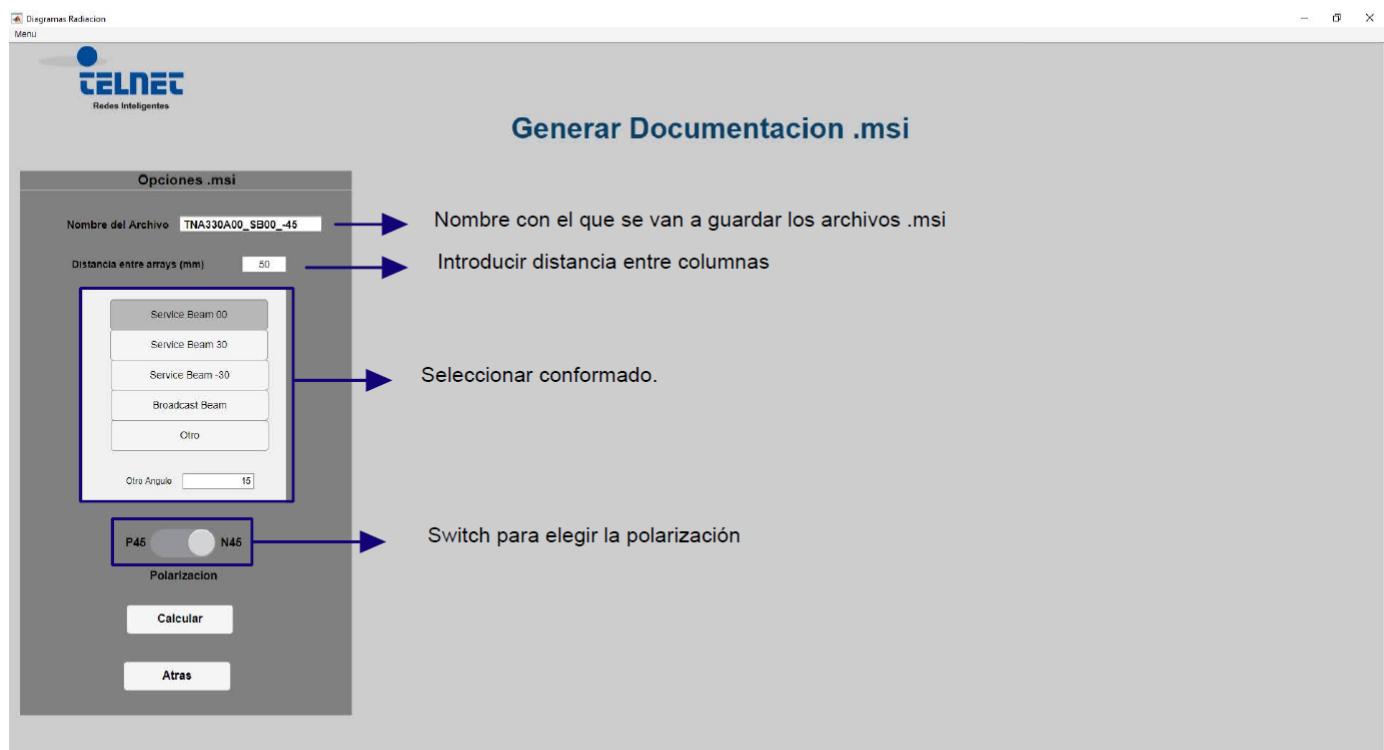


Figura A.14: Panel para generar documentación en formato .msi de un conformado completo

Apéndice B

Comparativa entre medidas reales y simuladas

Polarización P45 Tilt 02 Service Beam 0°

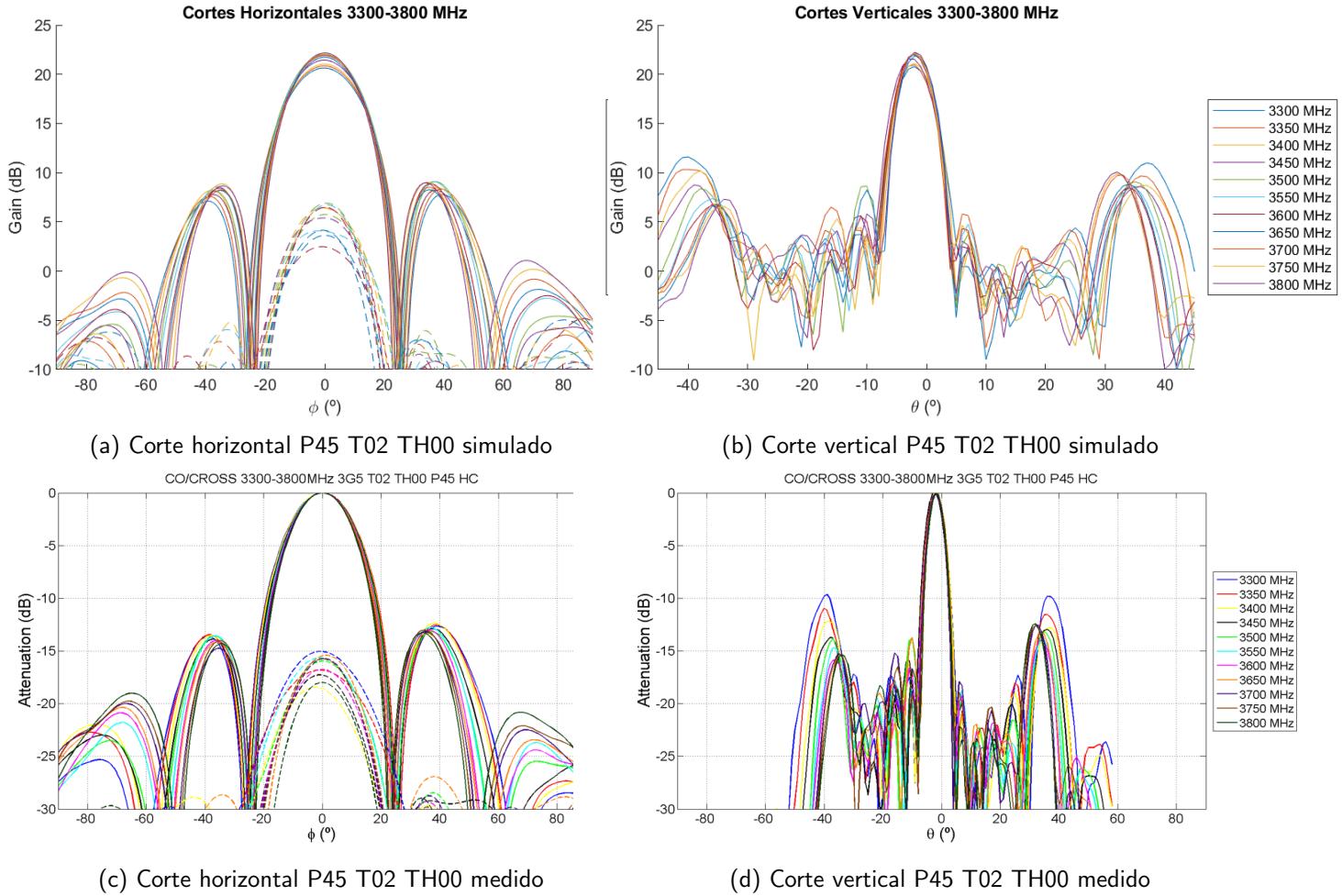


Figura B.1: Comparación cortes polarización +45 Tilt 02 Service Beam 0°

3G5 P45 T02 TH00 Medido								3G5 P45 T02 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)	FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	19.94	22.01	5.8	23.44	12.65	23.44	15.05	3300	20.79	23.43	5.72	22.45	12.86	22.45	14.88
3350	20.29	21.93	5.61	20.72	12.51	20.72	16.83	3350	20.96	23.26	5.68	18.41	12.52	18.41	16.8
3400	20.6	21.88	5.63	20.92	12.37	20.92	18.58	3400	21.1	22.86	5.86	18.99	12.56	18.99	18.56
3450	20.92	21.37	5.58	19.86	12.89	19.86	17.29	3450	21.52	22.56	5.75	18.48	13.21	18.48	17.81
3500	21.22	20.9	5.4	19.59	13.18	19.59	15.94	3500	22.17	21.71	5.14	18.41	12.95	18.41	15.58
3550	21.32	20.78	5.29	18.73	12.78	18.73	15.68	3550	22.04	21.82	5.16	17.28	12.82	17.28	15.5
3600	21.14	20.57	5.29	19.24	13.02	19.24	16.75	3600	22.02	21.08	5.28	17.71	13.04	17.71	16.52
3650	21.12	20.12	5.13	20.87	13.36	20.87	15.46	3650	21.87	21.04	5.23	19.72	13.46	19.72	14.83
3700	21.1	19.81	5.2	17.91	13.15	17.91	15.74	3700	22.15	20.43	4.96	16.35	13.5	16.35	15.31
3750	21.46	19.74	5.12	18.9	13.02	18.9	15.73	3750	22.14	20.64	4.94	17.46	12.98	17.46	15.53
3800	21.43	19.41	5	22.14	13.27	22.14	17.99	3800	22.25	20.05	4.99	19.77	13.19	19.77	18.03
PROMEDIO	20.9581818	20.7745455	5.36818182	20.2109091	12.9272727	20.2109091	16.4581818	PROMEDIO	21.7281818	21.7163636	5.33727273	18.6390909	13.0081818	18.6390909	16.3045455

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.2: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T02 TH00

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam 0°

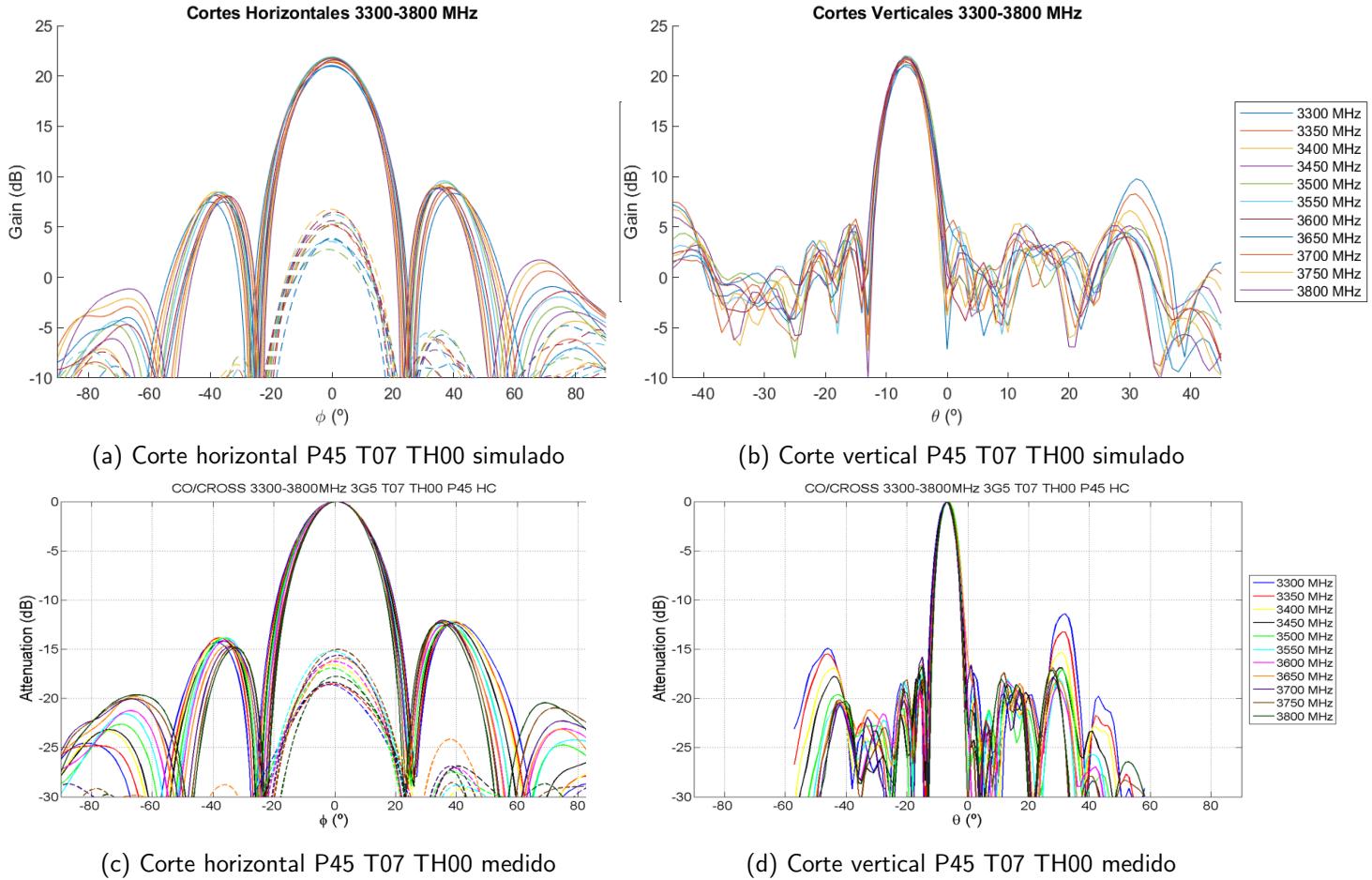


Figura B.3: Comparación cortes polarización +45 Tilt 07 Service Beam 0°

3G5 P45 T07 TH00 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.68	22.71	6.1	17.41	12.28	17.41	18.66
3350	20.85	22.32	5.98	20.48	12.28	20.48	18.55
3400	21.19	22.06	5.8	19.91	12.11	19.91	16.6
3450	21.37	21.9	5.88	24.22	12.4	23.13	18.38
3500	21.38	21.42	5.76	25.03	12.65	21.18	16.95
3550	21.56	21.24	5.44	19.49	12.16	19.49	15.22
3600	21.1	20.93	5.7	23.51	12.51	23.51	16.24
3650	20.82	20.53	5.57	20.23	12.15	20.23	15.93
3700	20.94	20.51	5.2	16.61	12.07	16.61	15.64
3750	21.34	20.11	5.29	24.18	12.23	22.21	15.02
3800	21.04	19.4	5.39	21.15	12.34	17.99	17.77
PROMEDIO	21.1154545	21.1936364	5.64636364	21.1109091	12.2890909	20.1954545	16.8145455

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.99	23.39	6	17.83	12.62	17.83	18.21
3350	21.4	22.85	5.81	19.56	12.53	19.56	17.79
3400	21.78	22.56	5.52	17.22	12.72	17.22	16.46
3450	21.91	22.34	5.63	21.71	12.94	21.71	18.09
3500	21.9	21.9	5.67	21.82	12.43	20.68	16.7
3550	22.01	22.12	5.34	16.95	12.3	16.95	15.14
3600	21.85	21.07	5.59	20.36	12.77	20.36	16.13
3650	21.14	21.26	5.59	18.38	12.2	19.65	15.72
3700	21.53	21.03	5.1	15.82	12.24	15.82	15.17
3750	21.68	20.91	5.15	21.61	12.44	20.77	15.03
3800	21.68	20.19	5.25	19.26	12.75	17.27	17.75
PROMEDIO	21.6245455	21.7836364	5.51363636	19.1381818	12.54	18.8927273	16.5627273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.4: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH00

Polarización P45 Tilt 12 Service Beam 0°

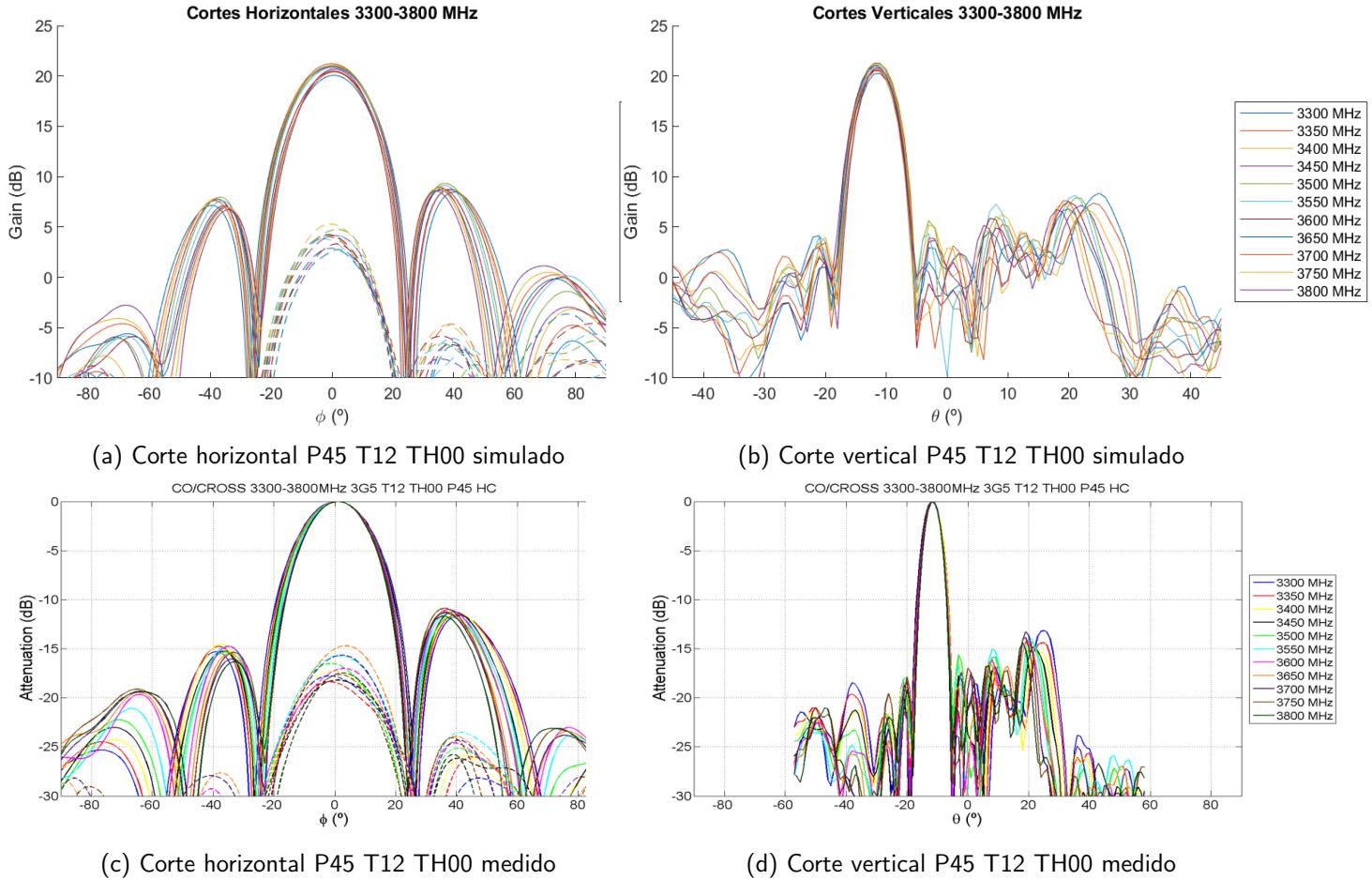


Figura B.5: Comparación cortes polarización +45 Tilt 12 Service Beam 0°

3G5 P45 T12 TH00 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.69	23.28	5.86	17.46	11.63	17.46	17.9
3350	20.7	22.77	5.94	17.32	11.52	17.32	18.52
3400	20.65	22.53	5.98	16.61	11.31	16.61	17.34
3450	20.69	22.26	6.02	17.74	11.22	17.74	18.2
3500	20.6	21.9	5.68	15.64	11.8	15.64	16.63
3550	20.53	21.57	5.55	16.7	11.24	16.7	15.71
3600	20.05	21.08	5.72	21.52	11.02	21.52	17.11
3650	19.81	20.79	5.58	18.78	11.21	18.78	14.87
3700	19.89	20.69	5.45	23.85	11.32	17.43	15.7
3750	20.3	20.46	5.27	16.95	10.88	16.95	17.65
3800	20.24	20.19	5.2	20.92	11.68	16.78	17.52
PROMEDIO	20.3772727	21.5927273	5.65909091	18.4990909	11.3481818	17.5390909	17.0136364

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T12 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	21.09	23.67	5.97	18.15	12.55	18.15	16.89
3350	21.29	23.07	5.99	17.34	12.48	17.34	17.58
3400	21.07	23.45	5.92	15.91	12.3	15.91	16.79
3450	20.99	23.13	5.95	17.28	12.22	17.28	18.04
3500	21.15	22.51	5.7	15.51	11.73	15.51	17.08
3550	20.95	22.77	5.54	16.6	11.7	16.6	15.54
3600	20.59	21.44	5.72	21.22	11.68	21.22	16.34
3650	20.21	21.29	5.49	18.72	11.42	15.66	15.33
3700	20.52	20.55	5.35	22.67	11.45	17.36	16.26
3750	20.75	20.42	5.32	17.84	11.8	16.21	17.35
3800	20.76	20.03	5.33	19.73	12.1	15.6	17.96
PROMEDIO	20.8518182	22.03	5.66181818	18.27	11.9481818	16.9854545	16.8327273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.6: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T12 TH00

Polarización N45 Tilt 02 Service Beam 0°

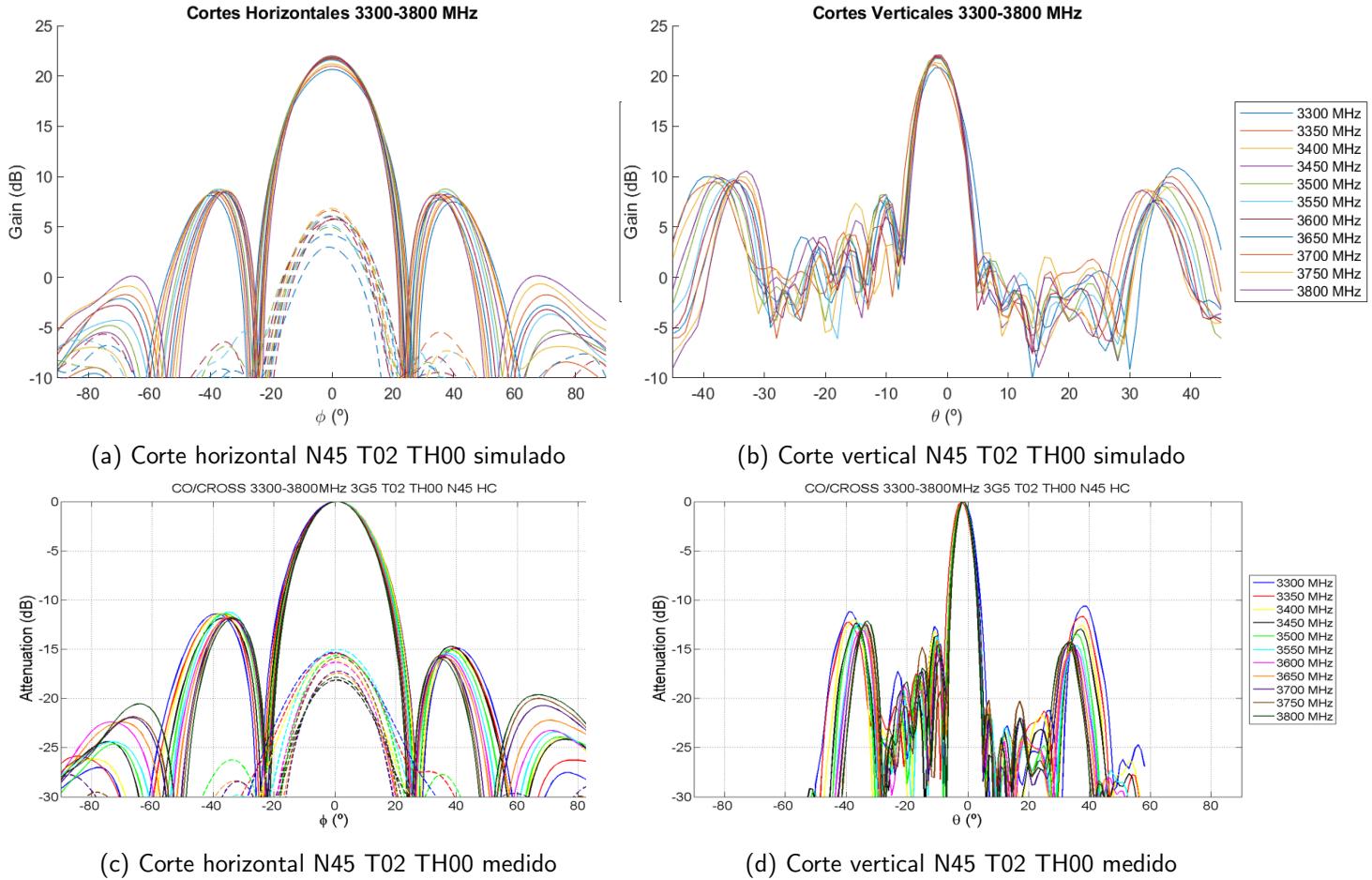


Figura B.7: Comparación cortes polarización -45 Tilt 02 Service Beam 0°

3G5 N45 T02 TH00 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.34	22.52	5.78	22.78	11.42	22.78	15.38
3350	20.71	22.15	5.71	23.29	11.42	23.29	15.44
3400	20.81	21.78	5.61	23.49	11.37	23.44	16.09
3450	21.11	21.44	5.59	25.76	11.85	23.36	18.14
3500	21.29	21.25	5.45	22.88	11.39	22.88	15.6
3550	21.4	21.12	5.24	21.65	11.24	21.65	15.02
3600	21.4	20.72	5.24	22.1	11.85	22.1	16.34
3650	21.24	20.61	5.16	20.91	11.73	20.91	17.44
3700	21.2	20.25	5.14	21.94	11.85	21.94	17.23
3750	21.57	19.96	5.1	20.15	11.77	20.15	15.82
3800	21.47	19.85	4.98	21.63	11.9	21.63	17.86
PROMEDIO	21.14	21.0590909	5.36363636	22.4163636	11.6172727	22.1936364	16.3963636

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T02 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.82	23.44	5.93	21.52	12.5	21.52	14.52
3350	21.13	23.03	5.81	20.53	12.6	20.53	14.96
3400	21.35	22.37	5.69	21.74	12.75	21.74	15.48
3450	21.75	22.18	5.64	22.96	13.12	22.96	17.44
3500	22.01	21.81	5.36	20.34	13.09	20.34	15.22
3550	21.73	21.88	5.33	19.89	12.83	19.89	14.73
3600	21.94	21.15	5.36	20.85	13.33	20.85	15.78
3650	21.79	21.11	5.3	20.15	13.26	20.15	16.72
3700	21.83	20.7	5.23	20.65	13.21	20.65	16.55
3750	22.07	20.59	5.16	19.65	13.3	19.65	16.15
3800	22.06	20.12	5.08	19.93	13.49	19.93	19.02
PROMEDIO	21.68	21.6709091	5.44454545	20.7463636	13.0436364	20.7463636	16.0518182

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.8: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T02 TH00

Polarización N45 Tilt 07 Service Beam 0°

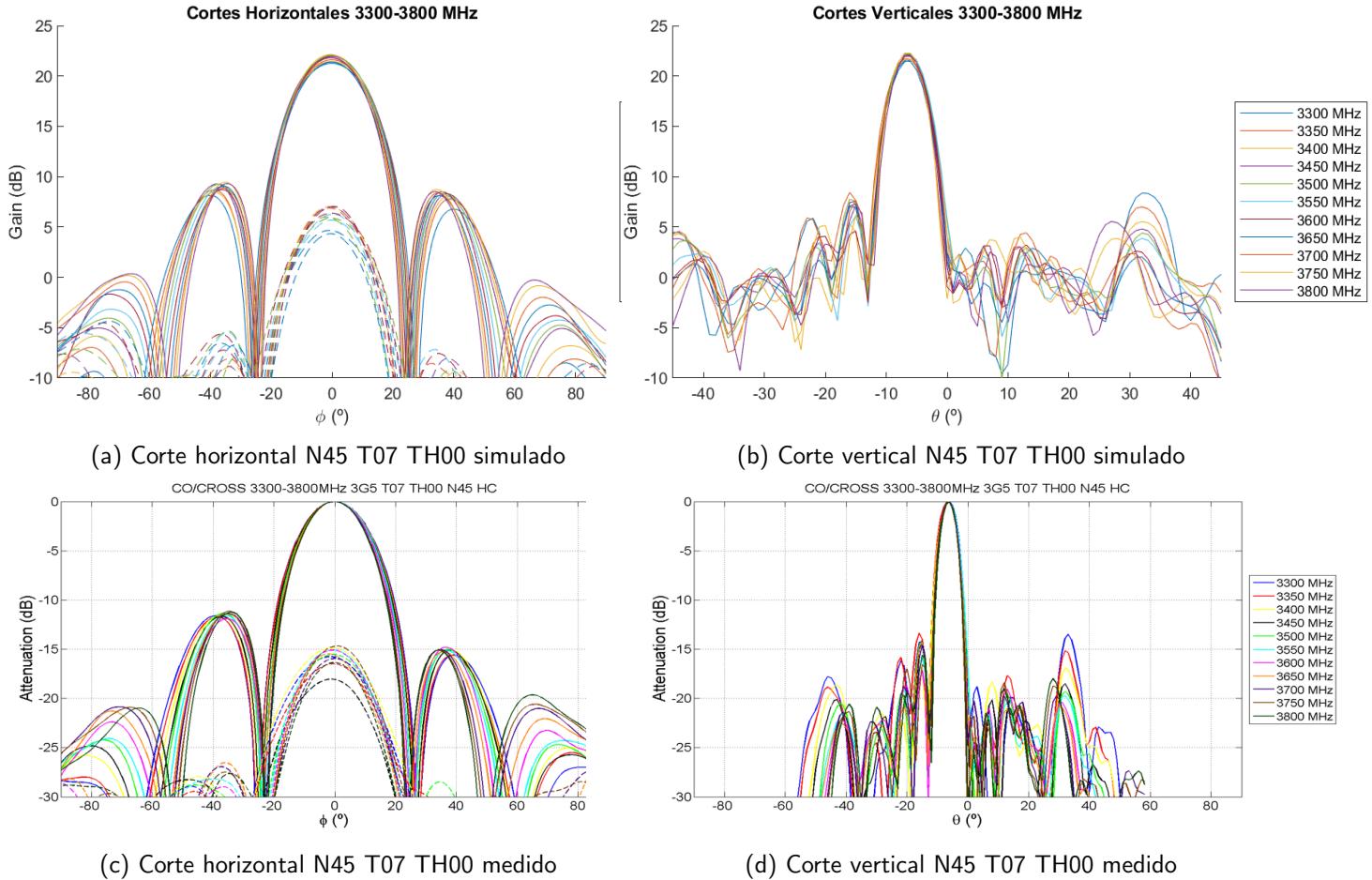


Figura B.9: Comparación cortes polarización -45 Tilt 07 Service Beam 0°

3G5 N45 T07 TH00 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.97	22.46	5.99	18.8	11.59	18.8	15.81
3350	21.04	22.17	6.03	23.08	11.72	23.08	16.5
3400	21.13	21.85	6.01	18.32	11.58	18.32	14.89
3450	21.68	21.71	5.58	24.54	11.68	20.14	18.08
3500	21.47	21.39	5.7	21.82	11.39	21.82	15.53
3550	21.56	21.11	5.67	21.68	11.6	21.68	15.08
3600	21.44	20.8	5.53	24.59	11.89	21.01	15.11
3650	21.05	20.42	5.48	24	11.41	22.84	15.61
3700	21.17	20.1	5.4	20.27	11.37	19.75	15.95
3750	21.72	19.81	5.27	21.82	11.15	18.41	14.7
3800	21.45	19.86	5.29	25.47	11.24	18.99	16.36
PROMEDIO	21.3345455	21.0618182	5.63181818	22.2172727	11.5109091	20.44	15.7836364

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T07 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	21.4	23.29	5.68	18.66	13.11	18.66	15.38
3350	21.73	22.73	5.76	20.14	12.92	20.14	15.92
3400	21.59	22.72	5.78	17.91	12.99	17.91	15.07
3450	22.05	22.53	5.46	21.6	12.69	19.65	17.32
3500	22.19	21.94	5.62	21.18	12.79	21.18	15.2
3550	21.96	21.94	5.62	19.96	12.84	19.96	14.82
3600	21.95	21.21	5.53	22.51	13.08	18.87	14.81
3650	21.51	21.32	5.44	22.07	12.32	22.07	15.51
3700	21.96	21.01	5.28	19.64	12.97	19.64	15.56
3750	22.26	20.86	5.16	20.03	12.67	19.28	15.15
3800	21.93	20.78	5.16	22.26	12.54	18.95	17.52
PROMEDIO	21.8663636	21.8481818	5.49909091	20.5418182	12.8109091	19.6645455	15.66

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.10: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T07 TH00

Polarización N45 Tilt 12 Service Beam 0°

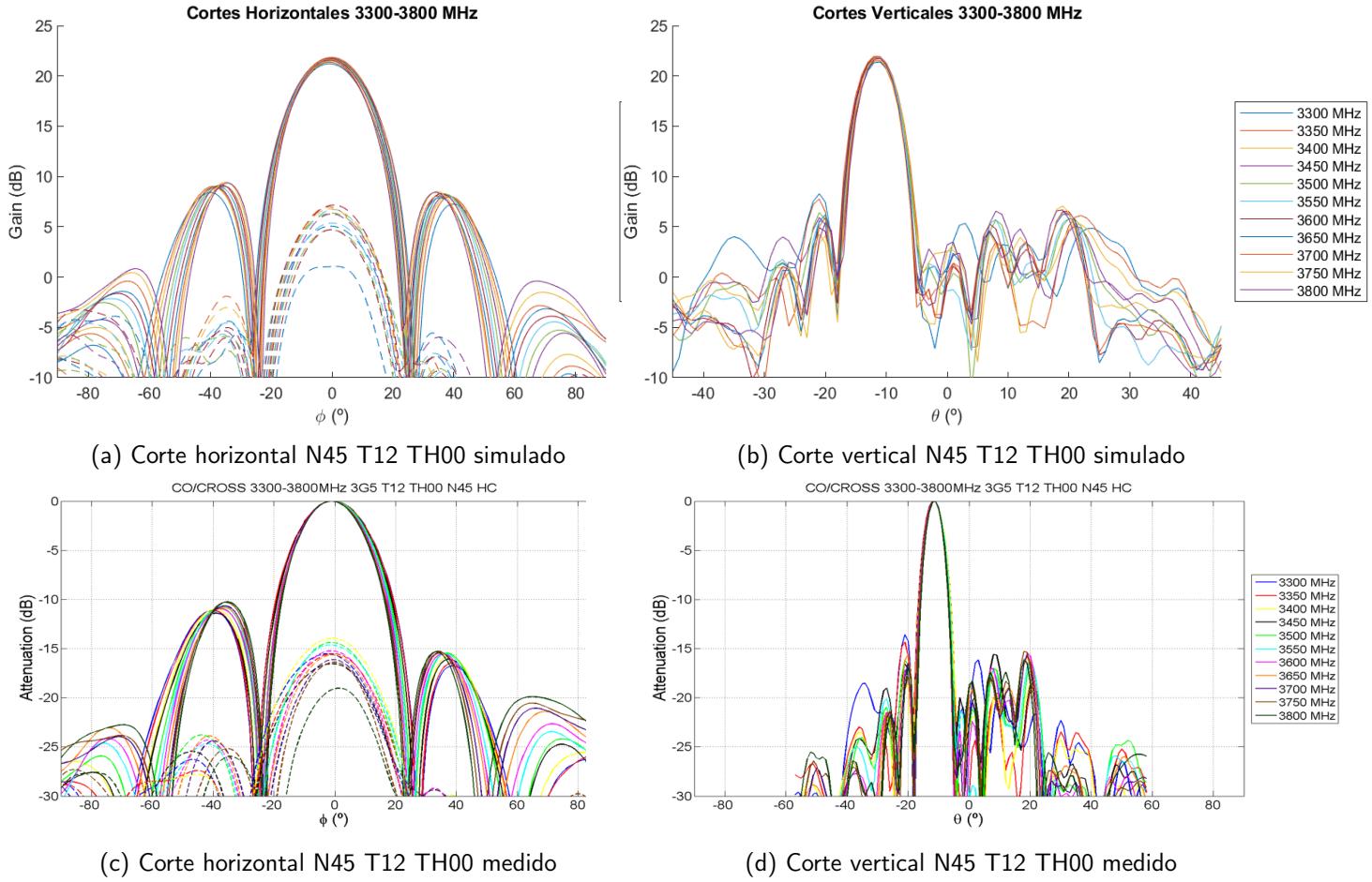


Figura B.11: Comparación cortes polarización -45 Tilt 12 Service Beam 0°

3G5 N45 T12 TH00 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.97	22.7	5.97	20.94	11.13	16.16	15.58
3350	21.04	22.66	6.21	30.36	11.11	24.31	15.51
3400	20.98	22.13	6.07	22.13	10.95	21.91	13.95
3450	21.26	22.12	5.81	19.98	11.39	19.94	16.53
3500	20.96	21.57	5.86	24.74	10.86	21.16	14.38
3550	20.96	21.22	5.79	21.39	10.7	21.39	14.63
3600	20.87	20.91	5.66	23.41	10.98	22.4	15.23
3650	20.61	20.32	5.52	29.72	10.81	17.32	15.64
3700	20.64	20.12	5.4	25.24	10.66	17.92	16.13
3750	20.93	20.04	5.39	32.56	10.29	18.02	16.4
3800	20.85	19.86	5.31	18.33	10.25	17.4	19.18
PROMEDIO	20.9154545	21.2409091	5.72636364	24.4363636	10.83	19.8118182	15.7418182

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T12 TH00 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	21.64	23.46	5.9	20.64	13.1	16.38	15.15
3350	21.96	22.88	6.07	20.56	12.81	20.56	15.13
3400	21.64	22.96	5.97	19.04	12.57	19.04	14.33
3450	21.84	22.71	5.67	19.02	12.77	19.02	16.7
3500	21.84	22.36	5.8	20.77	12.64	20.77	14.74
3550	21.76	22.25	5.72	20.45	12.67	20.45	14.85
3600	21.82	21.3	5.62	23.08	12.53	20.72	15.43
3650	21.32	21.43	5.52	19	12.2	16.87	16.52
3700	21.48	20.93	5.42	22.66	12.31	16.9	16.02
3750	21.75	20.76	5.44	18.54	12.21	18.54	16.95
3800	21.62	20.44	5.33	18.25	12.23	17.16	20.55
PROMEDIO	21.6972727	21.9527273	5.67818182	20.1827273	12.5490909	18.7645455	16.0336364

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.12: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T12 TH00

Polarización P45 Tilt 02 Service Beam 30°

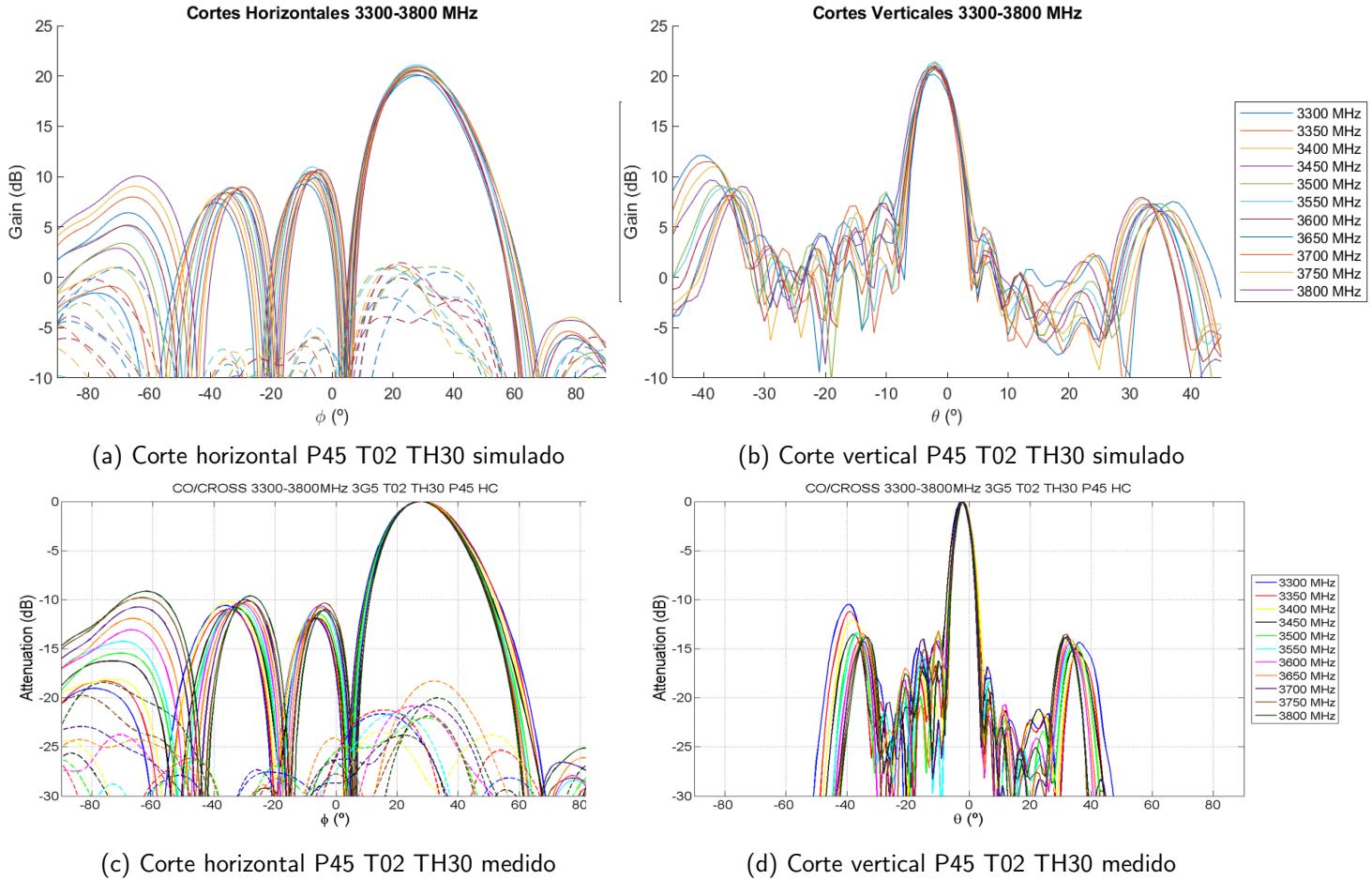


Figura B.13: Comparación cortes polarización +45 Tilt 02 Service Beam 30°

3G5 P45 T02 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	19.14	24.92	5.87	18.01	10.6	18.01	24.45
3350	19.6	24.79	5.6	19.44	10.98	19.44	24.11
3400	19.65	24.17	5.72	20.55	10.19	20.55	27.47
3450	19.86	23.81	5.58	18.79	10.73	18.79	24.63
3500	20.06	23.57	5.31	18.2	10.95	18.2	22.1
3550	20.15	22.7	5.32	18.2	10.5	18.2	22.93
3600	19.68	22.29	5.27	21.58	10.38	20.71	20.91
3650	19.55	22.57	5.1	20.87	10.34	20.87	18.88
3700	19.47	22.76	5.18	16.81	10	16.81	20.85
3750	19.6	22.61	5.04	21.84	9.8	21.84	22.02
3800	19.71	22.24	4.95	20.15	9.14	20.15	21.17
PROMEDIO	19.6790909	23.3118182	5.35818182	19.4945455	10.3281818	19.4154545	22.6836364

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T02 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.08	24.44	5.78	19.38	10.76	19.38	20.6
3350	20.47	24.53	5.66	17.58	10.74	17.58	21.52
3400	20.45	24.01	5.88	18.18	10.42	18.18	24.45
3450	20.94	23.23	5.67	16.58	10.62	16.58	24.7
3500	20.9	23.11	5.12	17.42	10.32	17.42	20.61
3550	21.14	22.09	5.17	16.86	10.14	16.86	21.47
3600	20.68	21.77	5.22	18.69	10.08	18.69	19.94
3650	20.19	21.81	5.09	19.2	10.27	19.2	19.26
3700	20.62	22.06	4.98	15.85	10.14	15.85	20.81
3750	20.61	21.83	4.87	19.39	9.92	19.39	21.42
3800	20.54	21.8	4.88	18.37	9.79	18.37	20.85
PROMEDIO	20.6018182	22.7890909	5.30181818	17.9545455	10.2909091	17.9545455	21.4209091

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.14: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T02 TH30

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam 30°

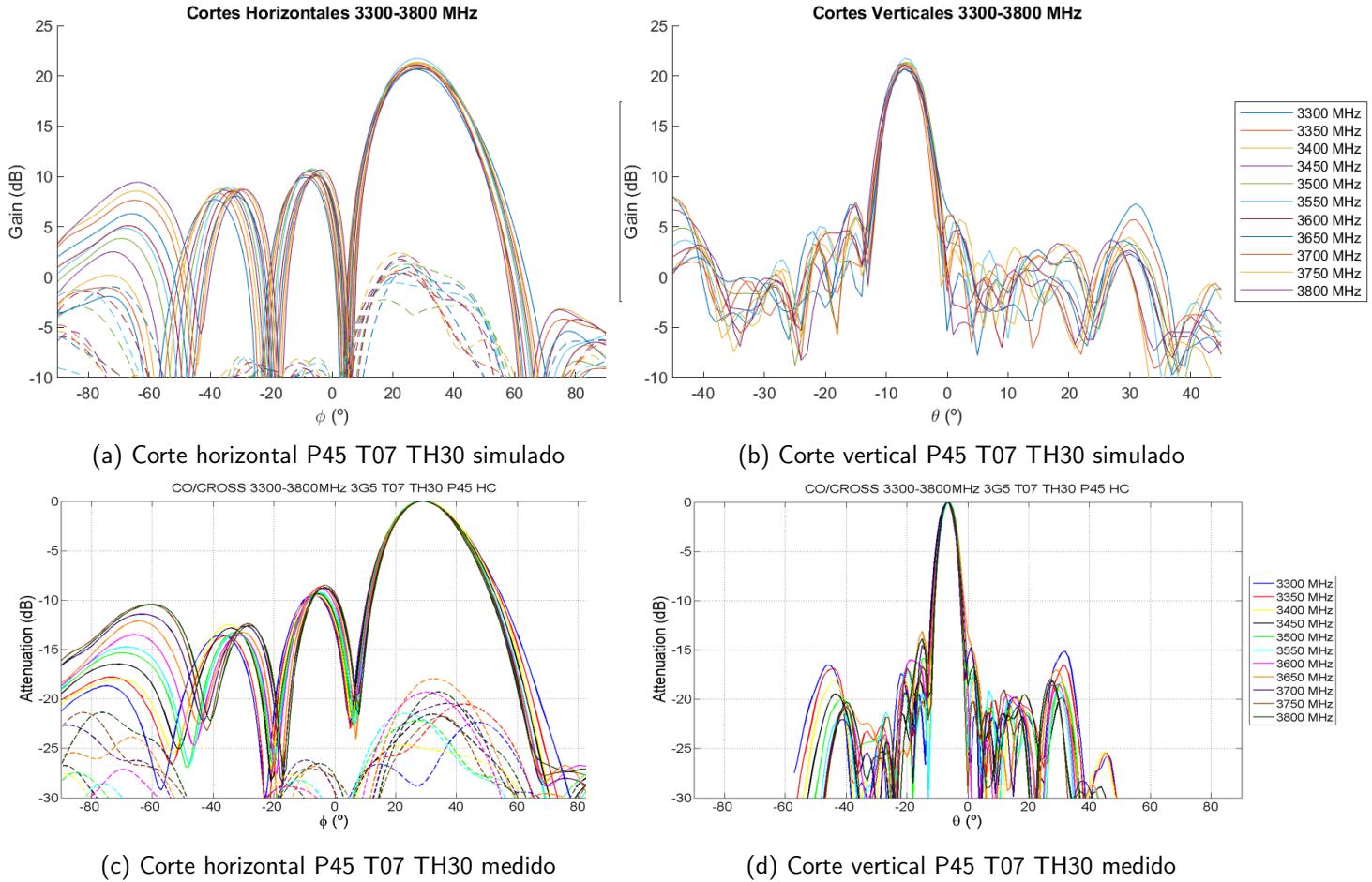


Figura B.15: Comparación cortes polarización +45 Tilt 07 Service Beam 30°

3G5 P45 T07 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.25	24.87	6.01	21.75	9.49	21.75	28.58
3350	20.22	24.84	5.83	17.12	9.51	17.12	23.61
3400	20.74	24.5	5.67	17.35	9.55	17.35	24.99
3450	20.3	24.22	5.94	22.9	9.38	22.9	21.79
3500	20.48	23.79	5.58	17.76	9.28	17.76	22.21
3550	20.73	23.17	5.3	17.31	9.25	17.31	22.06
3600	19.98	23.18	5.72	24.08	8.78	24.08	19.36
3650	19.58	23.12	5.56	25.15	8.63	25.15	18.24
3700	20.15	22.78	5	14.73	8.8	14.73	21.11
3750	20.33	22.55	5.13	20.2	8.5	20.2	22.71
3800	20.06	22.35	5.26	16.67	8.72	16.67	20
PROMEDIO	20.2563636	23.5790909	5.54545455	19.5472727	9.08090909	19.5472727	22.2418182

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.67	25.14	5.93	20.21	10.8	20.21	24.16
3350	20.8	24.71	5.74	16.47	10.68	16.47	21.7
3400	21.24	24.31	5.54	15.51	10.78	15.51	21.54
3450	21.36	23.86	5.76	25.84	10.78	22.21	21.12
3500	21.35	23.47	5.52	20.69	10.68	20.69	21.34
3550	21.77	22.64	5.23	16.3	10.98	16.3	20.42
3600	21.09	22.28	5.65	21.22	10.87	21.22	19.45
3650	20.69	22.12	5.51	23.4	10.53	23.4	19.49
3700	21.15	22.21	4.87	15	11.07	15	20.06
3750	21.38	21.84	4.93	18.51	10.88	18.39	20.82
3800	21.12	21.59	5.13	16.42	10.41	16.42	20.37
PROMEDIO	21.1472727	23.1063636	5.43727273	19.0518182	10.7690909	18.7109091	20.9518182

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.16: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH30

Polarización P45 Tilt 12 Service Beam 30°

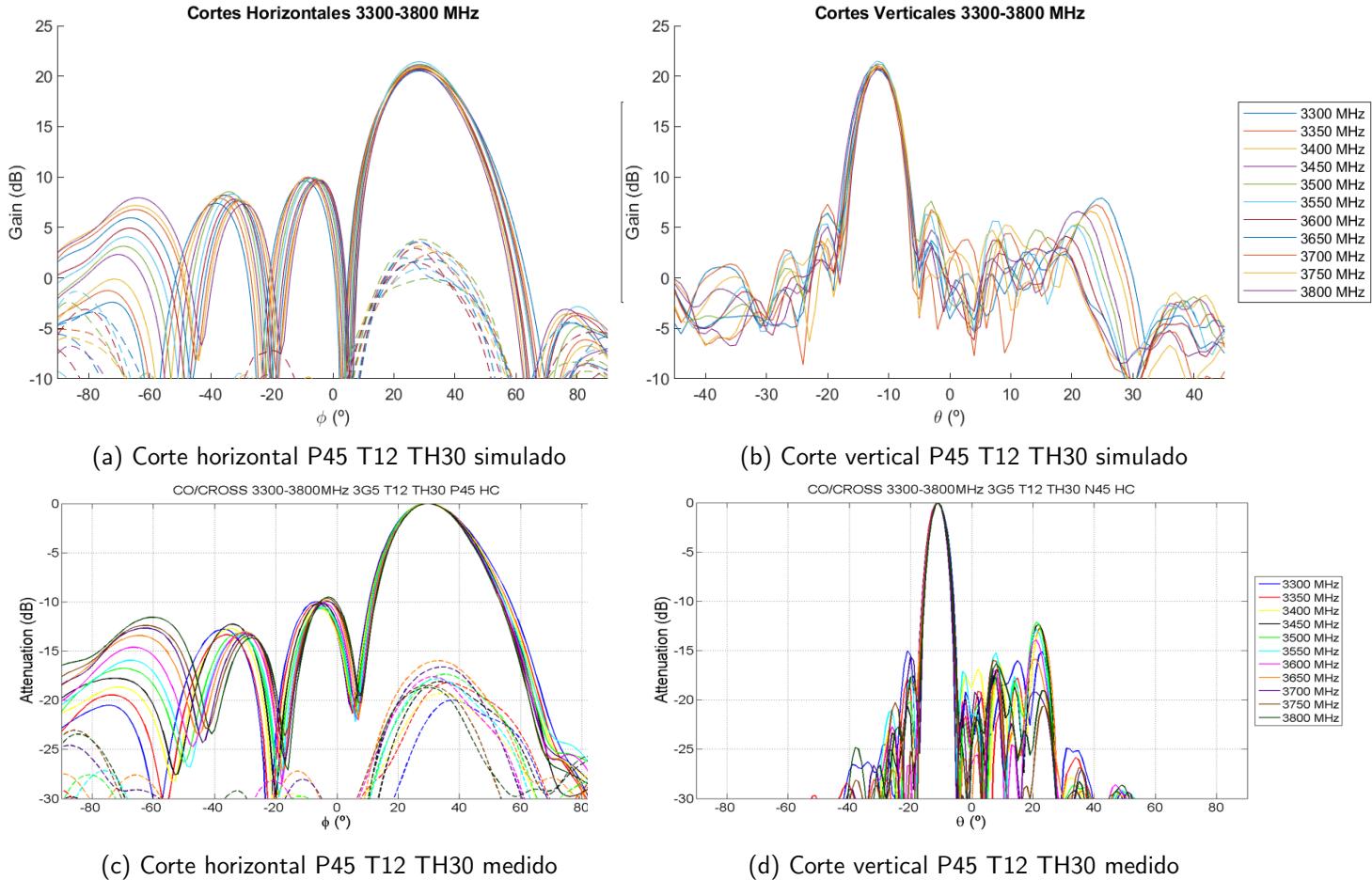


Figura B.17: Comparación cortes polarización +45 Tilt 12 Service Beam 30°

3G5 P45 T12 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.24	25.98	6.17	17.73	9.98	17.73	22.23
3350	20.21	25.34	5.87	14.1	10.19	14.1	19.2
3400	20.49	25.02	5.88	14.39	10.65	14.39	19.67
3450	20.04	24.56	6.18	17.14	10.1	17.14	18.42
3500	20.26	24.25	5.5	13.67	10.66	13.67	18.17
3550	20.43	23.94	5.32	14.86	10.51	14.86	18.14
3600	19.91	23.8	5.8	18.5	10.14	18.5	17.65
3650	19.69	23.36	5.56	17.42	9.83	17.42	16.26
3700	19.96	23.18	5.18	20	9.96	18.51	16.91
3750	20.16	22.92	5.25	21.28	9.62	16.8	18.49
3800	19.73	22.8	5.17	18.17	9.52	18.17	18.72
PROMEDIO	20.1018182	24.1045455	5.62545455	17.0236364	10.1054545	16.4809091	18.5327273

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T12 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.71	25.28	6.13	16.97	11.05	16.97	20.83
3350	20.8	24.52	5.81	14.01	10.8	14.01	19.83
3400	20.98	24.38	5.81	14.42	10.91	14.42	19.47
3450	21.11	23.9	6.08	16.36	11.12	16.36	19.33
3500	21.24	23.1	5.48	13.62	11.26	13.62	19.21
3550	21.5	22.65	5.29	15.19	11.48	15.19	18.28
3600	20.85	22.6	5.69	17.79	11.03	17.79	17.21
3650	20.62	22.31	5.47	17.16	10.82	17.16	16.7
3700	20.89	22.13	5.06	19.34	11.39	18.2	17.21
3750	20.97	21.67	5.24	20.56	11.13	18.92	17.99
3800	20.66	21.51	5.23	16.87	10.93	16.87	19.56
PROMEDIO	20.9390909	23.0954545	5.57181818	16.5718182	11.0836364	16.3190909	18.6927273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.18: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T12 TH30

Polarización N45 Tilt 02 Service Beam 30°

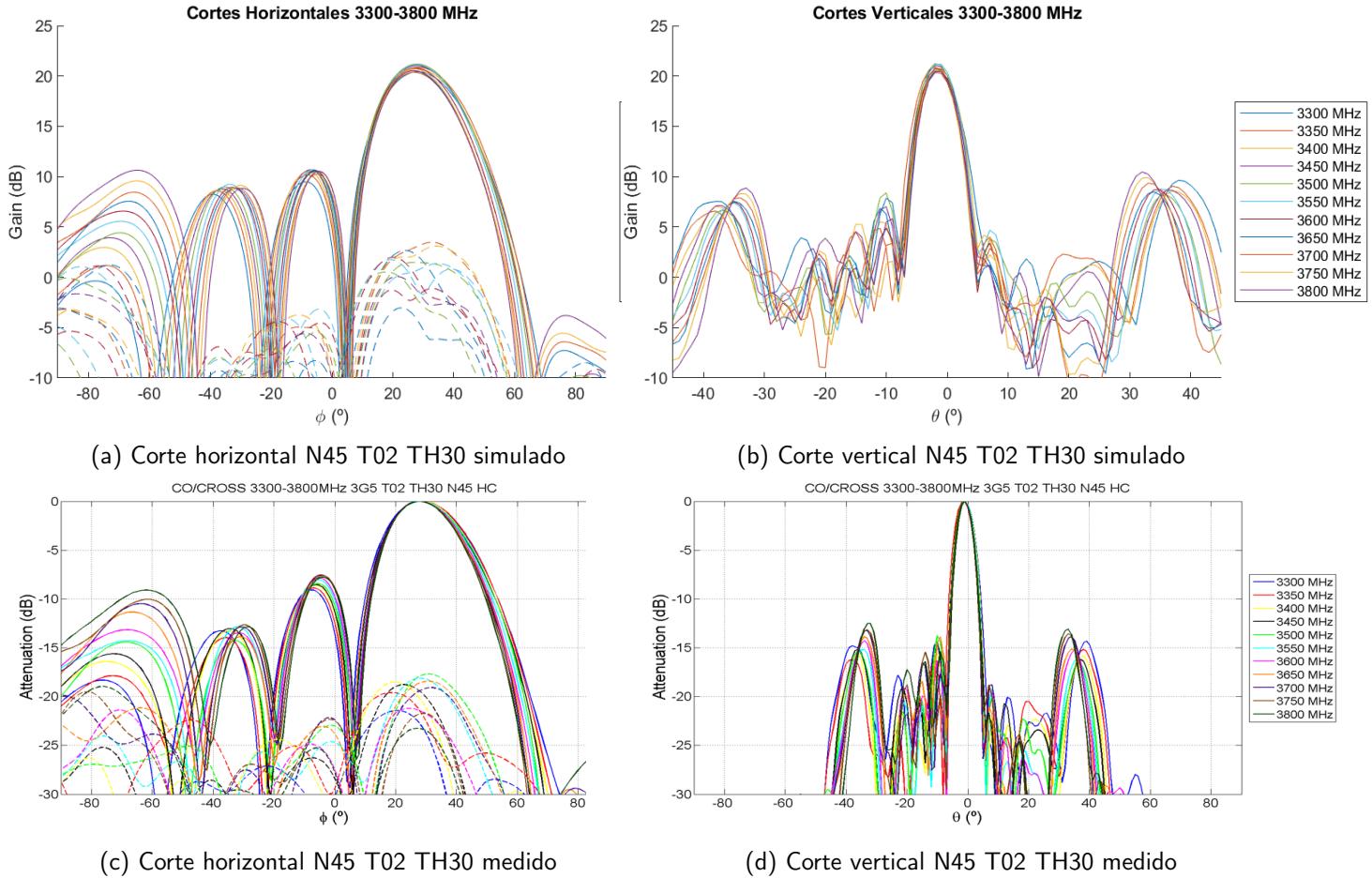


Figura B.19: Comparación cortes polarización -45 Tilt 02 Service Beam 30°

3G5 N45 T02 TH30 Medido								3G5 N45 T02 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max[dB]	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)	FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max[dB]	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.08	25.09	5.79	20.08	9.08	20.08	22.81	3300	20.46	24.5	5.81	18.63	10.93	18.63	22.65
3350	20.29	24.85	5.72	20.07	8.88	20.07	21.99	3350	20.89	24.48	5.69	18.01	10.67	18.01	21.94
3400	20.46	24.05	5.73	22.19	8.59	22.19	20.67	3400	20.72	24.27	5.78	18.46	10.16	18.46	20.84
3450	20.23	23.7	5.58	22.12	8.54	20.72	19.48	3450	21.04	23.53	5.54	20.6	10.31	20.6	18.85
3500	20.36	23.65	5.36	20.05	8.43	20.05	17.89	3500	21.24	23.22	5.24	17.41	10.63	17.41	18.12
3550	20.3	23.14	5.34	19.21	8.02	19.21	18.12	3550	21.15	22.61	5.33	16.48	10.4	16.48	18.81
3600	20.01	22.93	5.27	19.15	7.84	19.15	21.46	3600	20.76	22.35	5.25	17.35	10.19	17.35	21.76
3650	19.69	22.36	5.19	21.11	7.52	21.11	18.59	3650	20.49	21.65	5.23	19.25	10.02	19.25	19.05
3700	19.55	22.3	5.22	18.79	7.56	18.79	19.38	3700	20.33	21.7	5.18	16.31	10.1	16.31	19.79
3750	19.79	22.11	5.13	18.81	7.62	18.81	21.77	3750	20.64	21.3	5.1	16.44	10.2	16.44	22.85
3800	19.69	21.61	5.08	21.69	7.77	21.69	23.27	3800	20.42	21.14	5.17	22.41	9.88	22.41	24.33
PROMEDIO	20.0409091	23.2536364	5.40090909	20.2972727	8.16818182	20.17	20.4936364	PROMEDIO	20.74	22.7954545	5.39272727	18.3045455	10.3172727	18.3045455	20.8172727

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.20: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T02 TH30

Polarización N45 Tilt 07 Service Beam 30°

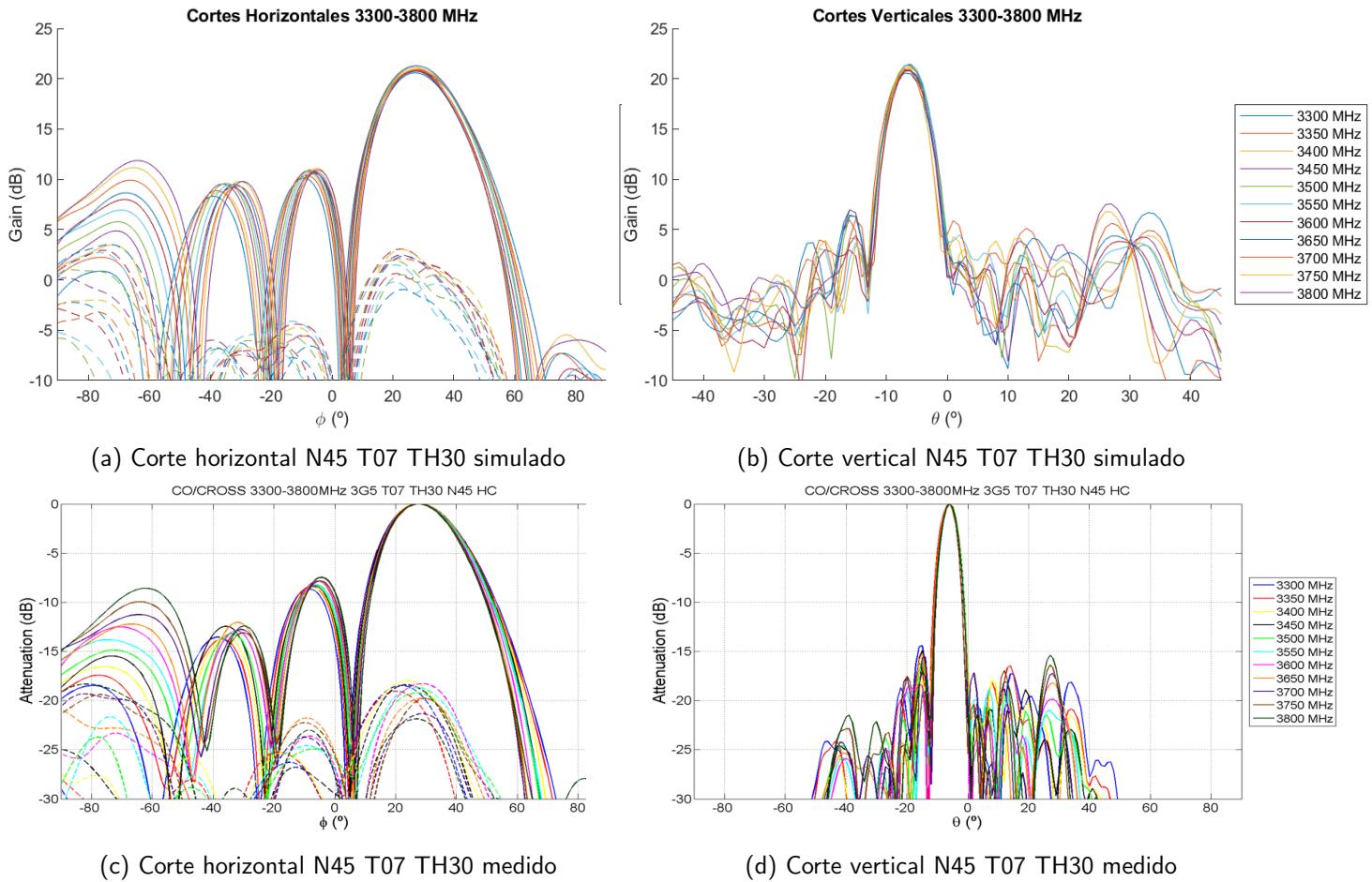


Figura B.21: Comparación cortes polarización -45 Tilt 07 Service Beam 30°

3G5 N45 T07 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.64	24.58	5.83	20.36	8.64	20.36	19.36
3350	20.55	24.25	5.93	30.05	8.38	18.15	20.52
3400	20.91	23.81	5.76	22.56	8.5	17.9	18.41
3450	20.62	23.81	5.66	31.75	8.31	20.92	18.81
3500	20.64	23.49	5.64	20.62	8.23	20.62	19.24
3550	20.68	23.05	5.49	19.85	8.21	18.83	18.69
3600	20.19	22.93	5.6	23.91	7.84	22.2	18.35
3650	19.85	22.63	5.61	20.63	7.87	20.63	19.85
3700	20.08	22.59	5.23	17.16	7.83	17.16	21.34
3750	20.39	21.98	5.19	20.4	7.52	16.96	19.89
3800	20.04	21.73	5.42	21.46	7.45	18.06	21.87
PROMEDIO	20.4172727	23.1681818	5.57818182	22.6136364	8.07090909	19.2536364	19.6663636

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T07 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.77	24.31	5.71	18.55	10.63	18.55	20.21
3350	20.91	23.76	5.8	18.23	10.5	18.23	21.09
3400	21.02	23.54	5.65	18.09	10.21	17.29	18.61
3450	21.32	23.07	5.58	19.79	10.44	19.79	19.34
3500	21.28	22.74	5.6	20.3	10.3	18.82	19.44
3550	21.29	22.11	5.41	17.02	10.47	17.02	18.95
3600	20.85	22	5.55	19.22	10.08	19.22	18.94
3650	20.57	21.35	5.56	18.8	9.99	18.8	20.71
3700	20.8	21.33	5.11	14.9	10.06	14.9	22.22
3750	21.11	20.86	5.04	16.82	9.96	16.82	20.85
3800	20.72	20.89	5.25	18.96	8.89	16.97	22.09
PROMEDIO	20.9672727	22.36	5.47818182	18.2436364	10.1390909	17.8554545	20.2227273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.22: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T07 TH30

Polarización N45 Tilt 12 Service Beam 30°

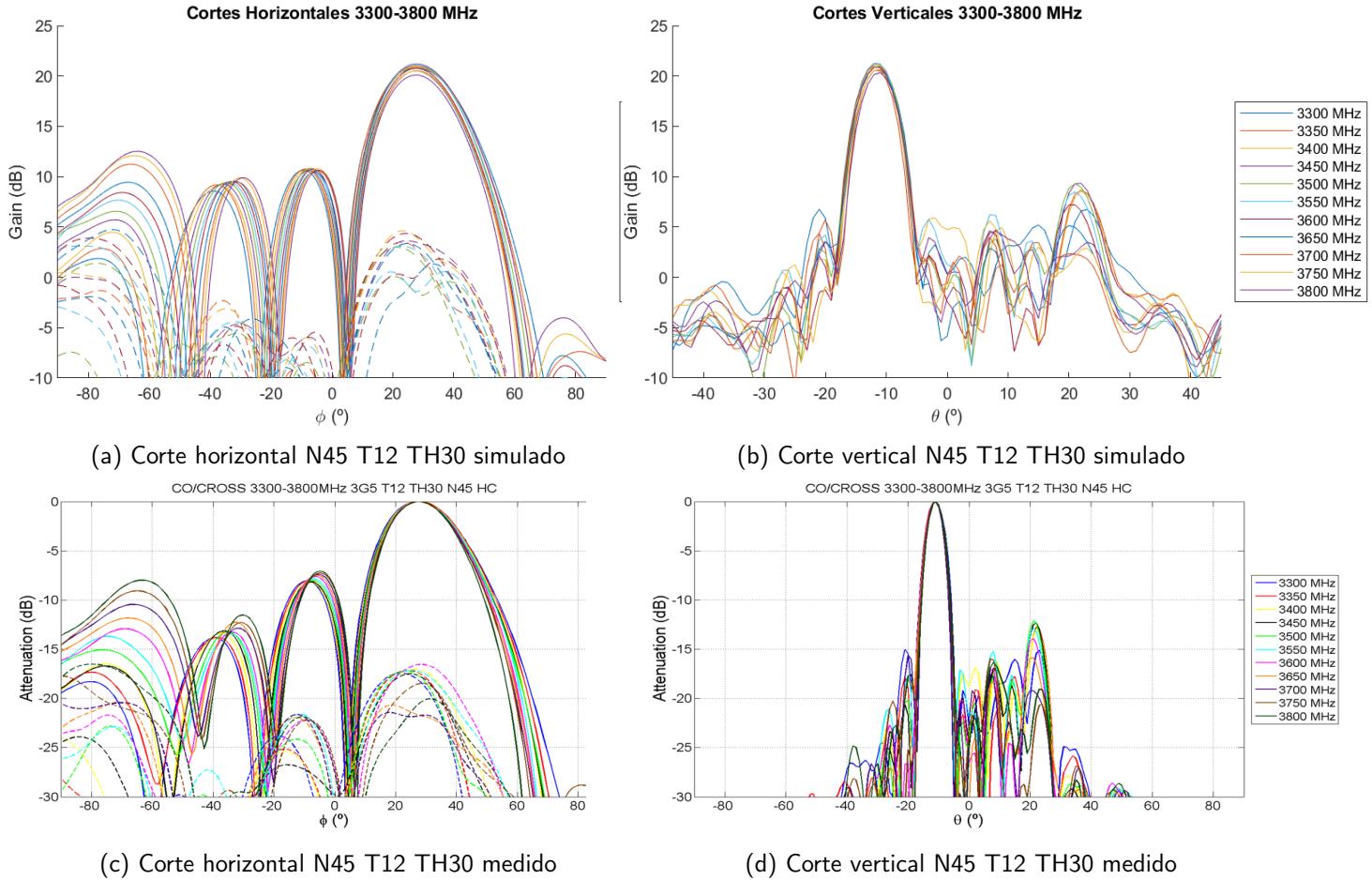


Figura B.23: Comparación cortes polarización -45 Tilt 12 Service Beam 30°

3G5 N45 T12 TH30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.49	24.97	5.99	19.2	8.05	19.2	18.05
3350	20.47	24.59	6.05	21.61	8.04	19.12	17.5
3400	20.57	24.27	5.83	17.46	8.21	16.88	17.05
3450	20.26	23.69	5.89	19.95	8.18	19.95	17.63
3500	20.28	23.38	5.84	22.36	8.03	20.47	17.59
3550	20.2	23.61	5.54	17.11	7.86	17.11	17.2
3600	19.96	23.07	5.78	20.18	7.62	20.18	16.59
3650	19.64	22.73	5.77	25.76	7.48	23.95	21.64
3700	19.72	22.42	5.34	21.03	7.39	17.54	21.76
3750	19.82	22.08	5.59	29.67	7.26	15.98	18.5
3800	19.42	21.86	5.52	22	7.08	22	20.45
PROMEDIO	20.0754545	23.3336364	5.74	21.4845455	7.74545455	19.3072727	18.5418182

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T12 TH30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.85	24.72	5.99	17.63	10.14	17.63	18.79
3350	21.07	24.02	6.01	18.94	10.24	18.93	18.39
3400	21	23.62	5.82	15.14	10.25	15.14	16.86
3450	21.27	23.07	5.83	17.31	10.59	17.31	18.13
3500	21.22	22.46	5.83	19.21	10.31	19.21	18.43
3550	21.25	22.18	5.53	15.46	10.53	15.46	17.24
3600	20.86	21.88	5.76	18.63	9.99	18.63	17.3
3650	20.54	21.44	5.7	21.26	10.04	17.73	22.14
3700	20.57	21.5	5.29	18.57	9.28	18.57	21.95
3750	20.56	21.54	5.58	23.03	8.4	14.97	20.36
3800	20.15	21.33	5.56	21.3	7.57	21.3	19.94
PROMEDIO	20.8490909	22.5236364	5.71818182	18.7709091	9.75818182	17.7163636	19.0481818

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.24: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T12 TH30

Polarización P45 Tilt 02 Service Beam -30°

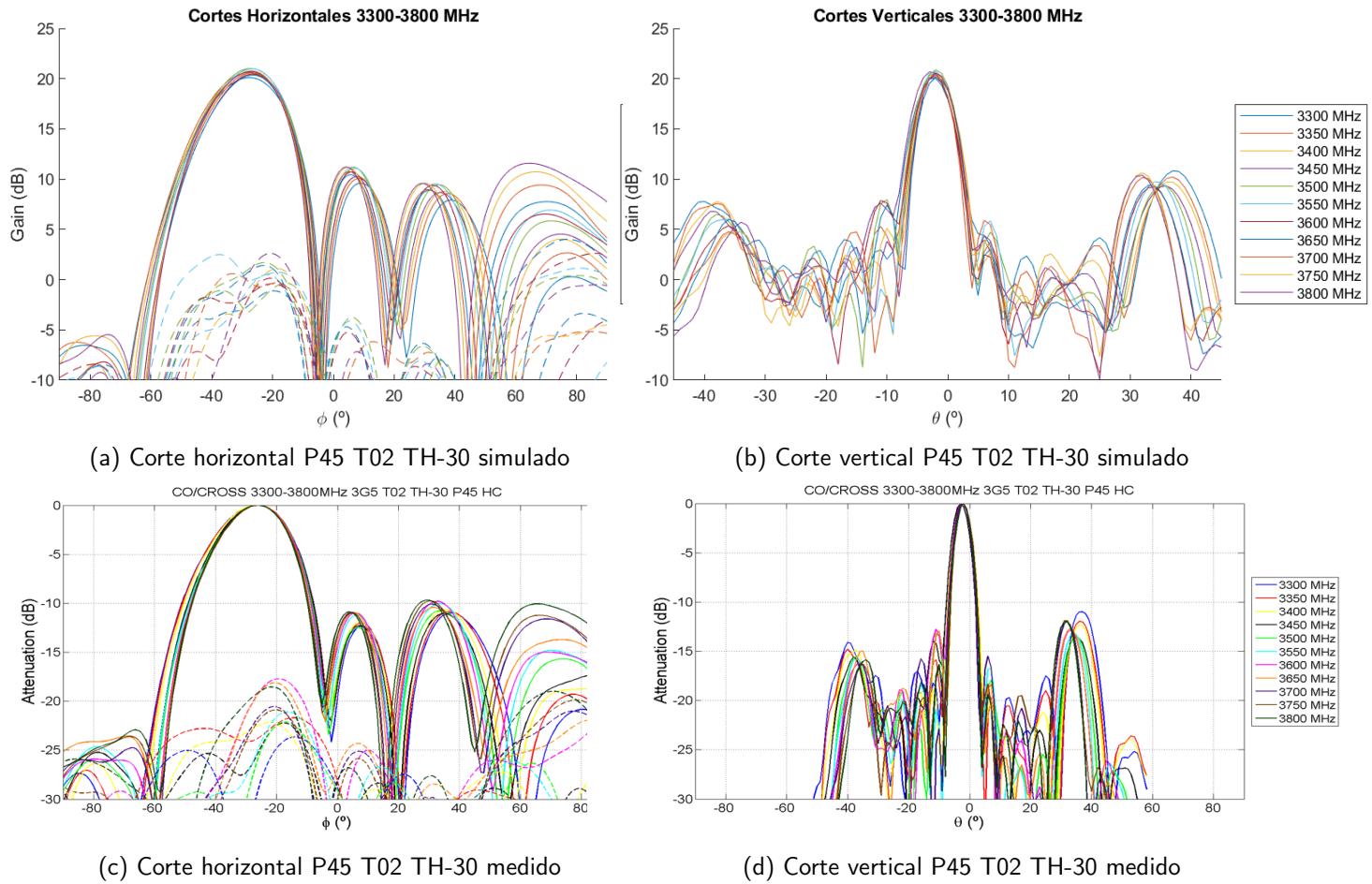


Figura B.25: Comparación cortes polarización +45 Tilt 02 Service Beam -30°

3G5 P45 T02 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	19.8	24.6	5.75	19.68	11.01	19.68	30.25
3350	20.11	24.46	5.54	19.68	10.86	19.68	23.94
3400	20.16	23.96	5.65	19.88	10.65	19.88	22.65
3450	20.15	23.47	5.53	19.05	11.04	19.05	25.22
3500	20.38	23	5.3	17.91	10.74	17.91	25.78
3550	20.17	22.48	5.36	16.7	10.04	16.7	24.81
3600	19.85	22.65	5.3	19.15	9.8	19.15	19.16
3650	19.86	22.41	5.15	18.36	10.41	18.36	19.25
3700	19.95	22.2	5.14	15.48	10.09	15.48	21.64
3750	20.13	21.97	5.12	18.31	9.77	18.31	22.04
3800	20.09	22.02	5.1	19.36	9.68	19.36	19.11
PROMEDIO	20.0590909	23.02	5.35818182	18.5054545	10.3718182	18.5054545	23.0772727

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T02 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.03	24.49	5.68	17.67	10.48	17.67	23.36
3350	20.58	24.12	5.54	16.83	10.56	16.83	20.7
3400	20.48	23.47	5.79	17.85	10.28	17.85	22.12
3450	20.54	23.08	5.58	16.72	10.44	16.72	23.04
3500	20.89	22.82	5.12	16.15	9.9	16.15	21.41
3550	20.74	21.81	5.29	14.89	9.77	14.89	22.27
3600	20.21	21.62	5.34	17.72	9.71	17.72	19.42
3650	20.12	21.68	5.19	17.09	9.9	17.09	18.95
3700	20.38	21.86	5.01	14.46	9.81	14.46	21.14
3750	20.57	21.81	4.95	16.66	9.59	16.66	22.16
3800	20.57	21.99	4.98	16.18	9.14	16.18	19.76
PROMEDIO	20.4645455	22.6136364	5.31545455	16.5654545	9.96181818	16.5654545	21.3027273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.26: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T02 TH-30

Polarización P45 Tilt 07 Service Beam -30°

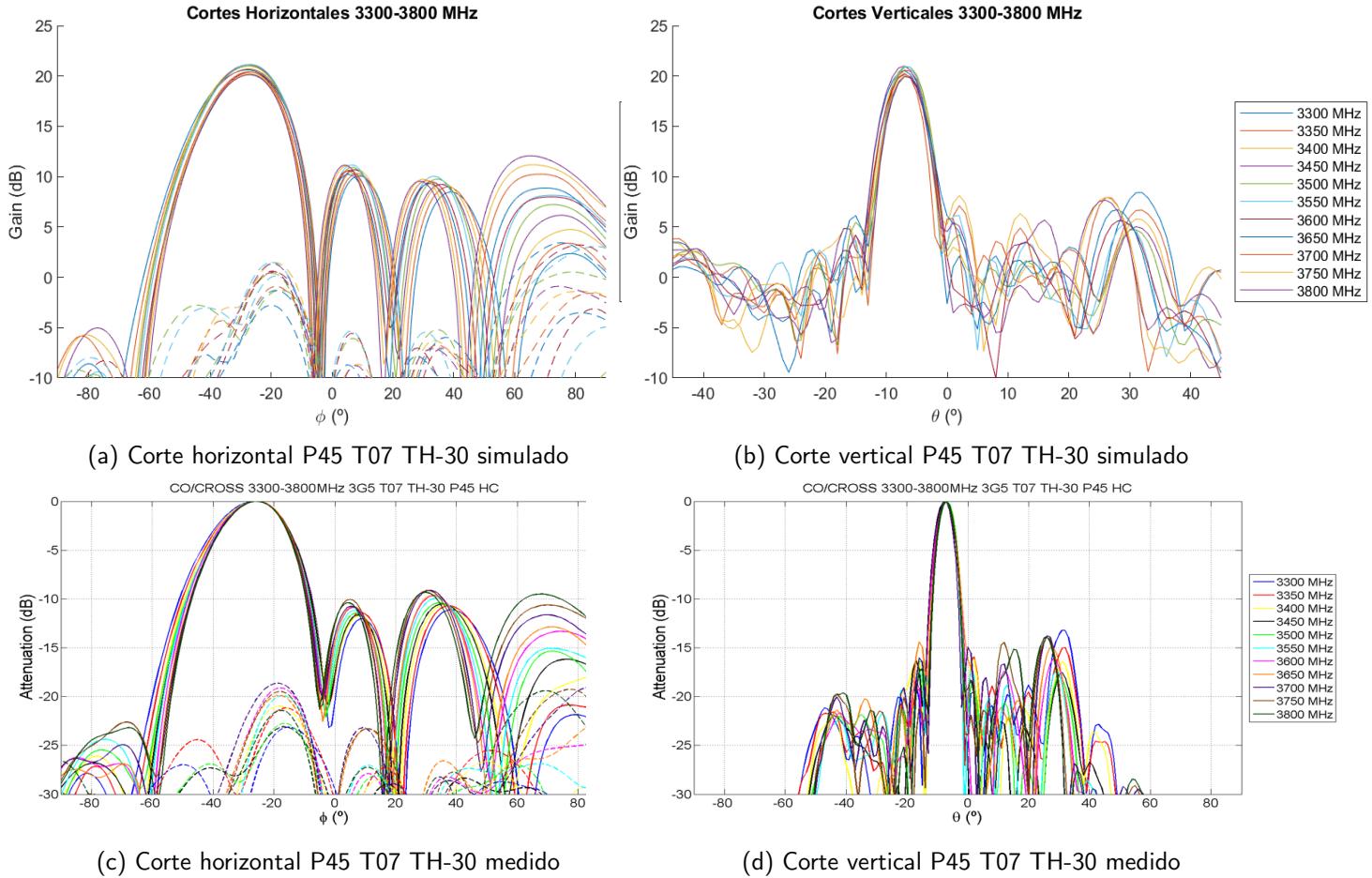


Figura B.27: Comparación cortes polarización +45 Tilt 07 Service Beam -30°

3G5 P45 T07 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max[dB]	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.34	25.08	6.04	19.58	11.1	19.58	28.08
3350	20.44	24.33	5.95	15.95	10.7	15.95	25.49
3400	20.9	23.94	5.77	16.15	10.62	16.15	23.53
3450	20.39	23.44	6.01	24.61	10.52	22.6	26.04
3500	20.56	23.28	5.6	18.56	10.4	18.56	26.32
3550	20.61	23.15	5.42	17.03	9.94	17.03	23.77
3600	19.79	23.18	5.95	30.64	9.66	30.64	21.86
3650	19.68	22.63	5.51	21.12	9.62	21.12	21.68
3700	19.88	22.53	5.03	14.92	9.12	14.92	20.39
3750	19.84	22.19	5.41	21.88	9.14	21.41	22.17
3800	19.71	21.85	5.33	18.31	9.32	18.31	24.45
PROMEDIO	20.1945455	23.2363636	5.63818182	19.8863636	10.0127273	19.6609091	23.98

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max[dB]	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.54	24.92	6	18.41	10.52	18.39	26.09
3350	20.58	24.2	5.78	13.46	10.38	13.46	23.99
3400	20.98	23.56	5.62	12.85	10.34	12.85	23.12
3450	20.99	22.97	5.88	23.61	10.44	23.44	25.37
3500	20.87	23.05	5.54	16.64	10.07	16.64	24.93
3550	20.98	22.48	5.25	14.84	9.99	14.84	22.67
3600	20.19	22.03	5.84	16.66	9.77	14.04	21.58
3650	19.99	21.71	5.41	18.3	9.93	14.65	21.93
3700	20.27	21.85	4.9	14.43	9.86	14.43	21.15
3750	20.03	21.79	5.35	17.02	9.04	17.02	22.12
3800	19.95	21.63	5.24	14.49	8.05	14.49	24.74
PROMEDIO	20.4881818	22.7445455	5.52818182	16.4281818	9.85363636	15.8409091	23.4263636

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.28: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 TH-30

Polarización P45 Tilt 12 Service Beam -30°

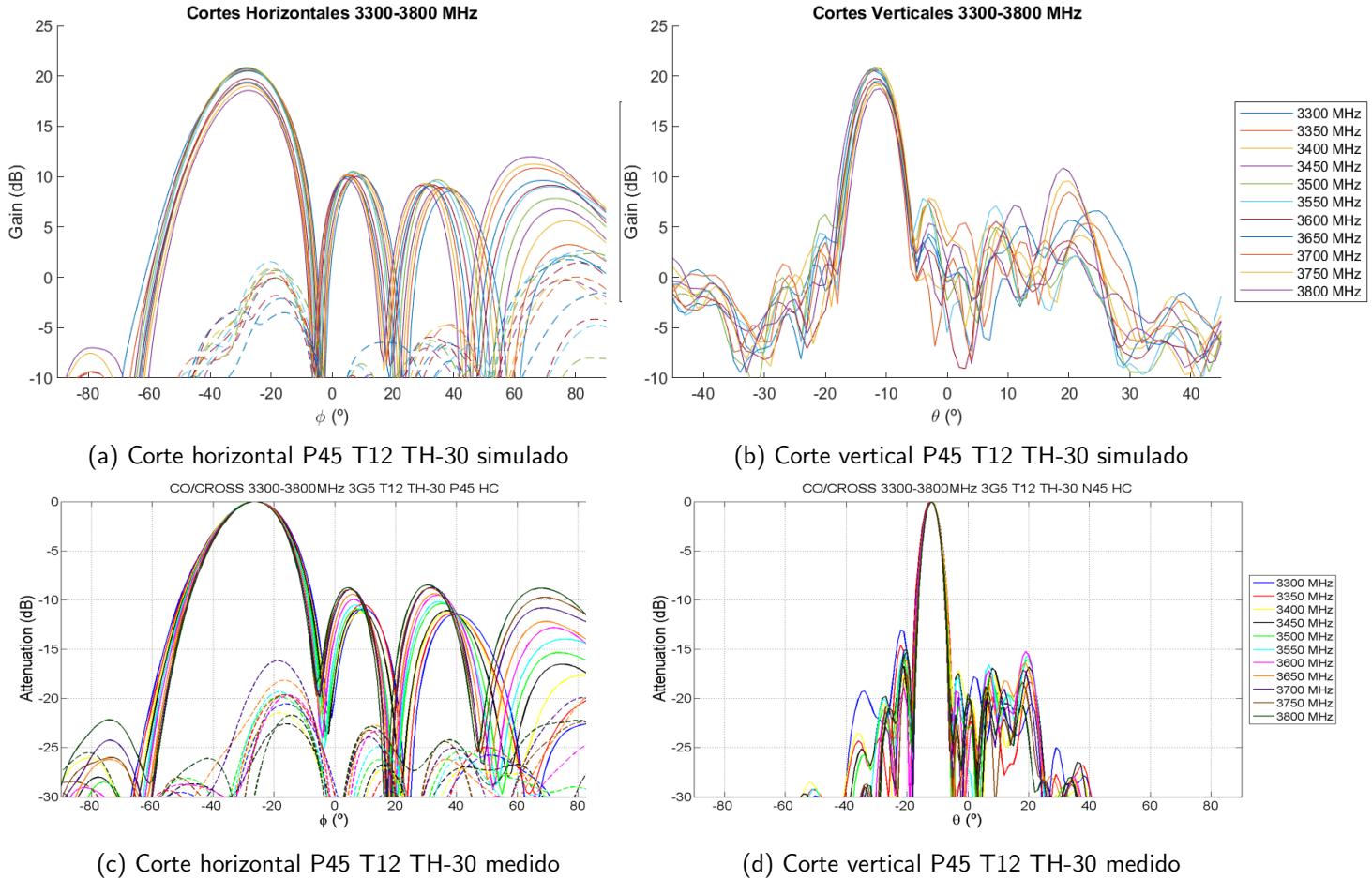


Figura B.29: Comparación cortes polarización +45 Tilt 12 Service Beam -30°

3G5 P45 T12 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.4	25.16	5.99	16.91	10.89	16.91	23.76
3350	20.42	24.83	5.78	13.6	10.45	13.6	22.55
3400	20.72	24.46	5.88	14.14	11.23	14.14	23.62
3450	20.03	24.16	6.23	17.66	10.97	17.66	25.73
3500	20.27	23.77	5.56	14.14	10.37	14.14	22.78
3550	20.12	23.65	5.42	13.57	10.18	13.57	21.87
3600	19.24	23.34	6.08	19.1	9.51	19.1	24.68
3650	18.97	23.07	5.63	16.65	9.37	16.65	20.92
3700	18.87	22.58	5.31	18.84	8.71	17.5	18.24
3750	18.59	22.09	5.5	26.53	8.79	19.17	24.53
3800	18.15	21.81	5.31	17.56	8.47	15.84	29.39
PROMEDIO	19.6163636	23.5381818	5.69909091	17.1545455	9.90363636	16.2072727	23.4609091

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T12 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.52	24.37	6.09	16.15	10.38	16.15	22.28
3350	20.6	23.68	5.77	12.93	10.26	12.93	21.95
3400	20.87	23.23	5.89	13.01	10.81	13.01	22.74
3450	20.77	23.04	6.23	15.42	10.75	15.42	27.18
3500	20.87	22.23	5.5	13.55	10.3	13.55	23.72
3550	20.72	21.92	5.4	12.88	10.24	12.88	22.67
3600	19.75	21.64	6.07	17.02	9.59	17.02	23.67
3650	19.42	21.6	5.58	15.51	9.43	15.51	22.55
3700	19.34	21.61	5.21	18.44	8.45	17.42	20.36
3750	19.01	21.38	5.44	18.77	7.72	13.95	23.22
3800	18.59	21.5	5.2	15.23	6.58	15.23	22.42
PROMEDIO	20.0418182	22.3818182	5.67090909	15.3554545	9.50090909	14.8245455	22.9781818

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.30: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T12 TH-30

Polarización N45 Tilt 02 Service Beam -30°

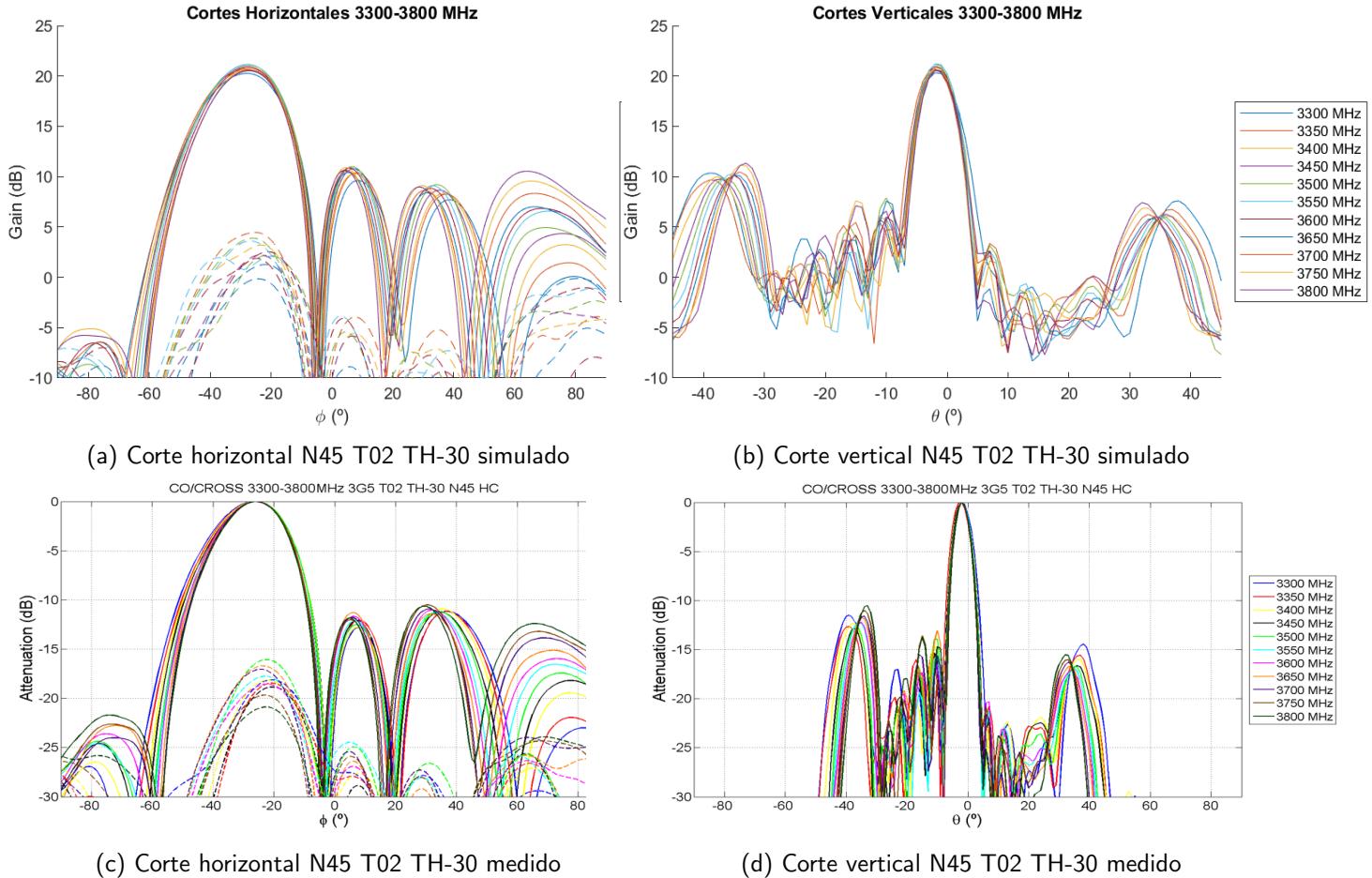


Figura B.31: Comparación cortes polarización -45 Tilt 02 Service Beam -30°

3G5 N45 T02 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.25	24.55	5.82	22.59	11.15	22.59	19.17
3350	20.49	24.04	5.66	20.78	11.17	20.78	19.3
3400	20.66	23.8	5.67	22.3	10.9	22.3	18.61
3450	20.56	23.39	5.56	22.08	11.23	22.08	19.68
3500	20.83	22.87	5.29	21.19	11.17	21.19	16.45
3550	20.77	22.54	5.31	21.2	11.29	21.2	18.02
3600	20.68	22.77	5.26	20.31	11.03	20.31	18.87
3650	20.43	22.42	5.09	22.87	11.28	22.87	16.87
3700	20.47	21.98	5.1	21.6	10.93	21.6	17.13
3750	20.63	21.59	5.02	20.86	10.5	20.86	19.92
3800	20.43	21.37	4.97	25.11	10.66	23.78	21.15
PROMEDIO	20.5636364	22.8472727	5.34090909	21.8990909	11.0281818	21.7781818	18.6518182

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T02 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.33	24.95	5.88	21.27	10.65	21.27	19.36
3350	20.74	24.69	5.72	17.37	10.28	17.37	19.84
3400	20.64	24.36	5.7	18.99	10.27	18.99	19.12
3450	20.97	23.93	5.53	18.36	10.12	18.36	20.39
3500	21.19	23.63	5.25	18.02	10.1	18.02	16.69
3550	21.22	22.83	5.32	18.56	10.27	18.56	18.51
3600	20.87	22.88	5.22	18.26	9.97	18.26	18.94
3650	20.66	22.31	5.16	21.79	10.17	21.79	16.72
3700	20.68	22.25	5.05	18.53	10.03	18.53	16.99
3750	20.87	21.75	5	19.23	9.95	19.23	19.15
3800	20.55	22.26	5.09	22.83	9.86	22.83	20.85
PROMEDIO	20.7927273	23.2581818	5.35636364	19.3827273	10.1518182	19.3827273	18.7781818

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.32: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T02 TH-30

Polarización N45 Tilt 07 Service Beam -30°

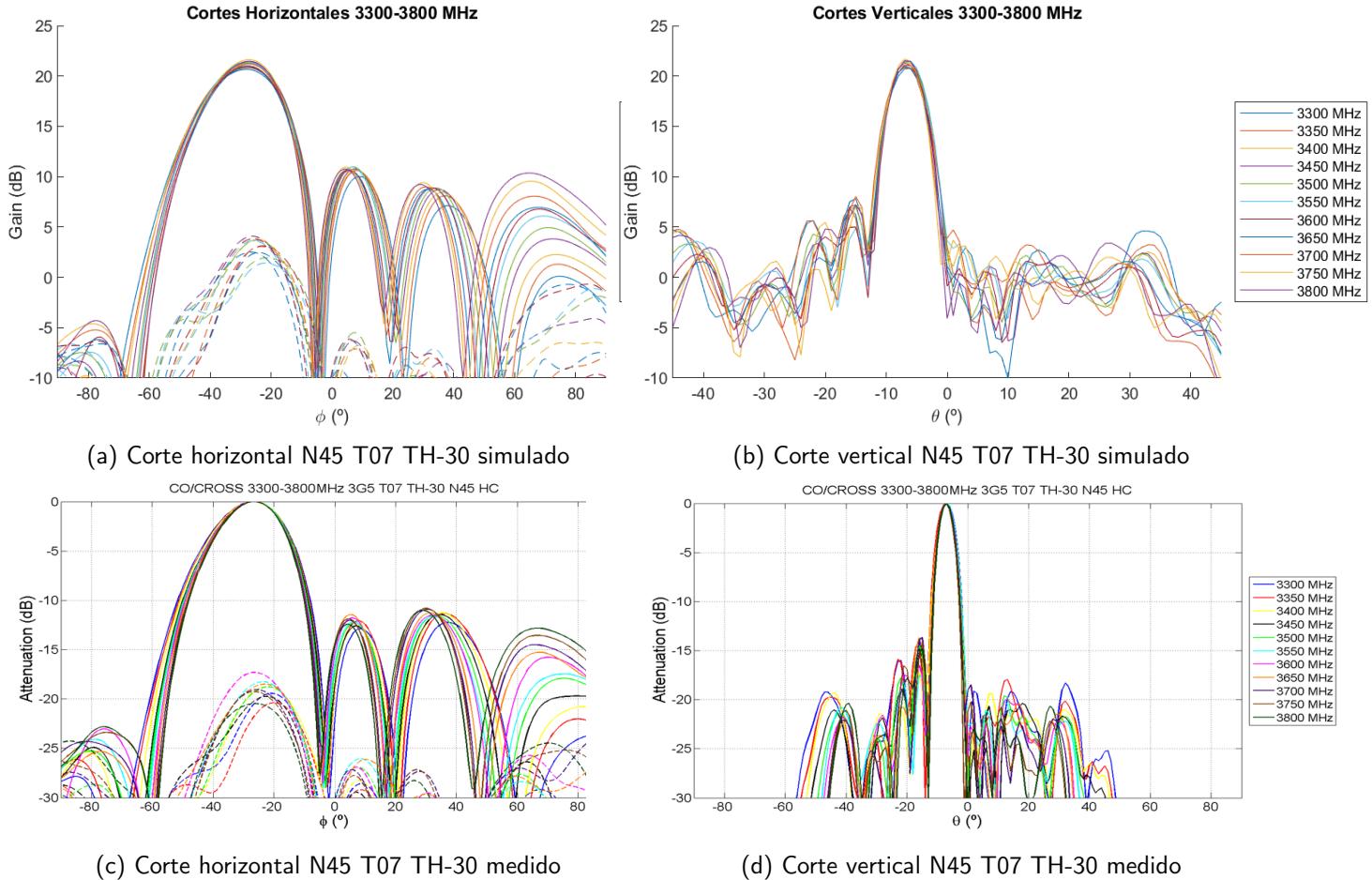


Figura B.33: Comparación cortes polarización -45 Tilt 07 Service Beam -30°

3G5 N45 T07 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.34	25.08	6.04	19.58	11.1	19.58	28.08
3350	20.44	24.33	5.95	15.95	10.7	15.95	25.49
3400	20.9	23.94	5.77	16.15	10.62	16.15	23.53
3450	20.39	23.44	6.01	24.61	10.52	22.6	26.04
3500	20.56	23.28	5.6	18.56	10.4	18.56	26.32
3550	20.61	23.15	5.42	17.03	9.94	17.03	23.77
3600	19.79	23.18	5.95	30.64	9.66	30.64	21.86
3650	19.68	22.63	5.51	21.12	9.62	21.12	21.68
3700	19.88	22.53	5.03	14.92	9.12	14.92	20.39
3750	19.84	22.19	5.41	21.88	9.14	21.41	22.17
3800	19.71	21.85	5.33	18.31	9.32	18.31	24.45
PROMEDIO	20.194555	23.2363636	5.63818182	19.8863636	10.0127273	19.6609091	23.98

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T07 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.7	25.45	5.77	17.81	10.65	17.81	19.77
3350	20.86	24.82	5.84	20.49	10.2	20.49	20.47
3400	21.06	24.57	5.71	17.94	10.33	17.94	18.69
3450	21.45	23.61	5.53	22	10.63	20.35	19.46
3500	21.35	23.39	5.56	22.31	10.3	22.31	18.91
3550	21.47	23.01	5.47	18.21	10.45	18.21	18.04
3600	21.09	22.86	5.4	20.19	10.37	20.19	17.03
3650	20.98	22.48	5.34	23.66	10.21	23.66	17.58
3700	21.3	22.26	5.04	16.57	10.53	16.57	17.61
3750	21.69	22.02	4.86	18	10.68	18	17.82
3800	21.53	21.8	5.09	21.16	10.71	21.03	18.97
PROMEDIO	21.2254545	23.2972727	5.41909091	19.8490909	10.46	19.6872727	18.5772727

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.34: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T07 TH-30

Polarización N45 Tilt 12 Service Beam -30°

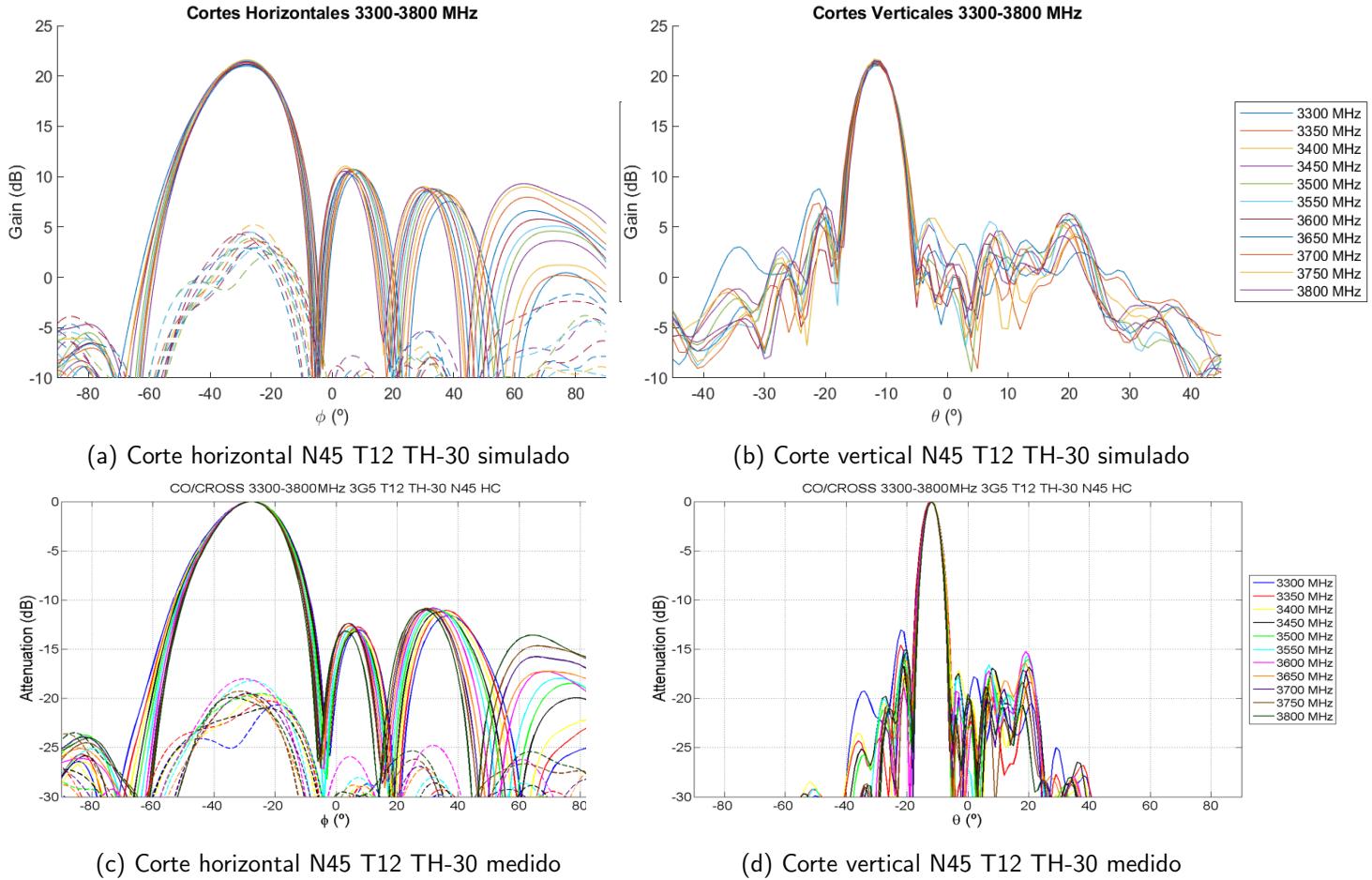


Figura B.35: Comparación cortes polarización -45 Tilt 12 Service Beam -30°

3G5 N45 T12 TH-30 Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	20.96	25.45	5.92	19.9	11.58	17.8	23.07
3350	20.92	24.85	6.1	22.31	11.07	22.31	20.89
3400	21.11	24.65	5.87	17.17	11.28	17.17	20.03
3450	20.81	24.53	5.8	17.48	11.19	17.48	21.24
3500	20.84	24.21	5.75	20.84	10.97	20.84	19.6
3550	20.89	24.03	5.57	17.87	10.93	17.87	18.23
3600	20.77	23.7	5.57	19.29	10.81	19.29	18.09
3650	20.64	23.43	5.49	22.68	10.93	20.82	19.84
3700	20.98	22.99	5.27	21.68	10.97	20.11	19.52
3750	21.27	22.67	5.27	23.74	10.86	19.49	19.51
3800	21.08	22.3	5.2	22	10.98	18.81	20.35
PROMEDIO	20.9336364	23.8918182	5.61909091	20.4509091	11.0518182	19.2718182	20.0336364

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T12 TH-30 Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	SL_H_max(dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	21.03	25.63	5.9	18.37	10.66	17.71	20.24
3350	21.19	24.82	6.03	20.94	10.49	20.94	18.73
3400	21.25	24.63	5.85	15.38	10.54	15.38	18.28
3450	21.53	24.33	5.68	16.3	10.74	16.3	18.71
3500	21.42	24.04	5.7	19.63	10.6	19.63	17.83
3550	21.61	23.48	5.48	15.72	10.83	15.72	16.5
3600	21.29	23.15	5.49	18	10.69	18	16.72
3650	21.19	22.67	5.45	20.67	10.86	18.69	17.3
3700	21.4	22.94	5.24	19.31	10.51	19.31	16.93
3750	21.67	22.56	5.27	21.55	10.58	19.68	17.47
3800	21.48	22.22	5.27	20.23	10.85	18.16	18.52
PROMEDIO	21.3690909	23.6790909	5.57818182	18.7363636	10.6681818	18.1381818	17.93

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.36: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T12 TH-30

Polarización P45 Tilt 02 Broadcast Beam

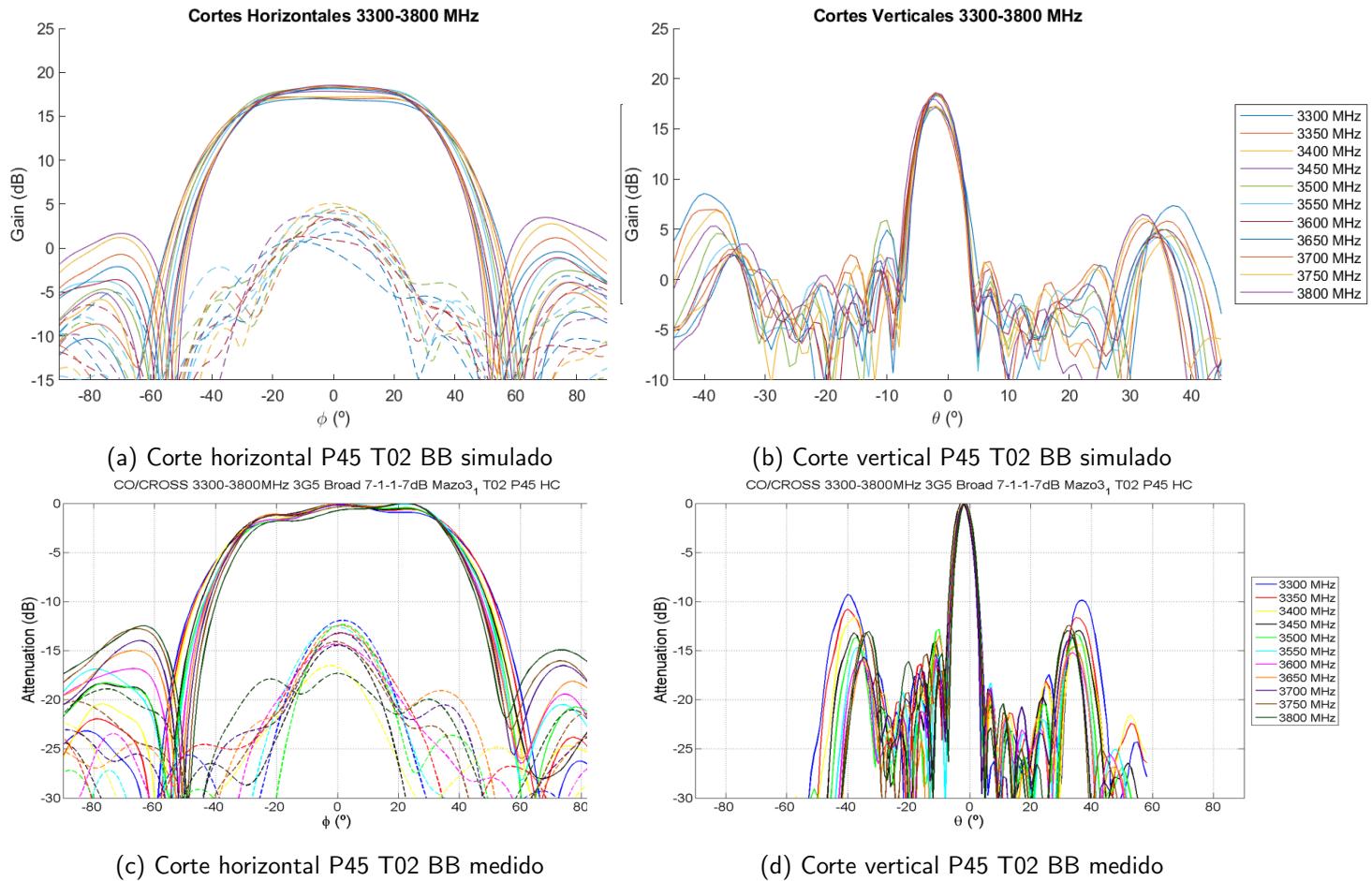


Figura B.37: Comparación cortes polarización +45 Tilt 02 Broadcast Beam

3G5 P45 T02 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	13.41	69.04	5.61	26.26	30.59	23.21	11.96
3350	13.42	70.27	5.53	19.82	34.61	19.82	13.23
3400	13.44	69.46	5.54	19.96	32.69	19.96	16.62
3450	13.36	69.35	5.53	20.57	32.71	20.57	14.44
3500	14.02	66.77	5.34	20.45	33.72	20.45	12.41
3550	13.69	68.22	5.19	18.29	35.71	18.29	12.48
3600	13.4	67.1	5.31	18.77	31.79	18.77	14.27
3650	13.3	67.58	5.18	19.34	32.76	19.34	12.43
3700	13.36	67.58	5.15	18.91	33.29	18.91	13.03
3750	13.5	66.72	5.13	19.22	31.4	19.22	13.72
3800	13.64	63.88	5.02	22.87	34.57	20.4	16.58
PROMEDIO	13.5036364	67.8154545	5.32090909	20.4054545	33.0763636	19.9036364	13.7427273

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T02 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.15	69.36	5.65	22.61	27.17	22.61	13.54
3350	17.25	71.09	5.53	18	29.02	18	14.73
3400	17.31	69.55	5.78	19.34	24.17	19.34	17.83
3450	17.95	65.29	5.77	18.9	35.56	18.9	16.26
3500	18.52	63.99	5.18	18.7	32.19	18.7	14.37
3550	18.32	63.73	5.18	17.95	29.63	17.95	13.04
3600	18.49	58.53	5.26	17.42	31.58	17.42	15.29
3650	18.37	58.36	5.22	19.59	35.67	19.59	14.83
3700	18.63	57.55	4.97	16.84	31.55	16.84	15.48
3750	18.47	58.91	4.93	16.71	30.39	16.71	15.02
3800	18.58	57.36	5.09	20.19	33.71	20.19	18.9
PROMEDIO	18.0945455	63.0654545	5.32363636	18.75	30.9672727	18.75	15.39

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.38: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T02 BB

Polarización P45 *Tilt 07 Broadcast Beam BB*

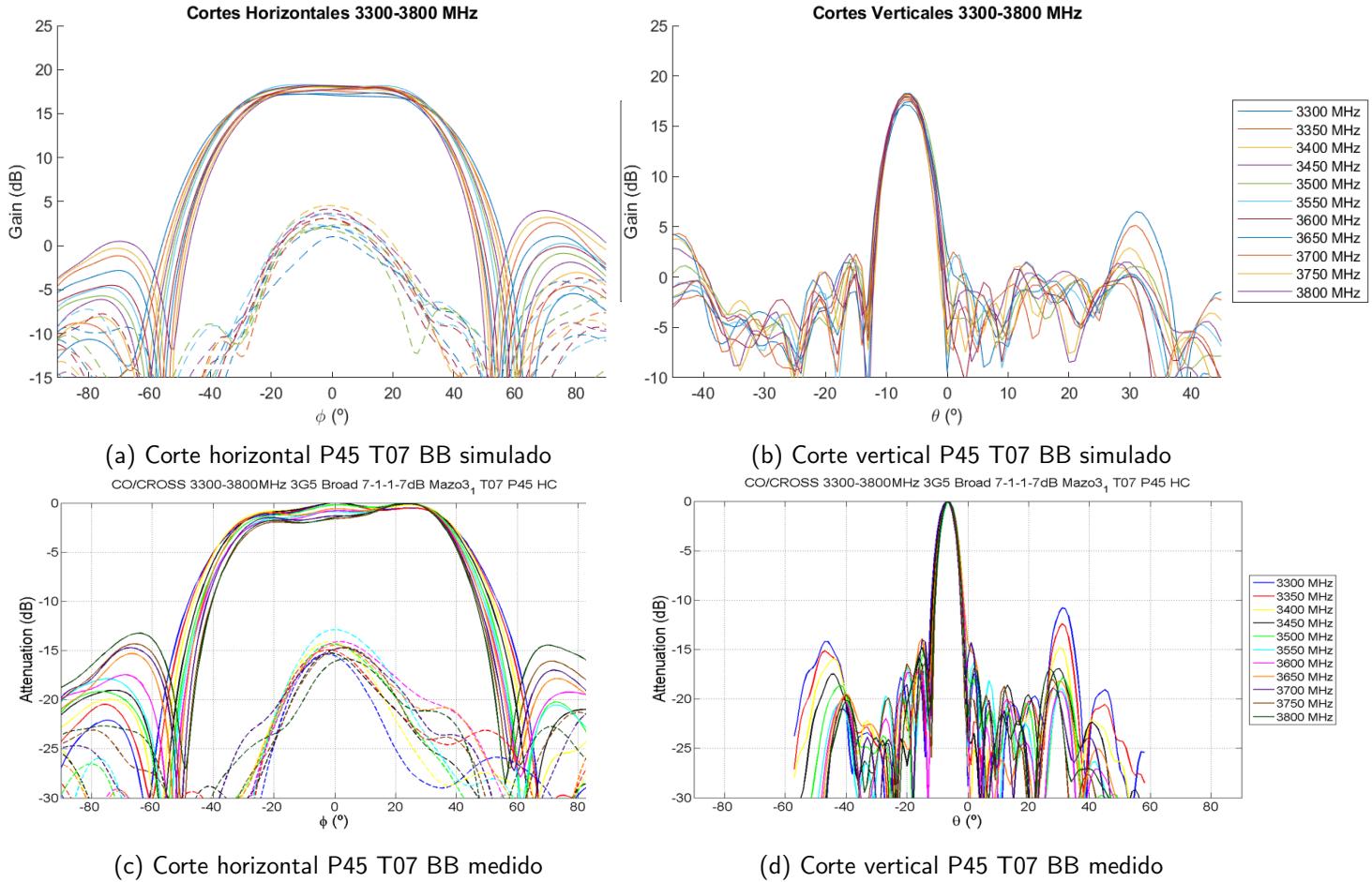


Figura B.39: Comparación cortes polarización +45 *Tilt 07 Broadcast Beam*

3G5 P45 T07 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	13.41	75.08	6.1	17.46	32.24	17.46	15.54
3350	13.37	75.28	6	22.29	30.71	22.29	15.04
3400	13.63	75.72	5.73	25.09	30.26	24.67	14.15
3450	13.34	73.53	5.63	23.5	38.35	21.12	15.32
3500	13.57	71.6	5.48	17.98	37.52	17.98	14.14
3550	13.98	69.19	5.15	16.3	31.9	16.3	12
3600	13.39	68.44	5.66	32.24	32.59	22.79	13.38
3650	12.87	71.44	5.66	26.18	33.89	26.18	13.87
3700	13.78	68.56	4.99	14.29	35.87	14.29	13.54
3750	13.89	65.66	5.04	19.95	38.29	18.72	13.29
3800	13.72	66.14	5.31	16.9	31.17	16.9	14.64
PROMEDIO	13.5409091	70.9672727	5.52272727	21.1072727	33.89	19.8818182	14.0827273

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T07 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.14	72.87	5.99	16.76	30.41	16.76	15.93
3350	17.61	68.5	5.84	20.55	28.49	20.55	15.23
3400	18.02	68.19	5.52	18.02	32.02	18.02	15.02
3450	18.24	66.12	5.51	20.53	36.48	20.53	16.22
3500	18.11	65.72	5.68	22.3	26.31	21.61	15.17
3550	18.26	64.96	5.33	16.05	22.51	16.05	14.53
3600	18.24	60.8	5.5	18.74	28.97	18.74	14.56
3650	17.37	63.15	5.71	18.72	27.69	17.71	17.19
3700	17.87	61.31	5.14	15.36	28.98	15.36	16.94
3750	17.99	59.6	5.12	21.13	29.51	19.75	16.94
3800	17.95	58.86	5.28	19.21	24.95	17.14	18.74
PROMEDIO	17.8909091	64.5527273	5.51090909	18.8518182	28.7563636	18.3836364	16.0427273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.40: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T07 BB

Polarización P45 Tilt 12 Broadcast Beam

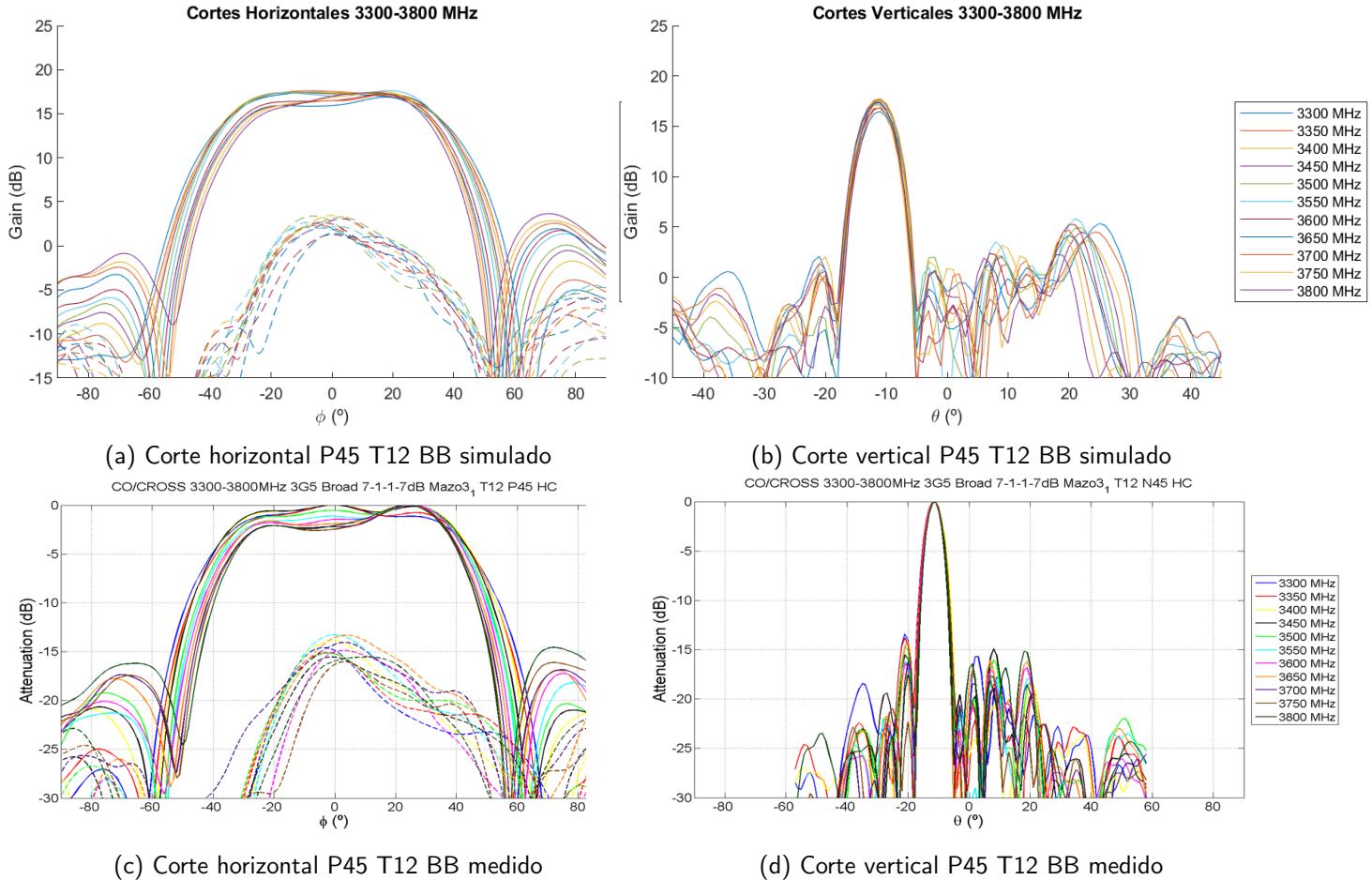


Figura B.41: Comparación cortes polarización +45 Tilt 12 Broadcast Beam

3G5 P45 T12 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	13.55	74.73	5.94	17.22	30.42	17.22	14.91
3350	13.38	73.97	6.02	17.44	29.17	17.44	15.22
3400	13.3	76.71	5.96	17.81	35.39	17.81	13.9
3450	12.76	76.48	5.93	17.59	34.66	17.59	15.56
3500	13.21	73.29	5.42	14.33	34.09	14.33	14.71
3550	13.38	71.11	5.23	14.89	31.54	14.89	12.15
3600	13.03	69.94	5.67	18.89	43.02	18.89	13.56
3650	12.94	68.73	5.51	18.45	33.01	18.45	11.66
3700	13.31	66.46	5.16	21.04	31.56	18.75	12.04
3750	13.45	65.74	5.23	23.91	34.32	16.51	13.86
3800	13.37	65.31	5.24	18.23	31.47	17.89	13.85
PROMEDIO	13.2436364	71.1336364	5.57363636	18.1636364	33.5136364	17.2518182	13.7654545

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 P45 T12 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dB)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.43	69.85	5.89	16.75	31.27	16.75	14.05
3350	17.59	67.69	5.93	17.11	30.52	17.11	14.95
3400	17.5	70.15	5.71	16.09	29.84	16.09	16.16
3450	17.37	69.57	5.72	16.79	25.31	16.79	17.01
3500	17.39	68.53	5.66	15.55	24.48	15.55	15.57
3550	17.18	67.17	5.47	16.2	28.64	16.2	17.88
3600	16.75	64.2	5.58	22.59	26.05	14.43	16.83
3650	16.25	63.52	5.42	17.63	27	15.19	15.98
3700	16.65	61.51	5.28	20.17	28.3	16.52	17.32
3750	17.1	58.27	5.26	24.59	25.11	16.19	17.19
3800	17.26	56	5.31	19.19	24.33	15.47	16.35
PROMEDIO	17.1336364	65.1327273	5.56636364	18.4236364	27.35	16.0263636	16.2990909

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.42: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación P45 T12 BB

Polarización N45 Tilt 02 Broadcast Beam

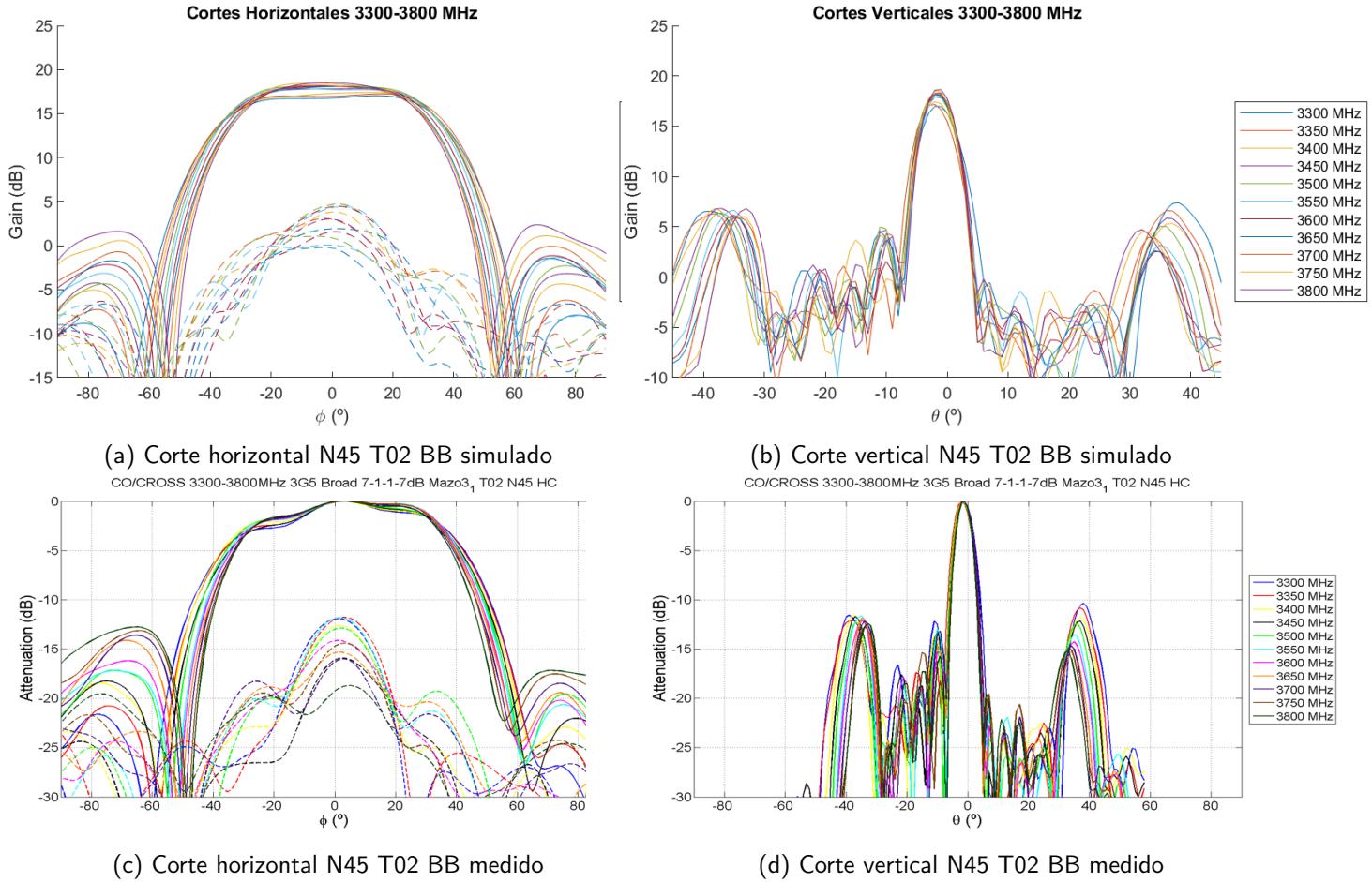


Figura B.43: Comparación cortes polarización -45 Tilt 02 Broadcast Beam

3G5 N45 T02 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	13.85	64.74	5.72	23.42	30.29	23.42	11.87
3350	13.91	66.26	5.8	25.22	28.06	25.22	11.93
3400	13.85	67.35	5.65	22.92	35.76	22.92	12.64
3450	13.63	63.28	5.64	27.51	40.27	24.06	16.03
3500	13.83	65.82	5.43	24.14	30.09	24.14	12.9
3550	13.79	66.04	5.18	21.58	35.83	21.58	11.79
3600	13.62	64.83	5.35	22.76	33.98	22.76	14.1
3650	13.31	63.6	5.37	19.78	31.52	19.78	15.32
3700	13.45	62.86	5.21	20.29	32.31	20.29	16.23
3750	13.67	63.55	5.08	19.55	37.95	19.55	14.63
3800	13.74	62.24	5.01	19.57	34.37	19.57	19.24
PROMEDIO	13.6954545	64.5972727	5.40363636	22.4309091	33.6754545	22.1172727	14.2436364

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T02 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	16.99	71.67	5.93	21.4	28.52	21.4	15.68
3350	17.17	72.26	5.86	21.15	23.36	21.58	15.37
3400	17.44	69.54	5.7	22.87	26.86	22.87	14.27
3450	17.93	67.13	5.72	25.13	30.1	23.44	16.11
3500	18.25	66.21	5.36	20.9	32.6	20.9	15.05
3550	17.94	66.48	5.28	21.62	24.74	19.37	16.89
3600	18.25	62.32	5.37	21.5	32.12	21.5	15.17
3650	18.14	60.06	5.3	18.66	38.11	18.66	17.53
3700	18.27	58.26	5.22	20.68	31.71	20.68	18.2
3750	18.53	57.67	5.12	19.18	30.41	19.18	17.56
3800	18.59	55.48	5.01	18.81	31.58	18.81	18.71
PROMEDIO	17.9545455	64.28	5.44272727	21.0818182	30.01	20.7627273	16.4127273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.44: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T02 BB

Polarización N45 Tilt 07 Broadcast Beam

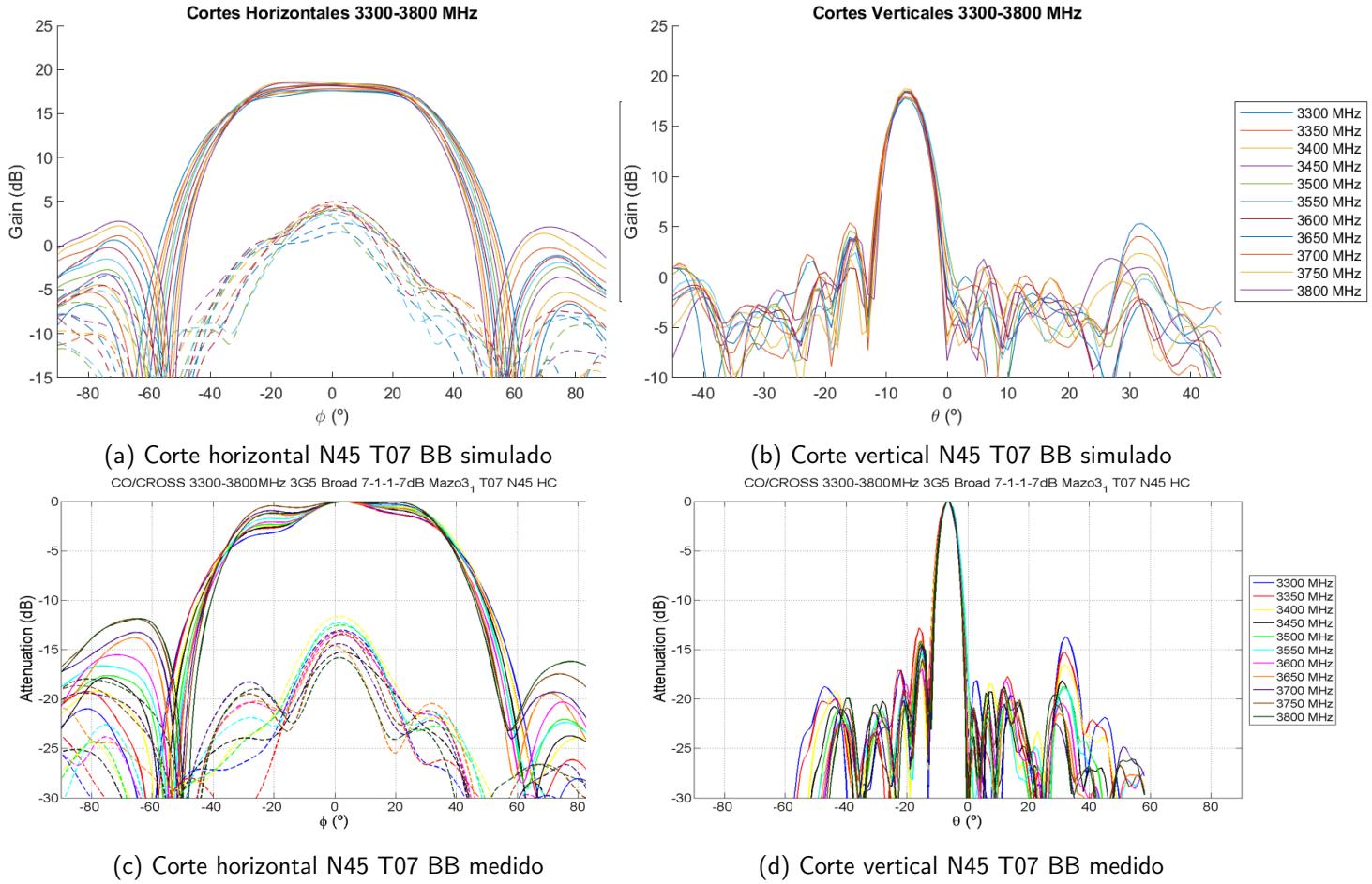


Figura B.45: Comparación cortes polarización -45 Tilt 07 Broadcast Beam

3G5 N45 T07 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	14.58	52.6	5.81	18.12	32.58	18.12	13.1
3350	14.43	62.77	5.84	17.71	32.64	17.71	13.25
3400	14.36	66.45	5.9	18.51	42.64	18.51	11.59
3450	14.31	62.84	5.47	21.22	34.48	19.28	15.31
3500	14.18	65.06	5.6	21.28	32.36	21.28	12.5
3550	14.09	66.88	5.64	22.04	34.09	20.76	12.24
3600	13.93	63.79	5.47	24.88	30.67	18.27	13.48
3650	13.47	66.83	5.4	25.01	28.31	22.57	14.52
3700	13.63	67.49	5.35	20.94	35.29	20.94	14.44
3750	13.68	68.32	5.28	20.87	32.55	19.02	13.63
3800	13.64	65.79	5.18	23.81	27.32	18.75	15.78
PROMEDIO	14.0272727	64.4381818	5.54	21.3081818	32.9936364	19.5645455	13.6218182

(a) Tabla de datos obtenida mediante StarLab

3G5 N45 T07 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.76	70.19	5.68	17.71	34.13	17.71	13.38
3350	17.99	67.77	5.76	18.79	33.76	18.79	13.85
3400	17.82	69.64	5.8	17.96	28.85	17.96	13.33
3450	18.43	65.83	5.43	20.26	27.27	18.93	15.91
3500	18.51	64.48	5.62	20.9	32.2	20.9	14.46
3550	18.32	65.87	5.69	19.65	32.68	19.65	13.49
3600	18.36	62.57	5.51	23.12	31.2	17.23	13.73
3650	17.8	63.42	5.46	20.87	22.72	20.87	14.93
3700	18.38	61.28	5.32	21.81	31.71	19.18	14.7
3750	18.74	60.38	5.19	21.69	33.66	17.72	16.73
3800	18.4	58.9	5.14	22.66	32.03	16.63	18.25
PROMEDIO	18.2281818	64.5754545	5.50909091	20.4927273	30.9281818	18.6881818	14.7963636

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.46: Comparativa de tablas medidas en StarLab y mediante simulación N45 T07 BB

Polarización N45 Tilt 12 Broadcast Beam

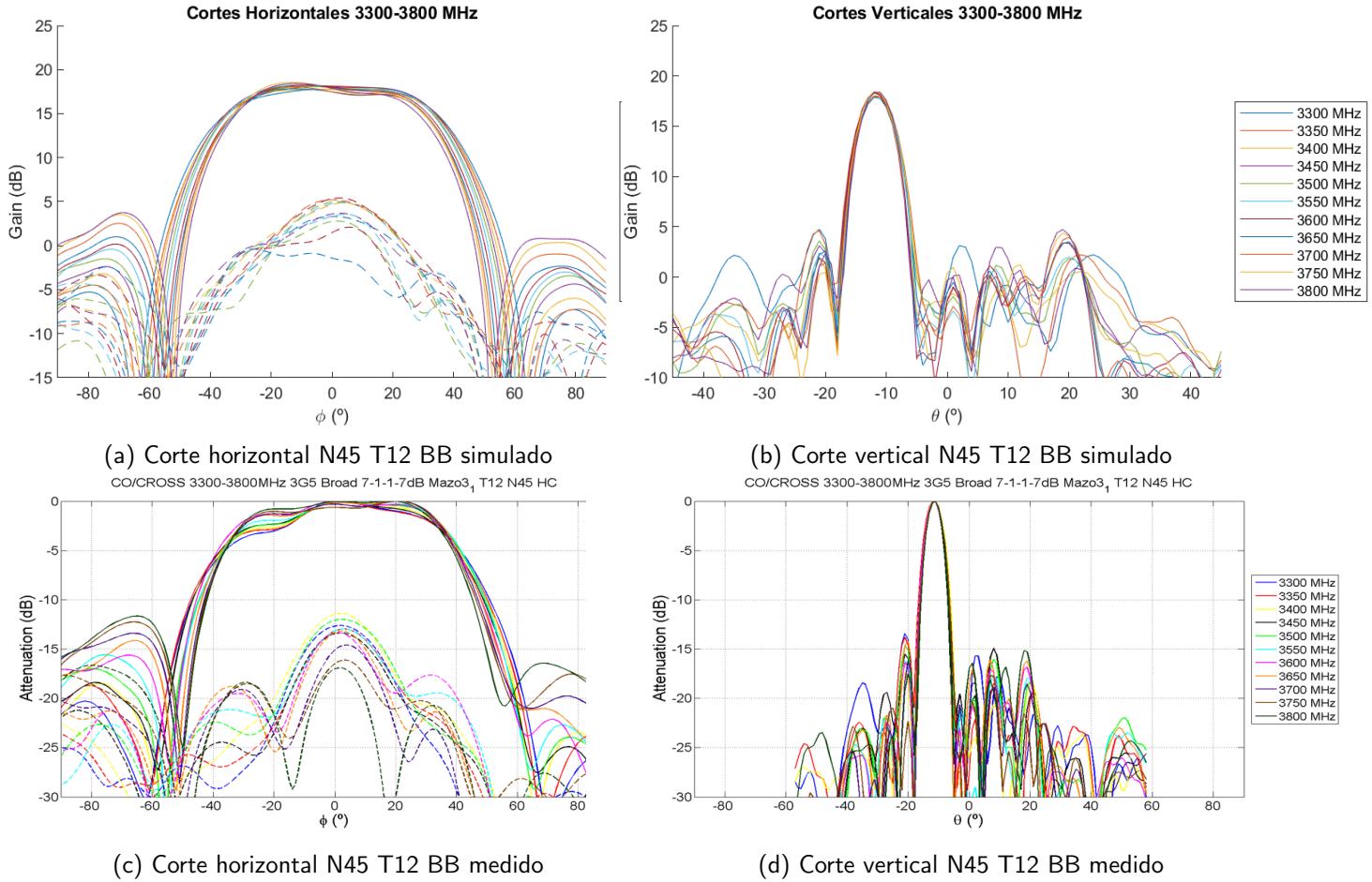


Figura B.47: Comparación cortes polarización -45 Tilt 12 Broadcast Beam

3G5 N45 T12 BB Medido							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	14.87	54.96	5.96	21.02	29.84	15.69	12.64
3350	14.76	62.04	6.13	25.47	35.02	22.12	13.15
3400	14.61	64.8	6.05	23.21	35.26	23.21	11.42
3450	14.46	65.41	5.58	19.56	30.74	19.56	13.41
3500	14.22	66.27	5.67	21.37	33.62	20.03	12.03
3550	13.93	68.15	5.73	20.84	29.3	20.84	13.13
3600	13.7	69.08	5.69	23.11	29.07	20.83	13.35
3650	13.39	68.86	5.44	27.07	31.03	16.07	13.18
3700	13.48	67.68	5.34	20.64	31.91	18.42	14.81
3750	13.73	67.36	5.5	20.33	39.3	17.69	15.86
3800	13.56	66.97	5.23	25.46	27.51	16.42	16.96
PROMEDIO	14.0645455	65.5981818	5.66545455	22.5527273	32.0545455	19.1709091	13.6309091

(a) Tabla de datos obtenida mediante ©StarLab

3G5 N45 T12 BB Simulado							
FREQ (MHz)	GAIN (dBi)	HBW (deg)	VBW (deg)	First_SL(dB)	FTB_0 (dB)	USLS20(dB)	XPD_0 (dB)
3300	17.91	70.54	5.82	20.6	30.61	14.79	13.05
3350	18.26	67.16	6.01	19.35	32.1	19.35	13.56
3400	17.96	69.15	5.92	19.62	29.61	19.62	13.05
3450	18.32	67.53	5.49	18.58	29.86	18.1	15.59
3500	18.27	66.55	5.64	20.18	27.53	20.18	13.62
3550	18.36	65.61	5.66	22.75	27.59	21.72	15.09
3600	18.35	62.51	5.49	22.61	25.34	19.31	15.73
3650	17.87	63.03	5.42	18.39	24.27	18.39	17.08
3700	18.04	62.33	5.41	22.38	24.08	20.94	16.45
3750	18.44	59.37	5.36	17.47	27.34	17.47	18.33
3800	18.37	57.16	5.3	25.88	27.58	18.28	19.53
PROMEDIO	18.1954545	64.6309091	5.5927273	20.71	27.81	18.9227273	15.5527273

(b) Tabla de datos obtenida mediante simulación

Figura B.48: Comparativa de tablas medidas en ©StarLab y mediante simulación N45 T12 BB

Bibliografía

- [1] Xakata Movil. Así fue el despliegue del 4g y lo que podemos esperar que tardará el 5g en llegar al grueso de la población española, Jun 2019.
- [2] Economía Digital. El estado de la conectividad 4g en la antesala de la era 5g, May 2019.
- [3] Jessica Dolcourt. We tested 5g speeds across the globe, Jul 2019.
- [4] 20minutos.es. Samsung prueba con éxito la tecnología 5g con una velocidad de hasta 1 gbps, May 2013.
- [5] Sabine Dahmen-Lhuissier. Mobile technologies - 5g, 5g specs: Future technology, Apr 2019.
- [6] Thales. Presentando la tecnología y redes 5g (definición, características, 5g vs 4g y casos de uso).
- [7] Signals IoT. El impacto de 5g en las comunicaciones críticas, Oct 2019.
- [8] Cármen Baroja. *Fractus Base Station Antenna Trainning Course 1*, page 10–12. 2008.
- [9] Contributors to Wikimedia projects. method for multiplexing signals, Jul 2019.
- [10] Jaume Anguera and Antonio Pérez. *Teoria de Antenas, LaSalle*. 2010.
- [11] Christian de Looper. What is 5g? the next-generation network fully explained, Nov 2020.
- [12] Turismo y Agenda Digital Ministerio de Energía. Plan nacional 5g, May 2018.
- [13] Heejung Yu, Howon Lee, and Hongbeom Jeon. What is 5g? emerging 5g mobile services and network requirements. *Sustainability*, 9(10):1848, Oct 2017.
- [14] Thales. What is the difference between 4g and 5g?, Nov 2020.
- [15] George Koroneos. Customers in chicago and minneapolis are first in the world to get 5g-enabled smartphones connected to a 5g network, Apr 2019.
- [16] Richard Griffiths. The wonders of 5g beamforming, Aug 2020.
- [17] Canal Historia. Primera transmisión a través del atlántico, May 2016.
- [18] Metaswitch. What is 5g beamforming, beam steering and beam switching with massive mimo.
- [19] Matti Passoja. 5g nr: Massive mimo and beamforming – what does it mean, Oct 2018.
- [20] Huawei Technologies Co., 2019.
- [21] Jon Mudy. What is massive mimo technology?, Nov 2019.

- [22] Juan Carlos López. Massive mimo: las dos palabras clave para entender qué va a ser el 5g, Jun 2019.
- [23] Ángel Cardama Aznar and LLuís Jofre Roca. *Capítulo 1. Consideraciones Generales sobre antenas*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [24] Ángel Cardama Aznar and LLuís Jofre Roca. *Capítulo 5. Agrupaciones de Antenas*, page 171–172. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [25] Miguel Ferrando and Alejandro Valero. *Agrupaciones de Antenas. Departamento Comunicaciones UPV*, page 1–3.
- [26] Manuel Sierra Pérez. *Análisis de agrupaciones lineales UPM*.
- [27] Antonio Bonafonte. *Transformada de Fourier*, page 22–43. 2008.
- [28] Wikipedia. Conversión analógica-digital, Sep 2020.
- [29] Ángel Cardama Aznar and LLuís Jofre Roca. *Capítulo 5.2. Campos radiados por agrupaciones*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [30] Ángel Cardama Aznar and LLuís Jofre Roca. *Capítulo 5.3. Diagrama de radiación de agrupaciones*. Universidad Politécnica de Cataluña, 2013.
- [31] André F.A. Fournier. *BASTA (Base Station Antenna Standards)*. NGMN Board, 2019.