

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE PATRONES DE
RADIACIÓN DE ANTENAS EN EL CAMPO CERCANO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

FRANCO ANTONIO COLLEONI VILLAGRAN

PROFESOR GUÍA:

FAUSTO PATRICIO MENA

MIEMBROS DE LA COMISION

PABLO ASTUDILLO ALVARADO

PABLO ZORZI AVENDANO

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: FRANCO COLLEONI
FECHA: 28/9/2020
PROF.GUÍA: Sr. PATRICIO MENA

“DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE PATRONES DE
RADIACION DE ANTENAS EN EL CAMPO CERCANO”

Las antenas de radiofrecuencia son elementos fundamentales en la vida actual de la sociedad, ya que permiten acoplar a distancia señales y sistemas que se encuentran separados físicamente (la mayoría de las veces por distancias muy lejanas). Una antena posee muchas características importantes que describen su funcionamiento, entre las cuales tiene particular importancia el patrón de radiación, ya que éste entrega las características tanto de transmisión como de recepción, en función de la posición angular de la antena. Los métodos directos para medir este patrón de radiación, son en general poco eficientes e imprecisos a medida que aumenta la frecuencia, ya que en estos casos se requiere de mayor precisión y resolución en su caracterización, con el objetivo de transmitir y recibir correctamente las señales a comunicar. Entonces, métodos alternativos, como el de rango compacto o medidas en campo cercano, se hacen más necesarios.

En esta memoria se pretende diseñar e implementar un sistema automático de medición de patrones de radiación de antenas, utilizando el campo cercano de éstas. En particular, el sistema se quiere utilizar en la caracterización de antenas directivas funcionando en las bandas milimétricas y sub-milimétrica del espectro electromagnético. El sistema a implementar debiera ser capaz de medir de forma automática el campo electromagnético de la antena en la región de campo cercano de ésta, y luego procesar estas medidas para convertirlas al patrón de campo lejano. Para ello se desarrollará un software capaz de manejar un posicionador mecánico que mueve una antena de medición, y que es la que recibe el campo de la antena a caracterizar. Este software se coordina con el dispositivo que registra los campos captados por la antena de medición, en amplitud y fase (en este caso un analizador vectorial de redes). Además, el software toma estas medidas y las procesa para obtener el patrón de campo lejano.

Éste instrumento ha de formar parte del Laboratorio de Ondas Milimétricas, que se está implementando en el Departamento de Astronomía de la Universidad (en Cerro Calán). Y como motivación principal, es necesario mencionar que uno de los proyectos en los que actualmente está involucrado el Departamento, es la fabricación de un receptor prototipo para la banda 1 de ALMA (Atacama Large Millimeter Array), el mayor proyecto astronómico de radioastronomía milimétrica en el mundo, actualmente en funcionamiento en el norte del país. Este receptor tiene entre sus componentes una antena horn, la cual debe caracterizarse con precisión para poder ser integrada con éxito al receptor. La caracterización de esta antena se hará con el sistema a diseñar, por lo que el tema de memoria tiene un objetivo real y concreto, formando parte del plan de desarrollo de la instrumentación astronómica en el país.

Dedicado a mi estimado profesor y mentor, Jorge May.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo	1
1.2 ALMA y su Banda 1.....	1
1.3 Estructura de esta memoria.....	5
2. Marco Teórico y Objetivos del Trabajo de Memoria.....	7
2.1 Teoría básica de ondas electromagnéticas y antenas.....	7
2.1.1 Ecuaciones de Maxwell.....	7
2.1.2 Ondas electromagnéticas	8
2.1.3 Polarización de ondas	9
2.1.4 Reflexión y refracción de ondas	9
2.2 Conceptos básicos de Antenas.....	11
2.2.1 Patrón de radiación	11
2.2.2 Regiones de campo.....	12
2.2.3 Directividad	13
2.2.4 Ganancia	13
2.2.5 Apertura efectiva	13
2.2.6 Teorema de reciprocidad	14
2.3 Características antena tipo bocina (horn)	14
2.3 Métodos para medir el patrón de radiación	16
2.3.1 Métodos de campo lejano	16
2.3.2 Métodos de campo cercano	19
2.4 Teoría de Transformación Planar Near-Field a Far Field.....	21
2.5 Aspectos prácticos de las mediciones de tipo planar en campo cercano.....	25
2.5.1 Parámetros para el muestreo del plano	25
2.6 Descripción del proyecto a realizar	28
2.6.1 Diseño del setup mecánico	29
2.6.2 Diseño del sistema de control y medición.....	29
2.6.3 Diseño del software de post-procesamiento	30
2.6.4 Pruebas experimentales	30
2.7 Alcance y aporte del tema de memoria	30
2.7.1 Implementación Laboratorio Ondas Milimétricas.....	30
2.7.2 Alcance del trabajo	31
3. Diseño e implementación del sistema de medición en campo cercano.....	31

3.1	Diseño mecánico y componentes de RF.....	31
3.1.1	Scanner (Posicionador mecánico)	32
3.1.2	Antena Probe	35
3.1.3	Fuentes y receptores de señal	37
3.1.4	Sistemas de soporte, montaje y absorbentes.....	39
3.2	Diseño sistema de control.....	43
3.3	Diseño software post- procesamiento.....	45
4.	Análisis y resultados experimentales del sistema.....	55
4.1	Resultados medición horn piramidal	55
4.2	Resultados medición horn circular	59
4.2.1	Medidas de Amplitud	60
4.2.2	Medidas de fase	61
4.3	Medida del lente + horn.....	63
5.	Conclusiones.....	68
6.	BIBLIOGRAFIA	69
7.	ANEXOS	71
7.1	MANUAL DE USO “BEAM SCANNER”	71

1. Introducción

El presente documento contiene el desarrollo del trabajo de título “Diseño e implementación de un sistema de medición de patrones de radiación de antenas en el campo cercano”.

1.1 Objetivo

El objetivo del trabajo consiste en el diseño y la implementación, de un sistema automático de medición de patrones de radiación de antenas, operando en el campo cercano (o near-field) de estas.

1.2 ALMA y su Banda 1

El proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter Array), es actualmente el mayor proyecto de radioastronomía en el mundo, tanto en recursos involucrados como en los objetivos científicos a alcanzar.

ALMA consiste en un arreglo de 66 radiotelescopios, las cuales se encuentran en el plano de Chajnantor, en el norte de Chile. El objetivo es realizar mediciones de interferometría con una resolución de algunos segundos de grado, características que lo hace muy superior a cualquier sistema de radiotelescopios implementado anteriormente. Actualmente, se encuentra en plena operación, y realizando significativas contribuciones a la investigación astronómica.



Figura 1. Radiotelescopios de ALMA [1].



Figura 2. Antenas ALMA [1].

El rango de frecuencias en que ALMA funcionará se extiende desde los 31.5GHz, hasta los 950 GHz. Este rango se divide en 10 bandas, donde cada una medirá distintos aspectos, y por tanto, se desarrolla un sistema de procesamiento para cada banda. Un esquema típico de *front-end* (o interface de entrada) se muestra en la fig. 3.

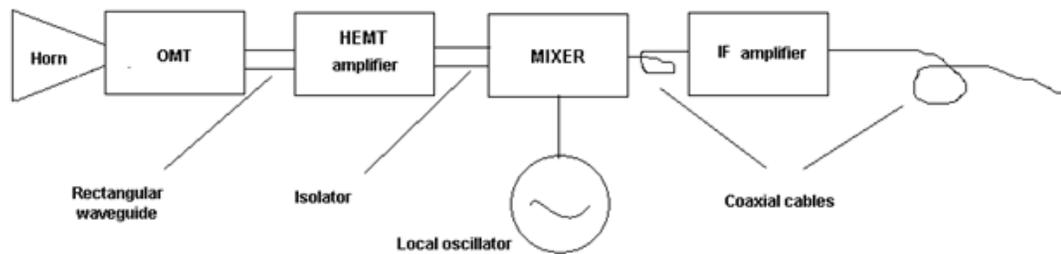


Figura 3. Front-end típico de un receptor radioastronómico.

El Grupo de Instrumentación Astronómica, de los Departamentos de Ingeniería Eléctrica y Astronomía de la Universidad de Chile está realizando un prototipo del receptor para la Banda 1 de ALMA, el cual tiene las características presentadas en la **Tabla I**.

Rango de frecuencia	31-45 GHz
Temperatura de ruido (80% de la banda)	17K
Temperatura de ruido (100% de la banda)	28K
Nivel de polarización cruzada	>24 dB
Rechazo de imagen (radio)	>10 dB
Tecnología de detección	HEMT
Oscilador Local (Frecuencia)	27-31 GHz
Oscilador Local (Potencia)	15 mW (max.)
Frecuencia Intermedia	4-12 GHz
Esquema de mezcla	Banda lateral superior

Tabla I. Especificaciones Banda 1 ALMA.

Todos los receptores de ALMA están físicamente dentro de un cartucho (*cartridge*), el cual a su vez va en un tambor junto a los cartuchos de las otras bandas. Este tambor se ubica en el foco (o sub-foco, dependiendo de la antena) del radiotelescopio. Las figuras 4,5 y 6 ilustran los términos anteriores.



Figura 4. Cartucho conteniendo un front-end típico [2].



Figura 5. Tambor conteniendo varios cartridge [1].



Figura 6. Radiotelescopio, con el tambor en el centro del reflector [1].

Como se indica en la figura 3, el primer componente del receptor es una antena horn. Esta antena, así como todos los componentes del receptor, han de estar caracterizados cuidadosamente, ya que de no ser así, no hay seguridad que este efectivamente cumpla con las especificaciones requeridas. Se debe tener en cuenta que las señales recibidas por los radiotelescopios son de muy baja intensidad, por lo que cualquier ruido, distorsiones u otros, puede provocar pérdida de información, o información incompleta/ incorrecta

Por tanto, el sistema de medición en campo cercano que se quiere diseñar en esta memoria de título, se utilizará para caracterizar con precisión los parámetros y patrones de radiación de la antena horn, que formará parte del front-end del receptor para la banda 1 de ALMA.

Así, el tema tiene una finalidad práctica y concreta, además de formar parte de un proyecto astronómico de alcance mundial, por lo que la motivación para realizar el trabajo es alta.

1.3 Estructura de esta memoria.

Cada capítulo de este documento describe una parte en particular del trabajo realizado, con el fin de llegar al objetivo planteado inicialmente.

El capítulo 2 contiene el marco teórico y los objetivos detallados del trabajo de memoria. Se presenta una introducción al tema, desde la teoría electromagnética, elementos básicos de antenas, sistemas de medición en el campo lejano y cercano, y elementos más detallados sobre la teoría de medición en campo cercano.

El capítulo 3 contiene el desarrollo del trabajo. Se presenta el diseño del sistema de medición, sus dimensiones y los elementos a considerar. También se presenta el desarrollo del sistema de control y el sistema de post- procesamiento que es el que procesa los datos obtenidos transformándolos a patrones de radiación en campo lejano y de allí calcula otros parámetros útiles.

El capítulo 4 contiene las pruebas experimentales y análisis de datos. Se muestran y analizan las principales mediciones realizadas con el sistema (antena piramidal, antena horn, lente de microondas). Se presenta además la concordancia de las mediciones con las simulaciones, además de prácticas y consejos útiles al momento de realizar mediciones con el sistema.

El capítulo 5 contiene las conclusiones generales sobre el trabajo de memoria junto con los resultados más importantes y posibles trabajos futuros que puedan derivarse de éste trabajo.

2. Marco Teórico y Objetivos del Trabajo de Memoria

En este capítulo se dan los antecedentes necesarios para comprender adecuadamente el contexto y los objetivos del tema de memoria.

2.1 Teoría básica de ondas electromagnéticas y antenas

La teoría clásica de ondas electromagnéticas establece los fundamentos básicos, bajo los cuales se explica la propagación de campos electromagnéticos en el espacio. Se presentan algunos conceptos necesarios para el desarrollo del tema de memoria.

2.1.1 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell determinan completamente las funciones de campo eléctrico \vec{E} y campo magnético \vec{H} . En su forma diferencial e integral, corresponden a:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0\end{aligned}$$

Además, en medios materiales isótropos, lineales, homogéneos, se tiene:

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H}\end{aligned}$$

ρ : Densidad de carga eléctrica

ϵ_0 : Permisividad eléctrica del espacio libre

μ_0 : Permeabilidad magnética del espacio libre

\vec{j} : Densidad de corriente

\vec{D} : Densidad de flujo eléctrico

\vec{B} : Densidad de flujo magnético

2.1.2 Ondas electromagnéticas

Si se resuelven las ecuaciones de Maxwell en una región donde no existan fuentes de carga o corriente eléctrica ($\rho = 0$, $\vec{j} = 0$) se obtienen ondas electromagnéticas, es decir, se tienen campos eléctricos y magnéticos que se propagan por el espacio libre (u otro medio material), sin necesidad de fuentes que los originen. Estas ondas están descritas por:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0, \quad \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0$$

En medios infinitos sin pérdidas, y considerando ondas monocromáticas desplazándose en el eje z , la solución es del tipo:

$$E(x, y, z, t) = E(z) e^{j\omega t}$$

$$H(x, y, z, t) = H(z) e^{j\omega t}$$

La cual es una onda plana de frecuencia $\omega = 2\pi f$ (como se ilustra en la fig. 7), donde los campos E y H son ortogonales entre sí, y ortogonales a la dirección de propagación.

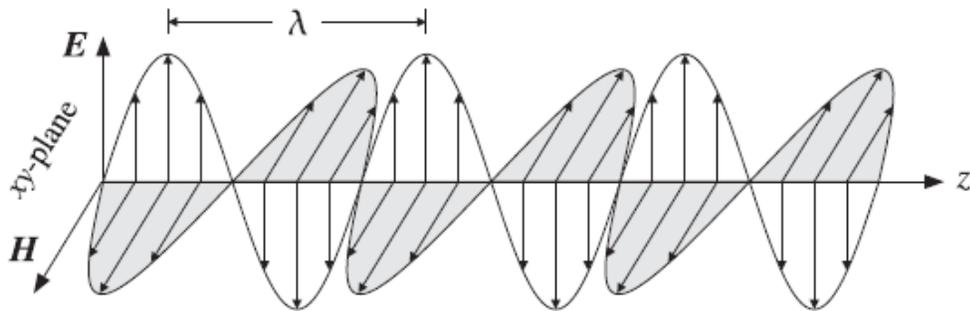


Figura 7. Onda plana de frecuencia $f=1/\lambda$ [3].

La energía contenida en las ondas electromagnéticas y la densidad del flujo de potencia se pueden calcular mediante:

$$w = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} \epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* + \frac{1}{2} \mu \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* \right]$$

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*]$$

2.1.3 Polarización de ondas

La polarización de una onda da la dirección relativa del vector \vec{E} (campo eléctrico) respecto a un plano fijo perpendicular a la dirección de propagación de la onda. En el caso de la fig. 8, si se coloca un plano fijo perpendicular a la dirección de propagación (eje z), el vector \vec{E} describirá en general una elipse y se dice entonces que el patrón general de polarización es elíptico. Como casos particulares se tendrá que el campo \vec{E} consiste en una simple línea que crece y disminuye oscilatoriamente, con la frecuencia de la onda; en este caso, se habla de polarización lineal.

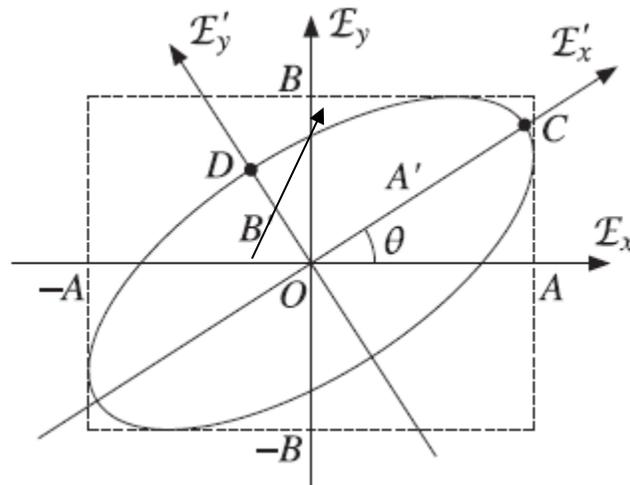


Figura 8. Polarización elíptica [3].

Conocer la polarización de la onda es de importancia práctica en la recepción mediante una antena, ya que si la antena receptora está polarizada de la misma forma que la onda incidente, la energía transmitida será máxima.

2.1.4 Reflexión y refracción de ondas

Una onda electromagnética al cambiar de medio, puede reflejarse o refractarse, siendo el caso general reflexión y refracción parcial. En la fig. 9 se representa la situación general.

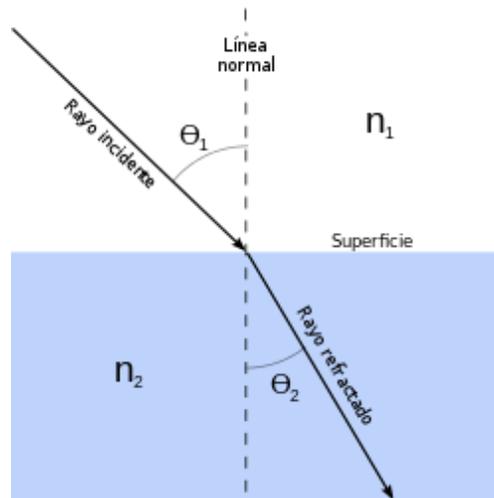


Figura 9. Reflexión y refracción de ondas [4].

Se define el índice de refracción (η) de un medio material sin pérdidas como la razón entre la velocidad de la luz, y la velocidad de una onda en tal medio:

$$\eta = c/v$$

Dado lo anterior, se puede demostrar que en general:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

Si además, se define el coeficiente de reflexión en el eje z:

$$\Gamma(z) = \frac{E_-(z)}{E_+(z)}$$

Y la impedancia de onda como:

$$Z(z) = \frac{E(z)}{H(z)}$$

Se tiene:

$$\Gamma = \frac{Z - \eta}{Z + \eta}$$

2.2 Conceptos básicos de Antenas

Una antena es una interfaz entre un conductor de ondas electromagnéticas y el espacio libre. Dependiendo del material que la constituye, su geometría y dimensiones, la radiación (o recepción) de ondas se realiza de forma diferente. A continuación, se presentan algunos conceptos básicos.

2.2.1 Patrón de radiación

Una antena radia con distinta intensidad en direcciones angulares distintas. Por tanto, el patrón de radiación es clave al elegir la antena para cierta aplicación. El patrón de radiación es una representación gráfica o funcional de las propiedades radiativas de una antena (la potencia radiada), en función de las coordenadas espaciales. Generalmente, estas coordenadas son sólo las angulares ((θ, φ) , en sistema esférico), ya que el patrón solo varía su intensidad de radiación con la distancia, pero no su forma (en la región de campo lejano). El patrón usualmente entrega la potencia radiada, en watts (W) o decibeles (dB, cuando se usa un patrón normalizado respecto a la máxima potencia radiada).

Usualmente, el patrón contiene un lóbulo principal, el cual es la región angular donde está contenida gran parte de la radiación de la antena, y lóbulos laterales, donde la radiación es menor en relación al lóbulo principal. También puede haber lóbulos posteriores, los cuales están en direcciones angulares opuestas al lóbulo principal. Un patrón de radiación, con sus lóbulos correspondientes, se muestra en la fig. 10.

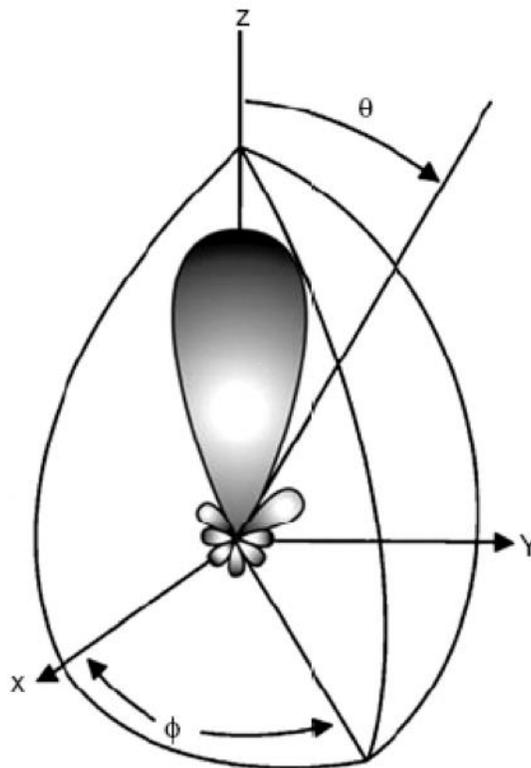


Figura 10. Patrón de radiación de una antena dipolo [3].

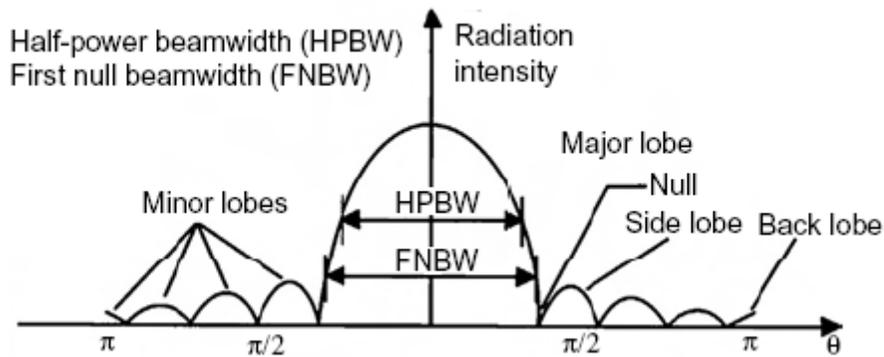


Figura 11. Patrón de radiación en función de ángulo θ [3].

La fig. 11 muestra el mismo patrón en un corte bidimensional. El término HPBW indica la zona angular donde la potencia disminuye a la mitad (-3 dB) respecto al máximo en el lóbulo principal. FNBW indica la zona donde se produce la primera zona nula (potencia nula), generalmente en la transición entre el lóbulo principal y el primer lóbulo lateral.

2.2.2 Regiones de campo

Las zonas de radiación de la antena usualmente se dividen en 3 secciones relativas, de las cuales la zona de campo lejano es la más utilizada. Estas son:

- **Zona reactiva:** zona de la antena, donde se presenta principalmente potencia reactiva (contraria a potencia radiativa).
- **Zona de Fresnel:** zona donde la potencia es principalmente radiativa, pero donde el patrón de radiación angular varía con la distancia a la antena.
- **Zona de Fraunhofer:** zona donde la potencia es radiativa, y donde el patrón de radiación es esencialmente constante con la distancia a la antena.

La zona reactiva y la de Fresnel son de campo cercano, mientras que la zona de Fraunhofer corresponde a campo lejano. Usualmente, las fronteras entre regiones están dadas aproximadamente por las siguientes relaciones:

- Frontera zona reactiva / zona de Fresnel = $0.62 \sqrt{D^3 / \lambda}$
- Frontera zona de Fresnel / zona de Fraunhofer = $2 D^2 / \lambda$

Con D = dimensión más larga de la antena

λ = longitud de onda

La zona de campo lejano es la más utilizada, dado que, al usar la antena como transmisora, usualmente se quiere transmitir a distancias relativamente grandes, y además, que toda la potencia

sea radiada. Otra ventaja es que en este caso el patrón de radiación, dada su independencia respecto a la distancia, es más fácil de medir. Lo mismo sucede con otros parámetros de la antena

2.2.3 Directividad

La directividad indica la capacidad de la antena de radiar o recibir potencia en cierta dirección, en relación a la potencia promedio radiada o recibida. Una definición puede ser la siguiente:

Directividad (θ, ϕ) = Potencia radiada (recibida) por ángulo sólido / Potencia promedio radiada (recibida) por ángulo sólido.

$$D = \max \left(\frac{U}{P_{\text{tot}} / (4\pi)} \right) = \frac{U(\theta, \phi)|_{\text{max}}}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi U(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi}.$$

A mayor directividad de una antena en una dirección particular, implica que la antena radia o recibe mayor cantidad de potencia en tal dirección, en relación al total radiado o recibido. La máxima directividad de la antena en una dirección particular se conoce como máxima directividad, o simplemente directividad. Notar que para una antena isotrópica (antena que radia igualmente en todas las direcciones), la directividad es constante e igual a 1.

2.2.4 Ganancia

La ganancia de una antena considera las pérdidas en la antena, y por tanto se relaciona con la directividad por un factor:

$$G = \eta_{\text{cd}} \times D,$$

η_{cd} : factor eficiencia de la antena, relacionado con las pérdidas resistivas y dieléctricas.

2.2.5 Apertura efectiva

La apertura efectiva, A_r , relaciona la potencia total que incide sobre la antena, S_{in} , a través de una onda plana, con la potencia que efectivamente recibe y transmite a través de los terminales, P_{rec} . Es decir, se tiene:

$$P_{\text{rec}} = A_r \cdot S_{\text{in}}$$

Por ejemplo, es claro que en una antena parabólica, a mayor diámetro de ésta, mayor será la cantidad de potencia recibida para una misma onda incidente. La apertura efectiva se relaciona con la directividad mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{A_r(\theta, \phi)}{\bar{A}_r} = D(\theta, \phi)$$

Donde A_r = Apertura efectiva, y \bar{A}_r = Apertura efectiva promedio, definida como:

$$\bar{A}_r = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} A_r(\theta', \phi') \sin \theta' d\theta' d\phi'$$

Una fórmula alternativa [4] es:

$$A_r(\theta, \phi) = \frac{\lambda^2}{4\pi} G(\theta, \phi)$$

2.2.6 Teorema de reciprocidad

Este teorema establece que las propiedades de la antena son idénticas en modo de transmisión y recepción, si la antena está hecha de materiales lineales e isotropos. Esto es de gran utilidad práctica, ya que algunos parámetros se pueden medir más fácilmente con la antena operando en uno u otro modo (generalmente, con la antena a caracterizar, como receptora).

2.3 Características antena tipo bocina (horn)

Las antenas tipo bocina (o *horn*, por su nombre en inglés) pertenecen al grupo de antenas de abertura, ya que son una extensión de las guías de onda, con una abertura final más amplia, con el fin de incrementar la ganancia. De este modo, se tienen las ventajas de las guías de onda (pocas pérdidas, gran selectividad de frecuencias), y mayor ganancia (baja en las guías de onda habituales). En la fig. 12 se muestran algunas geometrías de varios horn.

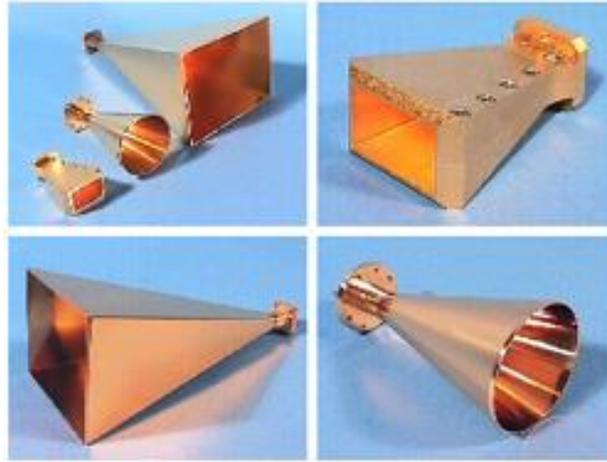


Figura 12. Antenas bocina (horn) [5].

Las antenas de este tipo presentan en general un patrón de radiación concentrado en un solo plano (el plano donde se encuentra la apertura), además de ser relativamente directivo (es decir, la ganancia se concentra en una región angular relativamente pequeña). En las imágenes de la fig. 13 se muestran algunos patrones de radiación típicos de los horn. Notar la existencia de lóbulos laterales (o “sidelobes”), las cuales son zonas donde la ganancia (o directividad) de la antena se reduce significativamente.

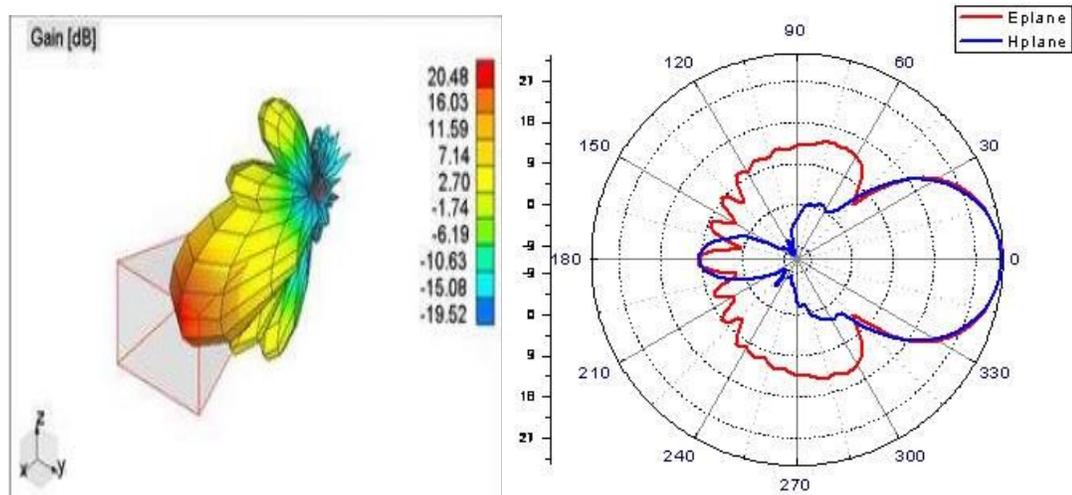


Figura 13. Patrón de radiación de una antena horn, tridimensional (izquierda) y sobre los planos E y H (derecha) [6].

2.3 Métodos para medir el patrón de radiación

2.3.1 Métodos de campo lejano

Estos métodos se basan en realizar un mapeo directo de la intensidad de radiación, entre las antenas transmisora y receptora. Este mapeo directo es posible, ya que a grandes distancias (de ahí el término “campo lejano” o “farfield”), el frente de onda emitido por cualquier antena resulta ser aproximadamente plano. Luego, si se quiere medir el patrón de radiación de una antena operando como receptora, simplemente se dispone sobre un posicionador y se hace variar angularmente su posición, teniendo una antena transmisora a gran distancia (y entonces, recibiendo una onda plana). En el caso de querer medir el patrón de la antena como transmisora, se hace exactamente lo mismo, variando la posición de la antena transmisora, y registrando las señales en la antena receptora. Las figuras 14 y 15 muestran esquemas de estos métodos.

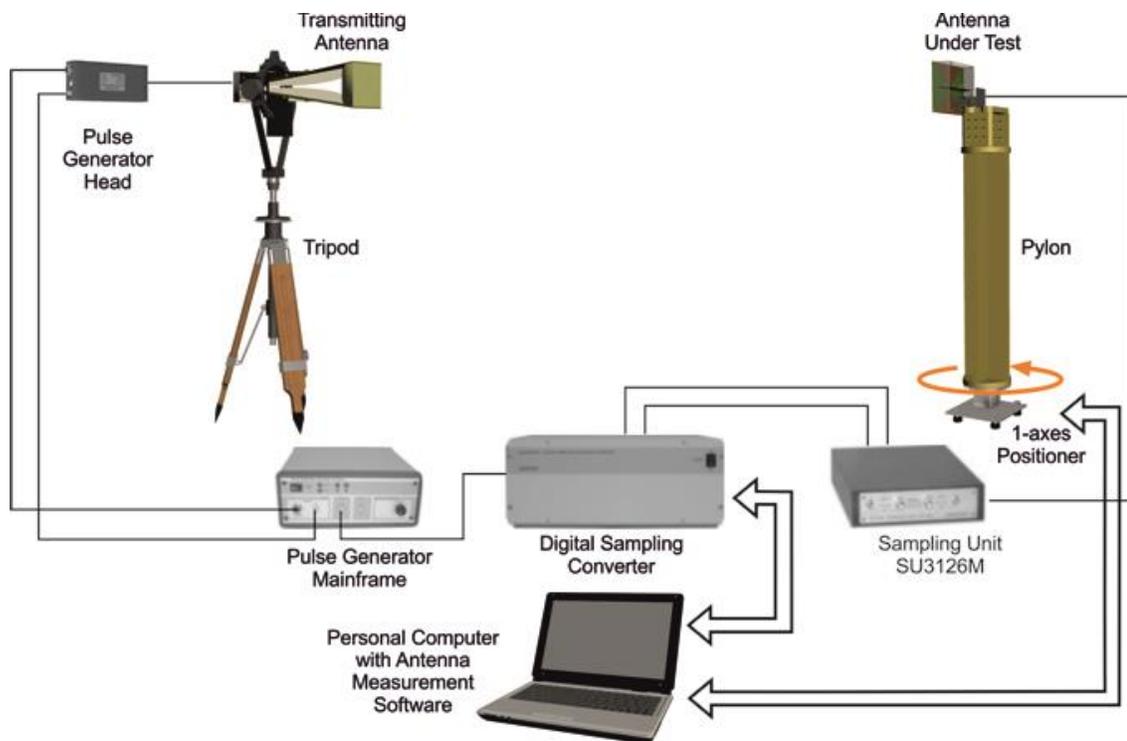


Figura 14. Esquema de medición en campo lejano [7].

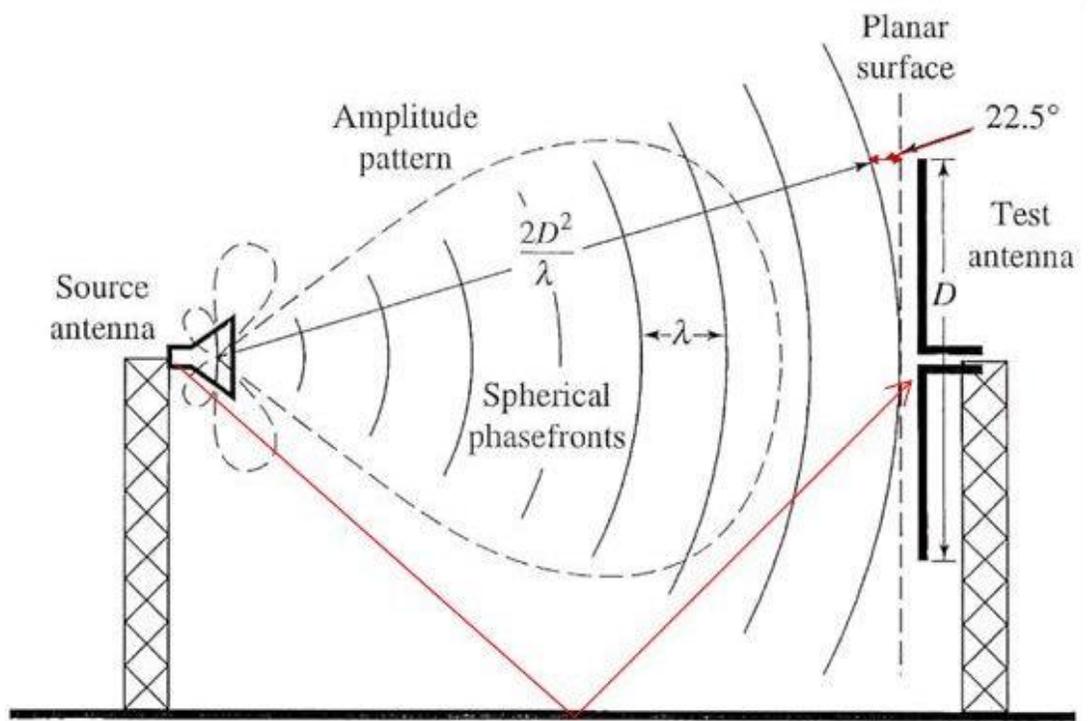


Figura 15. Esquema de medición de antenas en campo lejano [8].

Estos métodos, al utilizar un mapeo directo (en azimuth y elevación), están limitados al mapeo en el plano escogido, y por tanto, las medidas suelen ser sólo en los planos principales (plano E y H, o de Azimuth y Elevación, según el sistema de coordenadas elegido). Estas medidas se pueden realizar al aire libre, en el caso de medidas que no requieran tanta precisión o que sean menos susceptibles al ruido ambiental en general, o en recintos cerrados y acondicionados de modo de no recibir ni transmitir radiación fuera de los márgenes. Ejemplos de estos recintos son cámaras anecoicas, como se ve en las figuras 16,17 y 18.



Figura 16. Cámara anecoica (Christ University, Bangalore) [9].

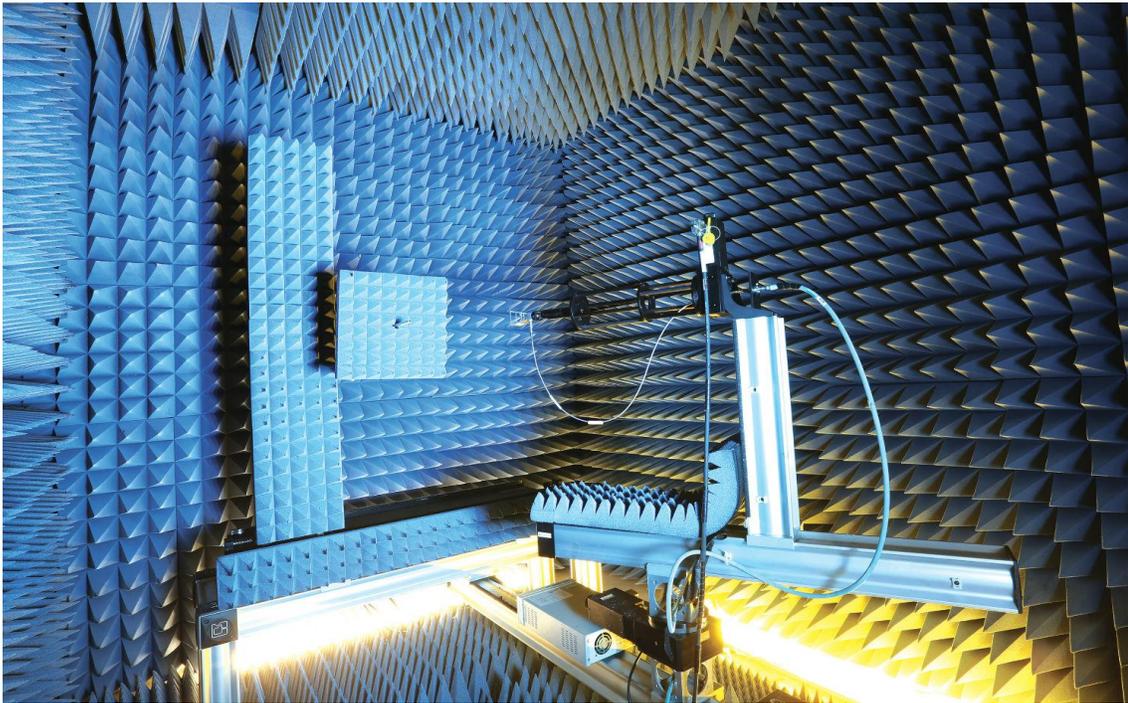


Figura 17. Cámara anecoica (City University of Hong Kong) [10].



Figura 18. Cámara anecoica (University of Southampton) [11].

2.3.2 Métodos de campo cercano

Las medidas en campo cercano tienen por objeto medir el patrón de antenas en la zona radiativa cercana, es decir, la zona donde el patrón de radiación es radiativo, pero variable con la distancia a la antena. Dado esto (variación del patrón con la distancia), no se utiliza un mapeo directo, sino que se debe buscar un método para transformar las medidas en campo cercano en el patrón de campo lejano. Estos métodos se basan en obtener el campo lejano de la antena (o una buena aproximación de éste), utilizando una condición de borde que permita resolver la ecuación de Helmholtz del campo electromagnético. En términos generales, el esquema de un sistema de tipo planar para medir el campo cercano (ver fig. 19) es el siguiente:

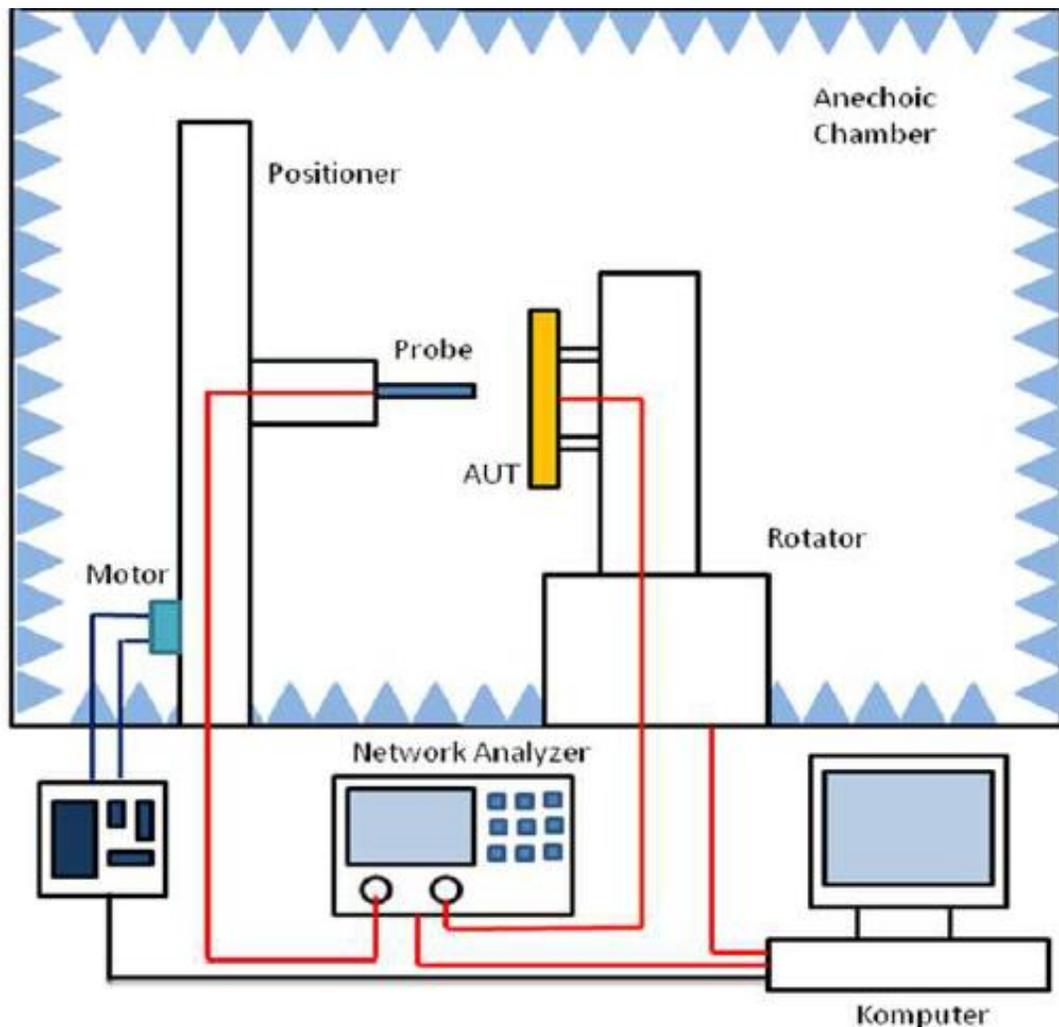


Figura 19. Esquema de medición en campo cercano [12].

- 1.- Un sistema de posicionamiento mecánico que representa el plano de medición (para la fig.19, posicionador + motor).
- 2.- Antena de prueba (“Probe”), generalmente semi-omnidireccional y de muy baja componente de polarización cruzada que realiza las mediciones (como transmisor o receptor), sin modificar el campo de la antena a caracterizar.
- 3.- Antena a caracterizar (“AUT”, en la fig.19)
- 4.- Fuentes y receptores de señal, que comparen las señales transmitidas y recibidas en amplitud y fase (para la foto de referencia, Network Analyzer).
- 5.- Un sistema de control, para dirigir el proceso completo de medición, de manera automática (corriendo usualmente en un computador)
- 6.- Opcionalmente, atenuadores, acopladores, mezcladores y otros elementos de microondas en caso de ser necesarios.

El proceso de medición es el siguiente:

- 1.- La antena de prueba se monta sobre el sistema de posicionamiento que la coloca en los puntos discretos que representan el sampleo del plano continuo.
- 2.- En cada punto, el analizador vectorial almacena las señales transmitidas (o recibidas) por las antenas a caracterizar y de prueba.
- 3.- La antena a caracterizar se mantiene fija frente al sistema de posicionamiento a una distancia suficiente (más adelante se analiza un criterio para definir una “distancia suficiente”).
- 4.- Idealmente, algún software maneja automáticamente todo el proceso de medición (movimiento del sistema de posicionamiento, toma de datos, sincronización de los componentes).
- 5.- Luego se procesan los datos del analizador vectorial para transformarlos a campo lejano y obtener el patrón de radiación de la antena.

En las siguientes secciones se detalla los fundamentos matemáticos de éste método

2.4 Teoría de Transformación Planar Near-Field a Far Field

El objetivo de la teoría de medición en el campo cercano, es resolver la ecuación de Helmholtz (ecuación de onda simplificada), reduciéndola de una ecuación en derivadas parciales a una ecuación diferencial ordinaria con una condición de borde que haga plausible resolverla. La Transformada de Fourier Bidimensional permite reducir la ecuación original, y teniendo la condición de borde, anti-transformar para volver al dominio original.

La ecuación de Helmholtz (EcH en adelante) en coordenadas cartesianas es la siguiente:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, y, z) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} u(x, y, z) \right) + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} u(x, y, z) \right) + k^2 u(x, y, z) = 0 \quad , 1)$$

que corresponde a la función escalar $u(x,y,z,t)$, en la cual la componente temporal es del tipo $\exp(j\omega t)$. La ecuación de onda de Maxwell se puede descomponer de este modo (tiene forma similar), asumiendo una ecuación diferente para cada componente \mathbf{E}_x , \mathbf{E}_y , \mathbf{E}_z , ya que el campo $\mathbf{E}(x,y,z,t)$ es vectorial (con \mathbf{E} representando campo eléctrico).

Considerar la Transformada de Fourier Unidimensional de $f(t)$:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{(t w I)} dt \quad 2)$$

donde lo que se obtiene es $f(t)$ como superposición de funciones del tipo $\exp(j\omega t)$, con w como frecuencia temporal (rad/s).

Ahora considerar una señal bidimensional $f(x,y)$, y su Transformada de Fourier Bidimensional (TFB en adelante):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{(j k x x)} e^{(j k y y)} dx dy \quad 3)$$

En este caso, se obtiene $f(x, y)$ como superposición de ondas planas, de frecuencia kx y ky , en este caso, frecuencia espacial (rad/metro). Ahora, si se aplica la TFB a la EcH, simplificando resulta:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} U(kx, ky, z) \right) + (k^2 - kx^2 - ky^2) U(kx, ky, z) = 0 \quad 4)$$

donde

$$U(kx, ky, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, z) e^{(j k x x)} e^{(j k y y)} dkx dky \quad 5)$$

Entonces, $U(kx,ky,z)$ representa la TFB de $u(x,y,z)$. La solución general de 4) es:

$$U(kx, ky, z) = a1(kx, ky) e^{(-j \sqrt{k^2 - kx^2 - ky^2} z)} + a2(kx, ky) e^{(j \sqrt{k^2 - kx^2 - ky^2} z)} \quad 6)$$

Al invertir 6), se obtiene $u(x,y,z)$:

$$u(x, y, z) = \frac{1}{4} \pi^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(kx, ky, z) e^{(-j k x x)} e^{(-j k y y)} dkx dky \quad 7)$$

Notar que los términos en 7)

$$e^{(-j k x x)} e^{(-j k y y)} e^{(-j \sqrt{k^2 - kx^2 - ky^2} z)} \quad 8)$$

$$e^{(-j k x x)} e^{(-j k y y)} e^{(j \sqrt{k^2 - kx^2 - ky^2} z)} \quad 9)$$

representan ondas planas viajando en la dirección dada por kx,ky , en direcciones opuestas. Como la solución solo debería contener términos que representen el potencial retardado, el término

$a_2(k_x, k_y)$ en 6) se anula (también se puede anular $a_1(k_x, k_y)$, dependiendo en que dirección se elija el eje $+z$), resultando finalmente:

$$u(x, y, z) = \frac{1}{4} \pi^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a_1(k_x, k_y) e^{(-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z)} e^{(-j k_x x)} e^{(-j k_y y)} dk_x dk_y \quad 10)$$

Luego, es necesario conocer el término $a_1(k_x, k_y)$ para resolver la ecuación. Si se escoge $z=0$, en 6) resulta:

$$U(k_x, k_y, 0) = a_1(k_x, k_y) \quad 11)$$

Dado 5), entonces se obtiene:

$$U(k_x, k_y, 0) := \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} u(x, y, 0) e^{(j k_x x)} e^{(j k_y y)} dk_x dk_y = a_1(k_x, k_y) \quad 12)$$

Luego, $a_1(k_x, k_y)$ se obtiene de aplicar la TFB al plano $u(x, y, 0)$. Es decir, conociendo los valores de la Ech en el plano $z = 0$ (en cualquier plano $z=d$ en general, pero dado que la elección del sistema de coordenadas es arbitrario, se puede hacer el plano escogido como $z=0$), es posible, mediante la TFB, resolver completamente la Ech. Entonces, queda:

$$u(x, y, z) = \frac{1}{4} \pi^2 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(k_x, k_y, z=0) e^{(-j\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} z)} e^{(-j k_x x)} e^{(-j k_y y)} dk_x dk_y \quad 13)$$

La ecuación 13) puede ser difícil de resolver analíticamente. Por lo que para resolverla usualmente se utiliza el método de fase estacionario, en el cual se resuelve 13) para ciertos puntos (con $r \rightarrow \infty$), en los cuales $k \cdot r$ no varía en una aproximación de 1er orden. Realizando esta aproximación, se obtiene:

$$u(r) := \frac{1}{2} \frac{j e^{(-j k r)} k \cos(\theta) a_1(k_x, k_y)}{\pi r} \quad 14)$$

La cual es válida solo para los puntos:

$$\begin{aligned} k_x &= k \sin(\theta) \cos(\phi) \\ k_y &= k \sin(\theta) \sin(\phi) \\ k_z &= k \cos(\theta) \end{aligned} \quad 15)$$

Los puntos intermedios (para aquellos en los que k_x , k_y , k_z no son estacionarios) se obtienen por interpolación (ya que la función $u(x,y,z)$ es en general suave.) A la función $a_1(k_x, k_y)$ se le llama usualmente PWS (Plane Wave Spectrum o Espectro de Onda Plana), ya que entrega la amplitud de un espectro de ondas planas, propagándose en la dirección $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$.

Por simetría en los términos exponenciales (ver 13)), k_z se puede definir como:

$$\begin{aligned} k_z &= \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}, k_x^2 - k_y^2 < k^2 \\ k_z &= -j \sqrt{-k^2 + k_x^2 + k_y^2}, k^2 < k_x^2 - k_y^2 \end{aligned} \quad 16)$$

donde la segunda definición de k_z se escoge para considerar las componentes evanescentes del campo, ya que de lo contrario 13) no converge. Además, se tiene la siguiente relación:

La EcH debe cumplir además con las leyes de Maxwell. En particular, si se aplica:

$$\nabla u = 0$$

Derivando lo anterior respecto a k_x y k_y , se obtiene:

$$a_{1_x}(k_x, k_y) k_x + a_{1_y}(k_x, k_y) k_y + a_{1_z}(k_x, k_y) k_z = 0 \quad 17)$$

donde $a_{1_i}(k_x, k_y)$ representa la componente i de $a_1(k_x, k_y)$. De 17) se deduce que solo bastan dos componentes de $a_1(k_x, k_y)$ para obtener la tercera. Esta propiedad es de importancia práctica (principalmente en antenas), ya que permite medir solo dos polarizaciones, y estimar la tercera.

Notar además que la PWS es una expansión en ondas planas estacionarias en la frecuencia espacial. La función $U(k_x, k_y, z)$ no contiene componentes reactivas o evanescentes (que decaen en amplitud con la distancia). Por tanto, el plano $u(x, y, 0)$ solo debería contener energía radiativa. Esto es particularmente importante en el caso de las antenas, ya que indica que el plano $u(x, y, 0)$ debería elegirse fuera de la zona de campo-cercano reactivo de la antena.

En resumen, para resolver la ecuación de onda del campo $\mathbf{E}(x, y, z)$, y particularmente en el campo lejano se debe:

- Obtener la condición de borde $\mathbf{E}(x, y, z) = 0$. Dado que el campo \mathbf{E} es vectorial, si se escoge el plano x - y , se debe obtener las componentes E_x , E_y .
- Aplicar la TFB sobre cada componente (ver 12)), de modo de obtener a_{1_x} , a_{1_y} , y eventualmente a_{1_z} mediante 17).
- Aplicar la TFB inversa al resultado anterior (ver 10)), para obtener E_x , E_y , E_z en forma integral (ver 13))
- Aplicar la aproximación asintótica para obtener \mathbf{E} en el campo lejano (ver 14))

2.5 Aspectos prácticos de las mediciones de tipo planar en campo cercano

El desarrollo anterior, si bien es correcto, no considera ciertos aspectos prácticos a considerar:

- a) El plano $\mathbf{E}(x,y,0)$ se supone implícitamente de dimensión infinita. En la práctica, las mediciones deberían realizarse sobre un plano de dimensión finita.
- b) El plano además no es continuo, ha de ser discreto, por lo que las mediciones se realizan sobre una malla de puntos predeterminada.
- c) Dado lo anterior (plano finito y discreto), se debe elegir las características del plano de modo de cumplir con las condiciones de Nyquist (sampleo).
- d) Las mediciones se realizan mediante algún tipo de antena o dispositivo (antena probe), por lo que las mediciones son afectadas por las propias características de éste.
- e) La antena probe solo debe recibir radiación directa de la antena a caracterizar, no de otras fuentes. Por tanto, se debe cuidar que no hayan reflexiones ni interferencia de otras fuentes.
- f) El alineamiento entre el plano y la antena puede no ser perfecto, así como el plano de medición puede no ser perfectamente plano. En resumen, hay que considerar las imperfecciones mecánicas y de alineamiento de los dispositivos.

A continuación, se analizan las implicancias de esos efectos prácticos. Dado que la estructura de interés a caracterizar son antenas (particularmente de apertura), de aquí en adelante se supondrá en general que el dispositivo bajo prueba (o DUT, acrónimo de “Device Under Test”), es una antena.

2.5.1 Parámetros para el sampleo del plano

2.5.1.1 *Sampleo Espacial*

Se conoce que para una señal de banda limitada, de frecuencia máxima f_{max} , si se aplica un sampleo a una frecuencia $f_{sampleo} > 2f_{max}$, la señal original se puede reconstruir sin pérdida. Para el caso de un campo $\mathbf{E}(x, y, z)$, de frecuencia temporal f , y longitud de onda $\lambda = c/f$, se debe samplear espacialmente a una distancia de al menos $\lambda/2$ (cumpliendo la condición de Nyquist), es decir, suponiendo que el plano está en el eje x-y:

$$\begin{aligned}\Delta x &\leq \lambda/2 \\ \Delta y &\leq \lambda/2\end{aligned}\tag{14}$$

Es decir, conociendo la frecuencia de operación de la antena, se calcula la distancia a la que deben estar los puntos a samplear. Entonces, para una frecuencia de 45 GHz, $\lambda \approx 6.7$ mm, y entonces $\Delta x, \Delta y < 6.7/2$ mm = 3.35 mm.

2.5.1.2 Tamaño del plano

El tamaño del plano a samplear debe cubrir gran parte de la energía total del patrón de radiación de la estructura (antena u otro elemento), de modo que los efectos del truncamiento sean bajos. Experimentalmente, se recomienda elegir un tamaño del plano que permita cubrir zonas $>-35\text{dB}$ (relativos al máximo valor del campo \mathbf{E} en el plano). Por tanto, es conveniente conocer o estimar a priori la distribución del campo \mathbf{E} sobre el plano.

En conjunción con lo anterior, dado que el sampling no se realiza en un plano infinito, la reconstrucción del campo lejano es razonable hasta cierto ángulo, medido desde los bordes de la apertura física o efectiva de la antenna. Una estimación del máximo ángulo en el campo lejano a reconstruir está dada por la fórmula:

$$\theta := \arctan\left(\frac{L - a}{2d}\right) \quad 15)$$

Con las dimensiones mostradas en la figura 20:

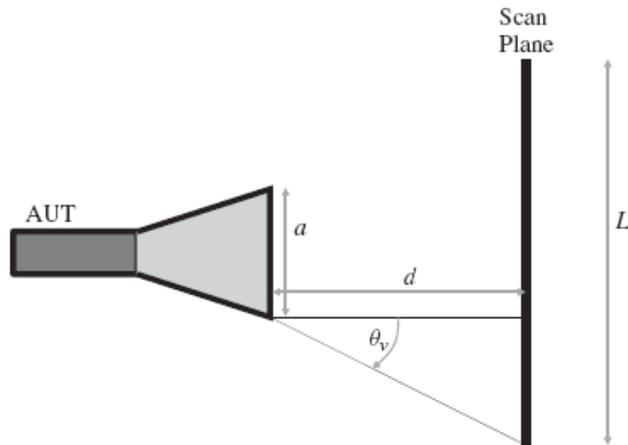


Figura 20. Máximo ángulo a reconstruir en campo lejano.

2.5.1.3 Distancia Plano de Sampleo – Antena

La distancia entre el plano a medir y la apertura de la antenna a caracterizar debe ser tal que no haya componentes reactivas significativas sobre el plano a samplear. Como se vió antes, para el caso de ondas evanescentes,

$$kz = -j\sqrt{kx^2 + ky^2 - k^2}$$

Entonces, se debe encontrar cuanto se atenúa el factor $\exp(jkz)$. Si se expresa en dB, y factorizando, resulta:

$$\text{Atenuación}_{dB} = 20 \text{Log}_{10} (e^{kz\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - 1}})$$

Donde α y β se obtienen de la siguiente relación:

$$\begin{aligned} k_x &= k\alpha \\ k_y &= k\beta \end{aligned}$$

Simplificando, se tiene:

$$\text{Atenuación}_{dB} = - \frac{56.4 z \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 - 1}}{\lambda}$$

Luego, se vé que para $z = 3\lambda$, la atenuación es $\sim -150\text{dB}$, por lo que en general se escoge esta distancia como el límite inferior para samplear el plano $\mathbf{E}(x, y, 0)$.

2.5.1.4 Patrón de radiación de la antena probe

Las medidas sobre el plano se realizan con un probe (que es generalmente una guía de onda rectangular). Este probe también tiene un patrón de radiación, por lo que su efecto debe considerarse en las medidas tomadas. Básicamente lo que se tiene es una convolución entre los valores del campo $\mathbf{E}(x, y, 0)$, y el patrón del probe. Conociendo el patrón del probe, se puede remover el efecto de las medidas.

2.5.1.5 Alineamiento y planaridad del desplazador

Otro punto a considerar es el alineamiento entre el plano de la antena y el plano del desplazador. En general, no es necesario que el alineamiento entre ambos planos sea perfectamente paralelo, pero si es necesario conocer la ubicación de éstos. No es necesario que estén perfectamente paralelos, porque la desviación se puede incluir en el algoritmo.

Lo mismo sucede con el desplazador. En caso de no ser perfectamente plano, al menos ha de poder conocerse su desviación, de modo de poder corregir posteriormente en el algoritmo. En general, se permite un error de planaridad en el desplazador (o de desviación entre los planos de la antena y éste), de aprox. $\lambda/100$, lo que indica que el alineamiento y planaridad del desplazador son parámetros importantes a tener en cuenta.

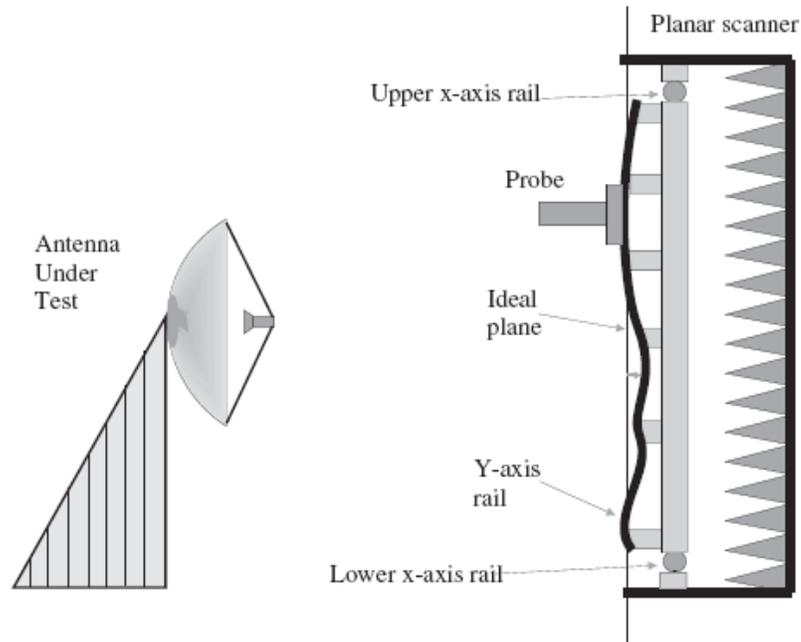


Figura 21. Errores en la planaridad del desplazador. Estos son aceptables siempre que sean $<\lambda/100$ [3].

2.5.1.6 Implementación de la TFB (Transformada de Fourier Bidimensional)

La TFB y su inversa son las operaciones que permiten procesar las medidas sobre el plano $\mathbf{E}(x,y,0)$ y luego obtener el campo lejano. Lo más sencillo es utilizar alguna implementación de la FFT bidimensional de algún software. Particularmente, Matlab tiene funciones que realizan la TFB directa, inversa, y con un desplazamiento sobre las componentes resultantes, por lo que muchos sistemas “*custom*” (hechos a medida) utilizan esta opción.

2.6 Descripción del proyecto a realizar

El tema de esta memoria de título es el diseño e implementación de un sistema de medición planar de patrones de radiación. Este sistema operará en la banda milimétrica del espectro electromagnético, por lo que se ha decidido que opere en el campo cercano para medir patrones de radiación de antenas (u otro elemento de características similares). En esta sección, se describe de forma más detallada los objetivos y el enfoque que guía el desarrollo del tema.

Para ello, se divide el diseño del sistema en tres tópicos principales:

- a) Diseño del montaje mecánico
- b) Diseño del software de control y medición
- c) Diseño del software de post-procesamiento

Además, se deben hacer pruebas experimentales de cada parte del sistema, y de éste en conjunto.

2.6.1 Diseño del setup mecánico

Por éste tópicó, se entiende lo siguiente:

- Diseño de las dimensiones del sistema
- Diseño y selección de los componentes mecánicos, absorbentes y otros.

En síntesis, dadas las condiciones y el tipo de aplicación (ondas milimétricas, antenas horn), se han de escoger las dimensiones adecuadas para el sistema de campo cercano, (entendiéndose por esto las dimensiones físicas que permitan medir de forma precisa los patrones y parámetros de las antenas). Además, debe tener un tamaño adecuado e intentando mantener la relación costo/beneficio a un nivel óptimo.

Se ha de escoger un sistema robótico capaz de posicionar una antena de medición sobre una grilla predeterminada, la cual ha de tener dimensiones suficientes para el tipo de medición a realizar. Además, se debe seleccionar un conjunto de soportes mecánicos (rieles, etapas rotatorias, monturas, etc.) para los distintos elementos del sistema.

2.6.2 Diseño del sistema de control y medición

Las tareas principales en este tópicó son:

- Software de control del analizador vectorial.
- Software de control del posicionador robótico.
- Integración de ambos software y pruebas.

El software de control del analizador vectorial debe ser capaz de disponer varios parámetros útiles (como la potencia, el rango de frecuencias, y otros) y principalmente, ser capaz de almacenar datos de las medidas, que luego puedan ser enviados a un PC de uso general.

El software de control del posicionador robótico, tiene por objeto poder manipular el movimiento de éste, mediante el control de varios parámetros (como la velocidad, aceleración del movimiento, distancias a recorrer), y particularmente mover de forma automática el posicionador sobre una grilla pre-determinada.

Finalmente, ambos softwares deben integrarse, ya que una medición consiste en el movimiento del posicionador sobre una grilla a la vez que el analizador mide y almacena estos datos (sincronización de ambos sistemas). Ésta integración debiera darse en forma de una interfaz gráfica que permita disponer de los parámetros importantes y realizar la medición y traspaso de datos de forma automática.

2.6.3 Diseño del software de post-procesamiento

Las medidas obtenidas por el sistema de control, deben procesarse para obtener las características buscadas en la medición. Específicamente, las medidas resultantes del experimento corresponden al frente de onda de la antena a caracterizar, y este frente de onda ha de procesarse para obtener así el patrón de campo lejano (o far-field) de la antena.

Este software ha de recibir los datos de las mediciones, y de forma automática procesar los datos y obtener los gráficos y otros resultados que permitan caracterizar el comportamiento del campo lejano de la antena.

2.6.4 Pruebas experimentales

Finalmente, el sistema debe testearse para comprobar que las mediciones obtenidas son correctas, y que el sistema además funciona correctamente. Estas pruebas consistirán en realizar medidas con el sistema completo (o en gran parte completo), utilizando antenas de prueba. Aparte de verificar que las mediciones son correctas (comparando el patrón de campo lejano obtenido, con simulaciones electromagnéticas), se establecerán prácticas y métodos apropiados para realizar las mediciones de forma óptima, experimentando con configuraciones varias.

2.7 Alcance y aporte del tema de memoria

El tema de memoria se enmarca en dos iniciativas relacionadas que se llevan a cabo como una cooperación entre los Departamentos de Ingeniería Eléctrica y Astronomía. Estos son el proyecto de receptor para la banda 1 de ALMA (explicado en 1.2) y la implementación del Laboratorio de Ondas Milimétricas en el Depto. de Astronomía (DAS).

2.7.1 Implementación Laboratorio Ondas Milimétricas

Un objetivo importante del trabajo de memoria es que el sistema a diseñar e implementar, formará parte del Laboratorio de Ondas Milimétricas, en Cerro Calán (Depto. de Astronomía), con el objeto de apoyar el desarrollo del prototipo del receptor de ALMA, pero además, quedando disponible para futuros desarrollos y trabajos en el área de ondas milimétricas y radioastronomía.

El trabajo forma parte además de un esfuerzo reciente por parte de la Universidad en el desarrollo de instrumentación astronómica en el país, aprovechando los grandes proyectos astronómicos presentes en el país desde hace muchos años, y varios otros por venir.

2.7.2 Alcance del trabajo

El diseño a realizar el sistema de medición de patrones de radiación tiene el objetivo de realizar un elemento completamente funcional y acorde con los requerimientos del proyecto de receptor Banda 1, es decir, el sistema diseñado debe ser similar a cualquier otra utilizada en proyectos profesionales de telecomunicaciones o radioastronomía.

Sin embargo, dadas las características del proyecto del receptor, y que el sistema se diseñará pensando en tal iniciativa, sus características y rangos de operación pueden ser más restringidos que los de un sistema comercial con el mismo objetivo (los cuales son varias veces más costosos que el costo proyectado del sistema a implementar). Es decir, el sistema ha de cumplir a la perfección con el objetivo de medir antenas de apertura en, al menos, el rango de frecuencias definido en las especificaciones de Banda 1 ALMA (30-45 GHz)

En resumen, el alcance del proyecto es el de un diseño completamente funcional, pero adecuado a las condiciones del proyecto de receptor de Banda 1. Cualquier otro uso que se le quiera dar, deberá evaluarse según las condiciones y tipo de medidas a realizar, y ver si es posible adaptar el sistema a tales usos.

3. Diseño e implementación del sistema de medición en campo cercano

En este capítulo se detalla el diseño y la implementación del sistema de medición en el campo cercano (o near-field). Para ello se divide el diseño en tres tópicos principales: diseño mecánico, diseño de sistema de control, y diseño de software de post-procesamiento. A grandes rasgos, el sistema debe ser capaz de aceptar parámetros que configuren una medición en particular, y mediante un software de control, ejecutar esta medición automáticamente. Luego, un software debe procesar las medidas obtenidas, y obtener los patrones de radiación en el far-field, entre otros datos. Cabe notar que todos los componentes de Radio Frecuencia (RF) a mencionar de aquí en adelante, son compatibles con el rango de frecuencias entre los 30 a 50 GHz (Q-band).

3.1 Diseño mecánico y componentes de RF

Como se vio en la sección 2.3.2, el sistema de medición en el near-field es una integración de varios instrumentos y elementos. La cantidad y tipo de elementos varía según la implementación, pero a grandes rasgos, los elementos indispensables son:

- 1.- Scanner o posicionador mecánico
- 2.- Antena probe
- 3.- Fuentes y receptores de señales (pueden estar contenidas en un solo instrumento)
- 4.- Elementos varios de soporte y montaje

Antes de seleccionar que instrumentos y elementos utilizar, se debe hacer una estimación de los aspectos vistos en 2.5.1, es decir:

- a) Sampling espacial
- b) Tamaño del plano
- c) Distancia antena-plano

De este modo se puede estimar las características del scanner a escoger, de la antena, y las dimensiones de los perfiles de montaje y soporte. Se procede a analizar cada factor por separado.

3.1.1 Scanner (Posicionador mecánico)

Se analizan los factores importantes al momento de seleccionar el scanner para el sistema a implementar

3.1.1.1 *Sampleo espacial*

Como se ve explica en 2.5.1.1, la distancia de sampleo, es decir, el paso que debe desplazarse el scanner entre puntos, está dado por:

$$\Delta x \leq \lambda/2$$

$$\Delta y \leq \lambda/2$$

A mayor frecuencia, el paso de sampleo es menor. Para las frecuencias a caracterizar, el paso de sampleo corresponde a:

Frecuencia (GHz)	Paso de sampleo (mm)
31	9.67
38	7.89
45	6.67
50	6

Tabla II. Paso de sampleo a distintas frecuencias.

Se incluyó el caso de 50 GHz como margen de seguridad (ya que el rango de frecuencias a caracterizar es de 31-45 GHz). Se ve entonces que el scanner a elegir debe ser capaz de desplazarse en pasos de al menos 6 mm.

3.1.1.2 *Tamaño del plano*

Dado que para reconstruir el patrón de radiación de la antena se debe capturar gran parte de la energía de esta, el rango del sistema de posicionamiento debe ser tal que permita lo anterior. Como se explica en 2.5.1.2, a menores distancias scanner-antena, el tamaño del plano es menor generalmente (ya que, al estar más cerca de la antena, la energía de este diverge menos angularmente que a mayores distancias). Sin embargo, no se puede estar a distancias arbitrariamente pequeñas, ya que se debe cumplir la condición de estar fuera de la zona reactiva

del DUT. Además, si la distancia es pequeña, aumentan las mediciones contaminadas con reflexiones espurias entre los varios elementos del sistema (como reflexiones entre soportes, entre el mismo DUT y el probe).

El largo del plano (L), la distancia entre este y el DUT (d), el largo de la apertura del DUT (a) y el ángulo máximo que se puede reconstruir del beam pattern (θ), se relacionan por la ecuación 15):

$$\theta := \arctan\left(\frac{L - a}{2d}\right)$$

Asumiendo $a \sim 0.1$ m, y $\theta \sim 60^\circ$, se tiene la relación entre L y d mostrada en la figura 22.

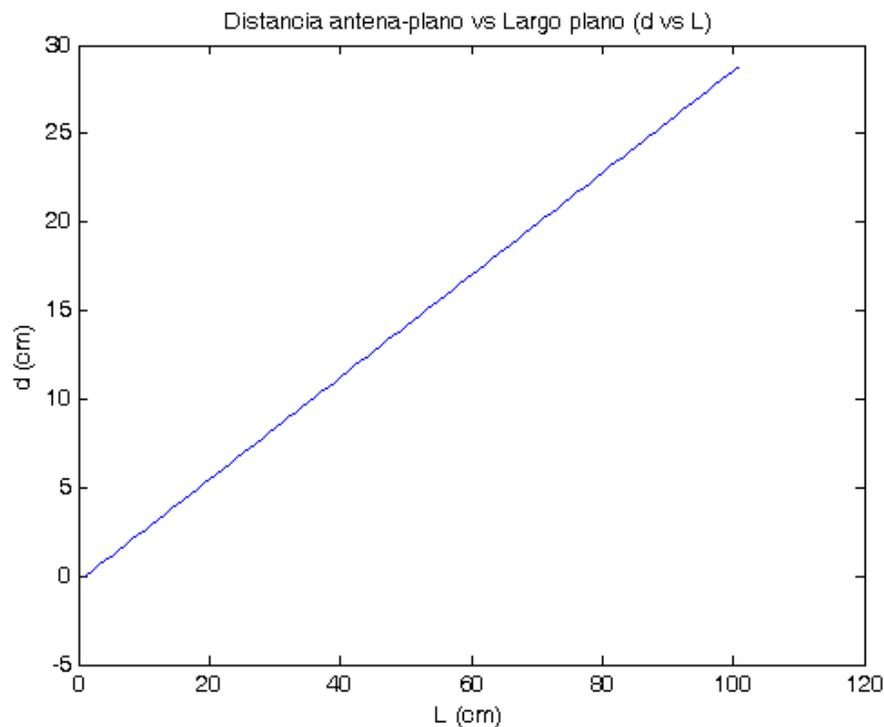


Figura 22. Relación entre d (distancia scanner-DUT) y L (largo plano medición).

El valor del largo de la apertura es usualmente menor (aproximadamente unos 3cm para la antena horn de Banda 1), pero se escoge un valor de 10 cm como factor de seguridad y para darle más flexibilidad al sistema en caso de medir otros DUT de mayor tamaño. En el caso de θ , dado que los DUT a medir han de ser altamente directivos por definición (ya que si no, no sería posible utilizar un scanner plano), un ángulo máximo de 60° es más que suficiente, en la mayoría de los casos, para capturar la energía del DUT (en el caso de la antena de Banda 1, a un $\theta \sim 40^\circ$, la potencia relativa al máximo es $\sim -35/-40$ dB, es decir, entre un 0.1% y un 0.01%).

3.1.1.3 Distancia Plano Sampleo – DUT

En **2.5.1.3**, se analiza que una distancia Scanner-DUT $> 3\lambda$, garantiza que se está fuera de la zona reactiva, y por tanto es la distancia mínima a la cual se puede colocar el scanner. Para las frecuencias a medir, estas distancias son:

Frecuencia (GHz)	Distancia mínima Scanner-DUT (mm)
31	29.023
38	23.68
45	20
50	18

Tabla III. Distancia mínima Scanner-DUT a distintas frecuencias.

Si se toma una distancia de 10λ , y se vuelve a la relación 15), se tienen los siguientes L (largo del plano de medición):

Frecuencia (GHz)	Distancia Scanner- DUT (mm)	L (Largo Plano Medición, cm)
31	96.77	43.52
38	78.94	37.35
45	66.67	33.1
50	60	30.78

Tabla IV. Distancia Scanner-DUT, y largo plano L, a distintas frecuencias.

Teniendo todos los datos anteriores, se requiere entonces un scanner que tenga:

- a). - Al menos 6 mm de desplazamiento mínimo
- b)- Largo del plano de escaneo > 45 cm mínimo

Dentro de las opciones a evaluar como scanner, se encuentra el modelo STG-24-C de Newmark Systems (www.newmarksystems.com), similar al mostrado en la figura 23. Este modelo cuenta con las siguientes características:



Figura 23. Scanner STG-24-C, Newark Systems.

Resolución desplazamiento	1 micrón
Largo plano de desplazamiento	60 cm.
Velocidad máxima	1 pulgada/seg.
Capacidad de carga	15 libras
Planaridad de superficie	0.15 mm max.

Tabla V. Características del scanner.

Dado que este modelo (el cual se fabrica a medida), sobrepasa con cierta holgura los requerimientos enunciados anteriormente (lo que entrega mayor flexibilidad en caso de usar el scanner en otras aplicaciones, o en otras condiciones), se escoge como scanner para implementar el sistema. Otras opciones fueron evaluadas, particularmente modelos de NSI (www.nearfield.com), los cuales si bien cumplían los requerimientos, tenían un costo mucho mayor.

3.1.2 Antena Probe

La antena con la cual se realizará la acción de acople electromagnético con el DUT, es la antena probe. Esta antena, si bien en principio puede tener cualquier patrón de radiación o directividad, por motivos prácticos es recomendado que tenga:

- a) Patrón de radiación directivo, donde el lóbulo principal de este debe cubrir la región angular de acople con el lóbulo principal del DUT. Este probe tiene que cubrir la Banda-Q y generar muy bajos lóbulos laterales.

- b) Mecánicamente estable, de modo de mantener su forma (y por tanto, sus características electromagnéticas), durante el escaneo y el uso prolongado.
- c) Sus características idealmente deben estar medidas experimentalmente.

El punto a) se explica debido a que, si el patrón de radiación del probe tiene nulos (al menos en la zona donde interactúa con el DUT), el acople en esa zona produce datos imprecisos (ya que se acopla la radiación del DUT, con un valor extremadamente bajo del probe, resultando en una incerteza que puede ser significativa).

Si el patrón es sencillo, va vinculado además al punto c), ya que en ese caso sus características (patrón de radiación, directividad) son fácilmente de simularlas, y, por tanto, no es necesario tener los datos experimentales.

La antena más usualmente usada como probe es el “waveguide probe” o guía de onda abierta, como en la imagen 24.



Figura 24. Antenas probe, u Open Waveguide [13].

El tamaño de la apertura se escoge de modo que, en el rango de frecuencia de operación, se produzca un patrón semi-isotrópico (al menos en el plano de la apertura). De esta manera el patrón es fácilmente simulable, e incluso a cortas distancias de la apertura (y a pequeñas secciones angulares) es una onda semi-plana, como se ve en la imagen 25. El modelo escogido es el MI-6970-WR22 de MI Technologies.

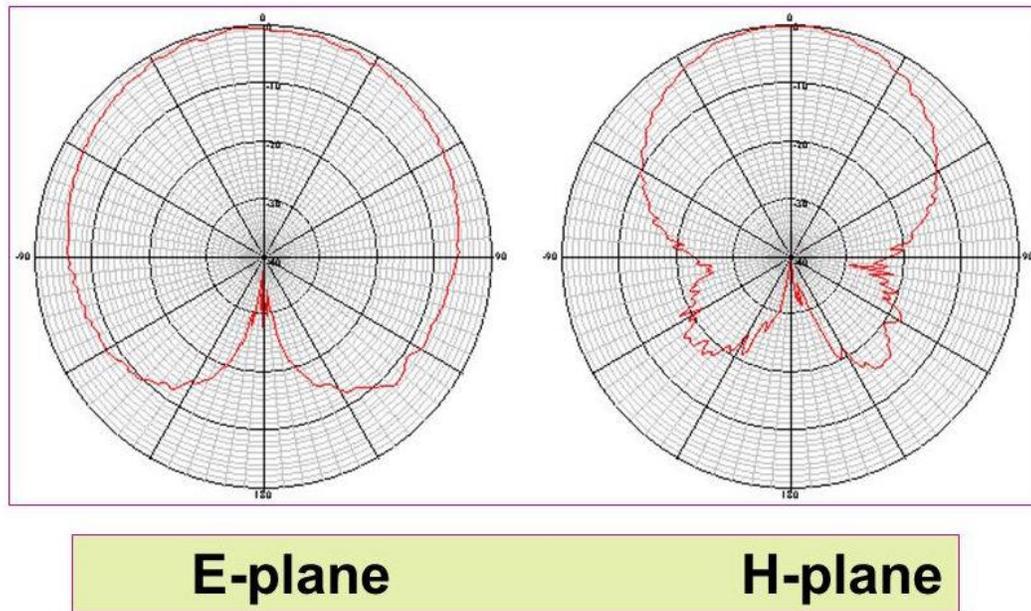


Figura 25. Patrón de radiación en un plano de un Probe [14].

3.1.3 Fuentes y receptores de señal

El proceso de escaneo involucra la antena probe emitiendo (o recibiendo) una señal, con el DUT recibiendo (o transmitiendo) recíprocamente. Por tanto, es necesario tener una fuente de señal, y un receptor, que permita comparar ambas señales en magnitud y fase.

Lo anterior se puede implementar de varias maneras, de las cuales una es particularmente robusta y práctica (aunque no necesariamente económica). Ésta es el uso de un Vector Network Analyzer (Analizador Vectorial de Redes), o VNA.

Un Vector Analyzer (o Analizador Vectorial) es un instrumento que contiene fuentes y receptores integrados, y principalmente analiza dispositivos en términos de sus parámetros de dispersión (parámetros S). Los parámetros S son los siguientes:

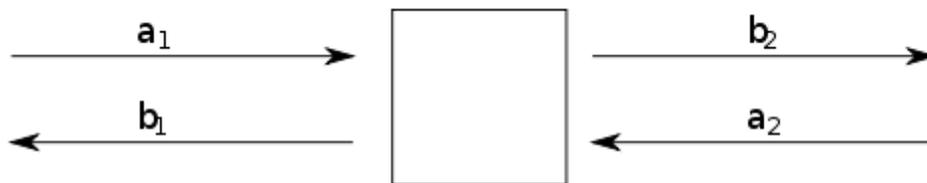


Figura 26. Representación de los parámetros S.

S11: b_1/a_1 Coeficiente de reflexión de entrada

S21: b_2/a_1 Coeficiente de ganancia

S12: b_1/a_2 Coeficiente ganancia inversa

S22: b_2/a_2 Coeficiente de reflexión de salida

donde a_1 , b_1 , a_2 , b_2 representan ondas de voltaje, y contienen información de amplitud y fase.

Al poder calcular directamente los parámetros S, no es necesario implementar un sistema más complejo, donde haya una fuente y un receptor por separado que compare las señales de entrada y salida, o para el caso del sistema near-field, que compare la señal emitida (recibida) por el probe, con la señal recibida (emitida) por el DUT. Particularmente, el parámetro de interés para esta aplicación es el S21 (o S12, depende de cual antena se configure como transmisora o receptora), ya que es el que indica la transmisión entre ambos puertos.

El Laboratorio de Ondas Milimétricas cuenta con un Vector Analyzer de la marca Keysight (modelo E8364C). Particularmente, éste modelo trabaja en un rango de frecuencias 10MHz-50GHz, posee un rango dinámico $> 100\text{dBm}$ y un piso de ruido de casi -100 dBm . Esto permite utilizarlo como fuente y receptor sin necesidad de otros elementos externos como amplificadores. Si bien el costo del instrumento es alto, fue adquirido como instrumento de uso general en el Laboratorio, lo que justifica la inversión. Una imagen se muestra en la imagen 27.



Figura 27. Vector Network Analyzer (VNA) [15].

3.1.4 Sistemas de soporte, montaje y absorbentes

El sistema near-field no está completo sin los soportes, elementos de montaje y absorbentes de microondas.

3.1.4.1 Soportes y montaje

El sistema en su totalidad ha de ir sobre un espacio físico, y ciertos componentes han de ir montados en soportes o similares. Particularmente, una de las dos antenas (probe o el DUT) va montada sobre el posicionador del scanner, y entonces la otra ha de ir montada en un riel vertical frente al scanner. Para mayor flexibilidad, el montaje sobre este riel debe ser movable, de modo de tener desplazamiento vertical, y así poder medir a distintas alturas. Además, este riel eventualmente puede ir montado sobre otro riel horizontal, agregando así la capacidad de desplazarse horizontalmente, para acercarse/alejarse del scanner.

Dado que la antena sobre el posicionador debe medir ambas polarizaciones o componentes lineales de la radiación, se debe hacer una montura sobre el posicionador del scanner, de modo de poder rotar en 90° . Para el montaje mecánico, se utilizan perfiles de aluminio, rotadores y otras piezas de Thorlabs [16].



Figura 28. Componentes varios para armar el montaje del sistema (mesa óptica, rieles, rotadores, adaptadores) [16].

La idea del montaje sería entonces:

- Un riel vertical, paralelo al plano del scanner, con un adaptador que permita montar una antena (el DUT o el probe).
- Un riel perpendicular al plano del scanner, que contenga al riel vertical mediante un adaptador, y que permite el acercamiento/ alejamiento del plano del scanner.

- c) Una montura adaptadora que permita acoplar el probe, o el DUT, al posicionador del scanner.
- d) Una mesa óptica que permita montar todos los componentes, y que mantenga sólidamente posicionados los soportes y absorba las vibraciones del scanner en movimiento.
- e) Absorbentes de microondas (en detalle a continuación).

3.1.4.2 Absorbentes de microondas

Estos elementos tienen la función de absorber gran parte de la radiación incidente sobre ellos (con rangos típicos entre 20dB-40dB). Una absorbente característico se muestra en la imagen 29.

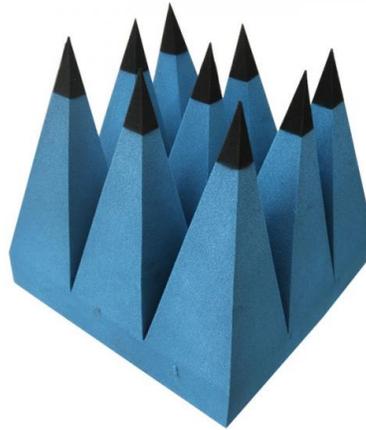


Figura 29. Absorbente de microondas [17].

En el sistema near-field, se busca acoplar los campos de la antena probe con el DUT. Pero en un enlace general (sobre todo a distancias cortas), ambas antenas reciben y re-radian todo tipo de reflexiones (ondas reflejadas por soportes, mobiliario, objetos en general o las mismas antenas), por lo que la señal recibida es una combinación de la señal deseada, junto con señales ruidosas en fase y desfase producto de reflexiones varias.

Luego, la función de los absorbentes es cubrir gran parte (si no la totalidad) de todos los elementos que puedan provocar reflexiones, que ingresen como ruido a la antena receptora, principalmente soportes metálicos, paredes, y objetos cercanos. Un sistema near-field tiene la ventaja de ocupar menos absorbente en general que un sistema far-field indoor, ya que el tamaño reducido hace necesario menos zonas a cubrir. Un sistema típico cubierto por absorbentes se muestra en la fig.29. Para el sistema a implementar se utilizan absorbentes Eccosorb VHP-NRL [17], los cuales absorben aproximadamente 40 dB de la señal incidente.

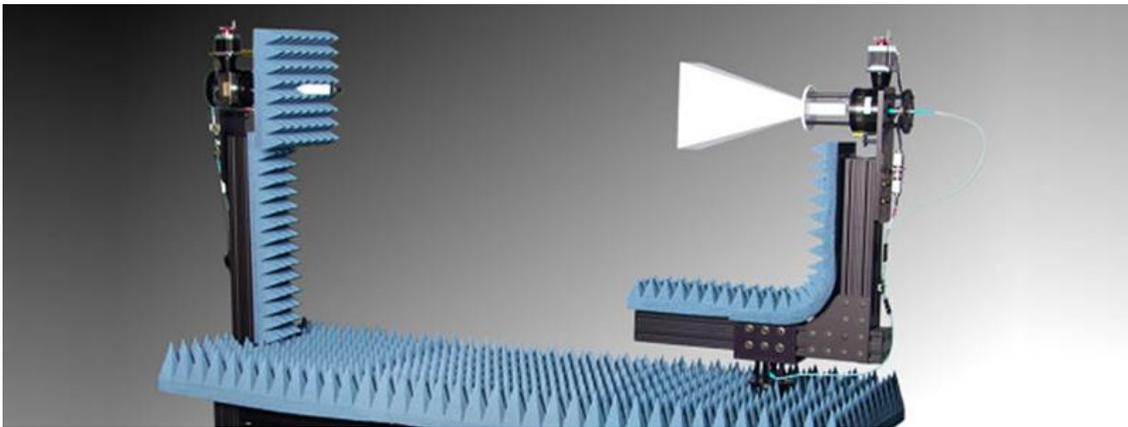


Figura 30. Sistema de campo cercano (near-field), con absorbentes de microondas cubriendo las partes metálicas del scanner y soportes metálicos [18].

3.1.4.3 Montaje del sistema

El sistema completo paso por varias iteraciones, hasta su montaje final, ya que algunos componentes llegaron en tiempos distintos, y algunos otros se agregaron después. A continuación, en las figuras 31 y 32 se muestran fotos finales del sistema completo.

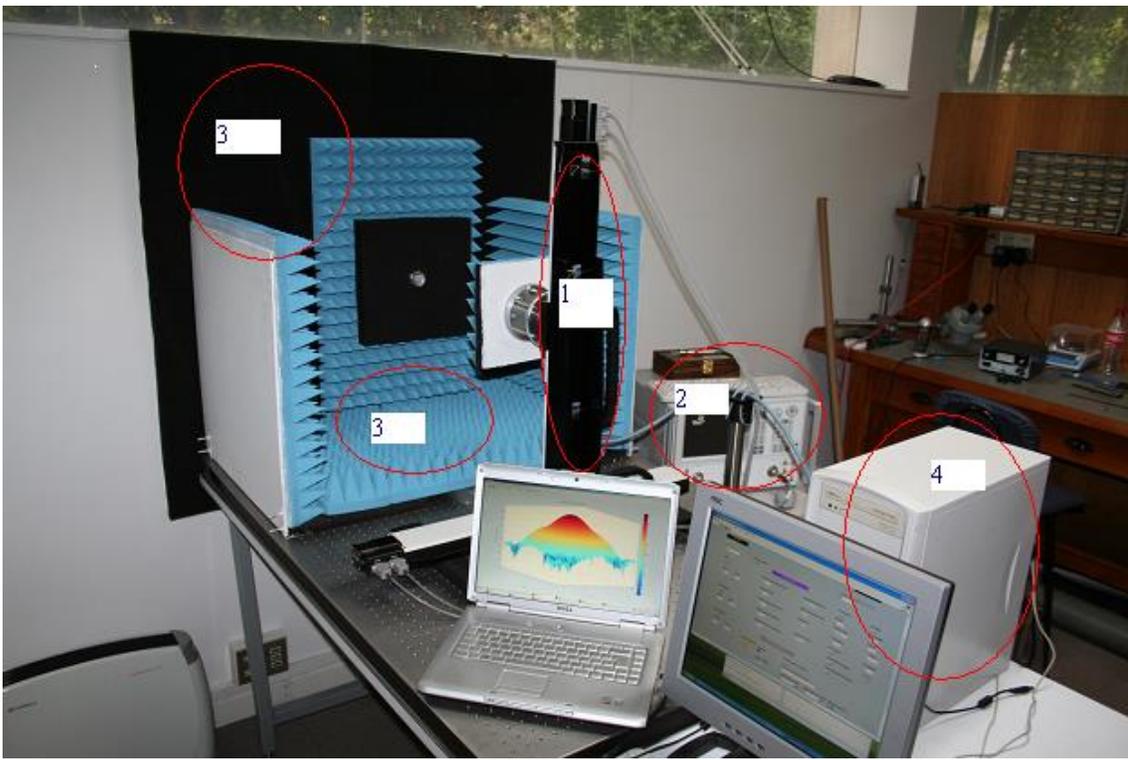


Figura 31. Sistema de campo cercano completo, en el Laboratorio de Ondas Milimétricas.

Se indican los elementos destacados en la figura 32:

- 1.-Beam scanner: Scanner plano de dos ejes, con una antena probe sujeta a la montura del eje vertical [19].
- 2.-VNA: Vector Network Analyzer [15], instrumento que genera (a través del probe), mide y almacena la radiación de nearfield del componente DUT.
- 3.-Absorbentes: absorbentes de radiación electromagnética [17].
- 4.-PC general: computador de uso general, que contiene el software de control del sistema.
- 5.-Controlador Scanner (no visible en la foto): controlador de los motores de paso del scanner, modelo NSC-G de Numark Systems [19].

Aunque no aparece señalado arriba, se ve también la mesa óptica sobre la cual se monta todo el sistema, la cual a su vez va montada sobre una mesa resistente de uso general.

En la fig.33 se muestran los otros componentes del sistema:

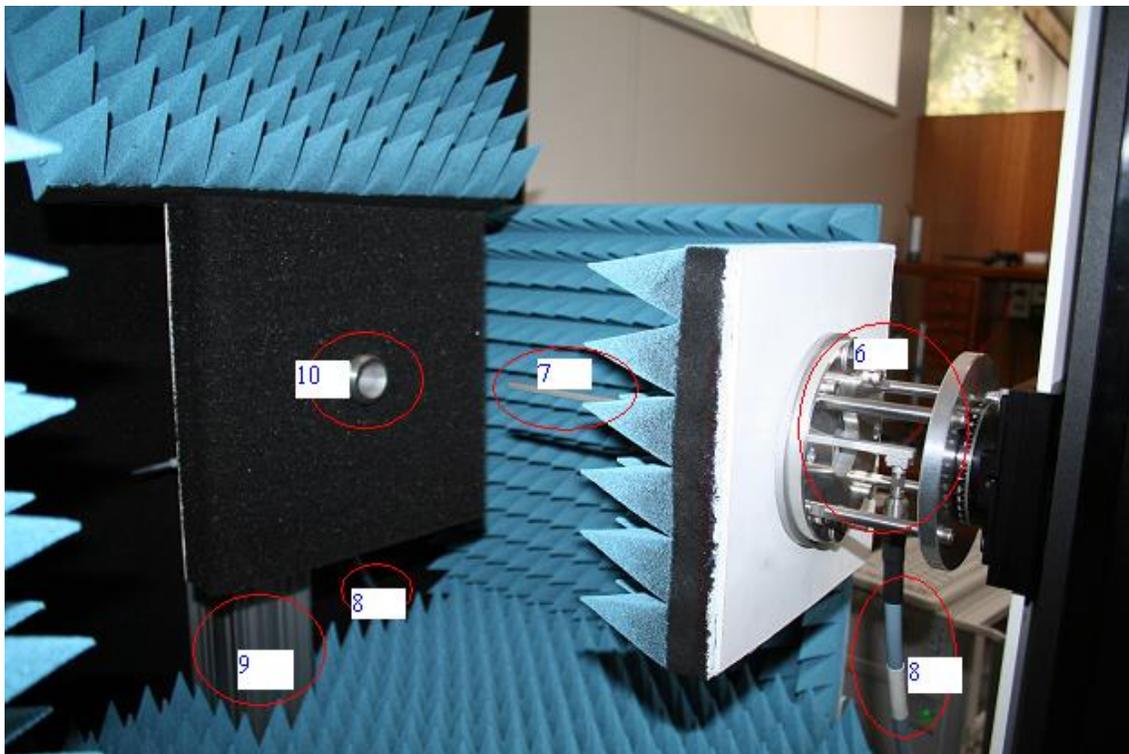


Figura 32. Componentes del Beam Scanner.

6.-Montura Probe: es la montura de la antena probe que realiza las mediciones, acoplada a un rotador manual para hacer medidas Copolar (0°) y Crosspolar (90°)

7.-Probe: antena semi-isotrópica y de conocido patrón de radiación (simulado en HFSS [20]) que transmite radiación al elemento a medir.

8.-Cables flexibles: 2x cables RF flexibles, de un largo de 2 metros cada uno, que soportan frecuencias entre los 10GHz a los 50GHz y de fase invariante manufacturados por Semflex [21], que se conectan entre a) el VNA y la antena probe y b) entre el VNA y el componente a medir.

9.-Riel de montaje: perfil de aluminio que cumplen la función de mover verticalmente el elemento a medir. Hay otro perfil bajo el absorbente inferior que puede ajustar la distancia del riel vertical al probe.

10.-Componente a medir: en este caso, se realiza una medición sobre una antena horn.

3.2 Diseño sistema de control

Dado que el escaneo del sistema consiste en medir una gran cantidad de puntos sobre una grilla discreta, y que estos puntos posteriormente se procesan para obtener el patrón de campo lejano y otros parámetros, es un proceso que debiera ser automatizado. La automatización debe hacerse a través de un software que permita disponer los parámetros necesarios para realizar la medición y que controle el scanner y otros elementos del sistema. El scanner incluye un controlador programable (en un lenguaje propietario de fábrica), el cual controla los motores en ambos rieles (horizontal y vertical), y permite programar diversas rutinas a medida. La comunicación con un computador de uso general es serial (RS-232).

Por otro lado, el Vector Network Analyzer (VNA), también incluye comandos de programación que permiten ejecutar acciones a través de comunicación serial y LAN. Dado esto, sería deseable tener un software (o varios) que permitieran controlar ambos equipos (controlador scanner y VNA), de modo de automatizar el proceso de medición lo más posible.

Para desarrollar el software de control se ha escogido Labview [22], la cual es una plataforma de programación gráfica que contiene drivers y protocolos de comunicación (además de operaciones típicas de programación) incorporados como bloques de gráficos. De esta manera la tarea de realizar aplicaciones es esencialmente elegir bloques y combinarlos de la manera que se requiera para la aplicación en particular. En las fig. 33, 34 se muestra una interfaz típica de Labview, y el código detrás de la interfaz:

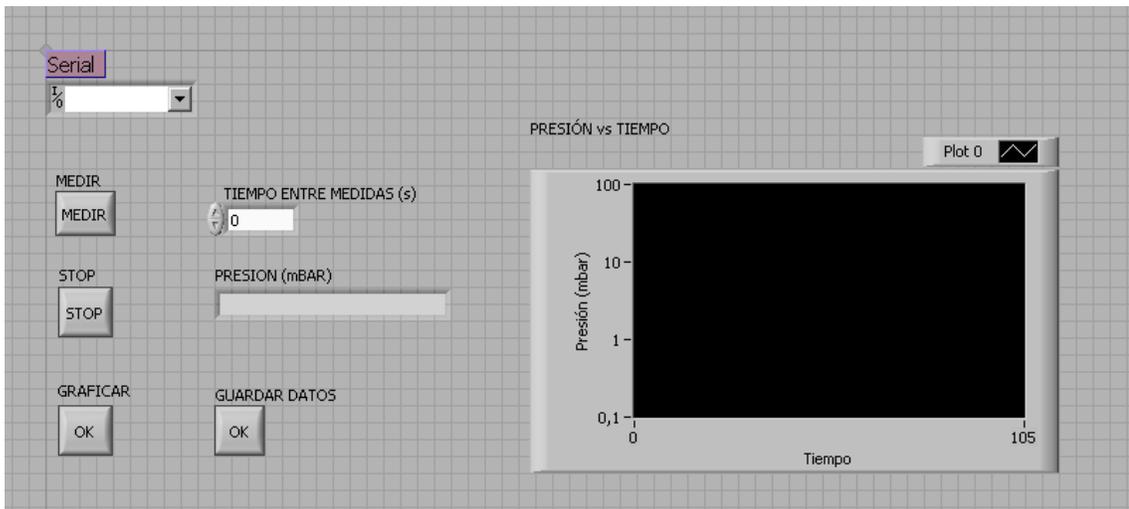


Figura 33. Interfaz de una aplicación escrita en Labview.

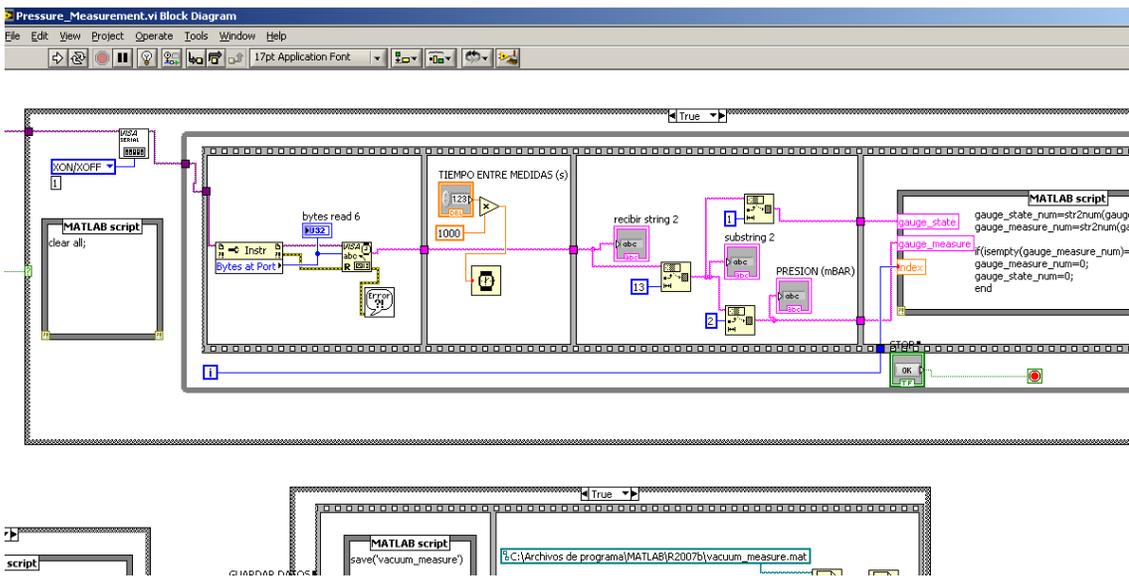


Figura 34. Parte del diagrama de bloques (bloques de programación) de la aplicación anterior en Labview.

A priori, los programas a diseñar deben contener las siguientes características:

a.- El programa debe configurarse aceptando los parámetros necesarios para la medición, además de parámetros auxiliares que permitan flexibilidad y facilidad en la operación. Algunos de estos parámetros son:

- a1) Distancia entre el scanner y el DUT
- a2) Frecuencia a la que se medirá
- a3) Angulo máximo al que se quiere obtener el far-field
- a4) Distancia de sampleo entre puntos
- a5) Delay entre medidas

b.- Dado lo anterior, el programa debe ejecutarse y realizar el proceso de medición por si solo, sin intervención manual

c.- Al finalizar, el programa debe tener almacenados los datos obtenidos, y estar disponibles para el siguiente software (el de post- procesamiento).

Teniendo estos parámetros básicos, el programa debe disponer otros parámetros derivados en el scanner y el VNA que sean consecuencias de los anteriores, tales como el tiempo total de medición o el número de puntos a medir. En la figura z se muestra la interfaz del software desarrollado (en el anexo, se encuentra el manual de uso y una explicación más detallada de cada comando).

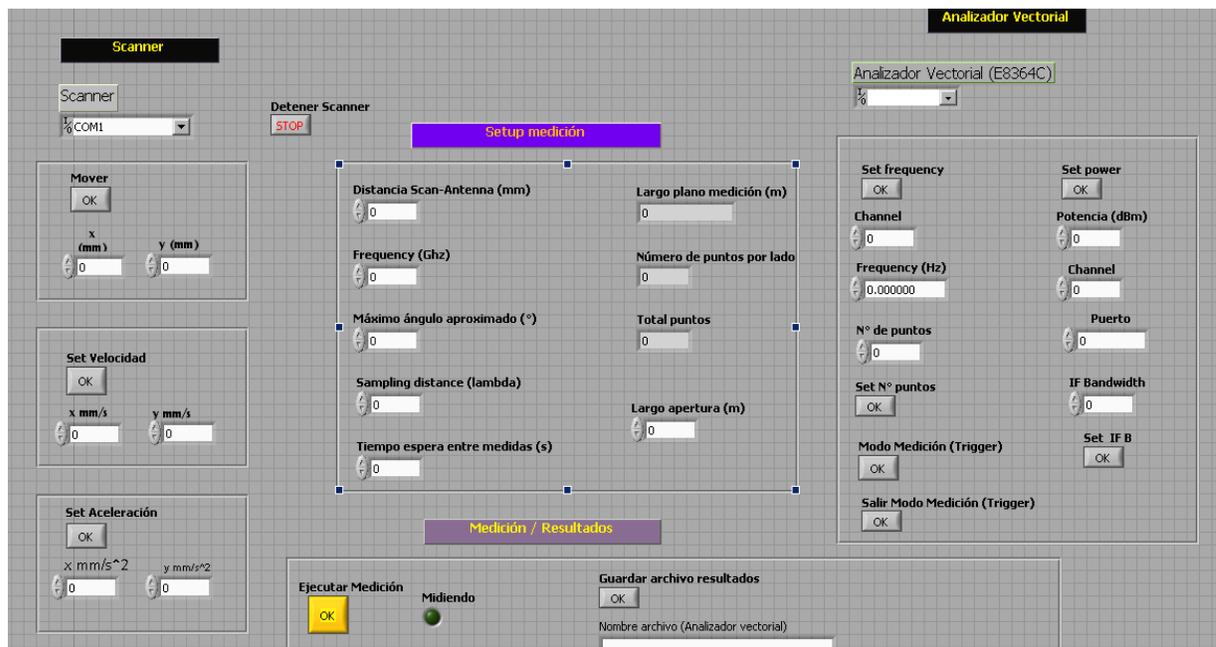


Figura 35. Interfaz gráfica del software de control del sistema de medición en campo cercano.

3.3 Diseño software post- procesamiento

Luego de tener los datos obtenidos en la medición, estos deben procesarse para obtener los patrones de campo lejano del DUT medido, junto con otros parámetros opcionales (directividad, por ejemplo).

Es necesario entonces implementar el proceso descrito en 2.4, en el que se detalla el proceso matemático por el cual es posible reconstruir el campo lejano de cierto objeto, a través de las medidas del campo eléctrico (en magnitud y fase), sobre un plano. Entonces, se hace necesario identificar los siguientes puntos:

- a). - A que corresponde el plano $E(x,y,0)$, el cual es la condición de borde de la ecuación de Helmholtz a resolver.
- b). - Como realizar la TFB (Transformada de Fourier Bidimensional)

c). - Transformar y representar correctamente los resultados obtenidos sobre los planos requeridos (X vs Y, Azimut vs Elevación, etc.)

Se analiza cada punto:

a.- El plano $E(x, y, 0)$ corresponde a los datos obtenidos del sampleo sobre el plano de medición. Es decir, cada punto medido corresponde a un cierto $E(x_i, y_i, 0)$, para cierto (x_i, y_i) . En la figura 37 se muestra la elección de los ejes de coordenadas (notar que son opuestos al plano del probe, es decir, “+X” para la antena horn es “-X” para el probe).

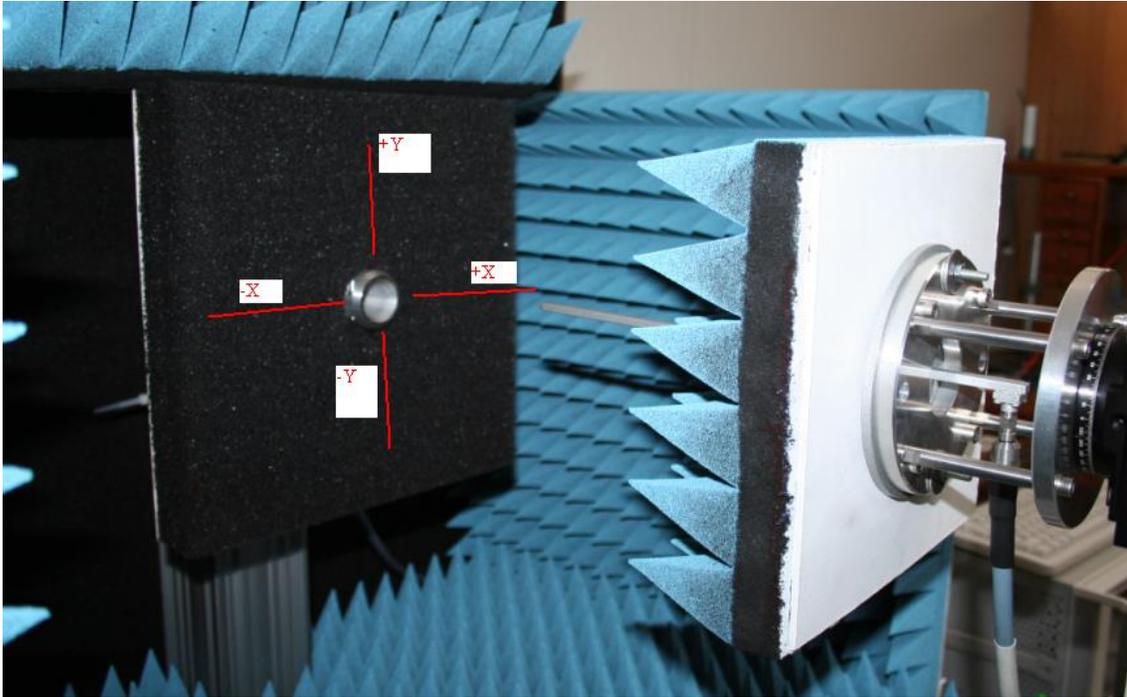


Figura 36. Sistema de coordenadas.

Como se ha dicho antes, cada punto contiene información compleja, es decir, magnitud y fase del valor medido. Particularmente, al usar el Vector Analyzer midiendo parámetros S, lo que se obtiene es un valor de amplitud relativo, y un valor de fase relativa entre ambos puertos, y no un valor de voltaje o campo eléctrico. Dado que el análisis matemático muestra que solo son importantes medidas relativas, midiendo del modo descrito es suficiente.

b.- La TFB ha de realizarse sobre los datos del plano $E(x, y, 0)$. Particularmente, los datos se arreglan como una matriz, físicamente idéntica al plano de medición (por ejemplo, el punto extremo de la dirección “+X”, correspondería al último valor de la fila media de la matriz.)

Se debe analizar cómo realizar el cálculo de la TFB en sí mismo. Dada la familiaridad con el software de cálculo Matlab [23], además de la posibilidad de integración con las aplicaciones de Labview, se escoge este software como plataforma para escribir el programa de post-procesamiento. En particular, Matlab posee rutinas ya escritas que realizan el cálculo de la TFB.

Sin embargo, la forma particular sobre las que se define cada rutina (las cuales tienen relación con la interpretación de ciertos parámetros y como entregan los resultados) hizo necesario experimentar hasta encontrar la combinación adecuada de funciones que entregaran el resultado buscado. Explícitamente, la combinación usada como TFB es la siguiente:

$\text{TFB} = \text{ifftshift}(\text{ifft2}(\text{fftshift}(u, x, y, 0))));$

en la que se combinan las funciones:

fftshift = función que mueve el punto de frecuencia espacial 0 al centro del arreglo.

ifft2 = función que realiza la Transformada Bidimensional Inversa de Fourier.

Notar que dependiendo como se defina el sentido de la función $\exp()$ en la definición de la Transformada de Fourier (i.e. con signo “+” o “-”), cambia lo que se define como Transformada Directa o Inversa. Según la convención elegida aquí, el signo “+” se asocia a la Transformada Directa. Para la definición de la función fft2 e ifft2 de Matlab, pero en cambio, el signo “+” corresponde a la Transformada Inversa, por lo que se ocupa la operación contraria para ser concordantes con la definición elegida.

c.- Finalmente, es necesario analizar de qué forma se presentarán los datos finales. Notar que la operación de TFB se realiza sobre el plano X-Y, y por tanto lo que se obtiene son, finalmente, las componentes x, y, z del campo E.

Al tener las coordenadas E_x , E_y , E_z , es posible realizar la transformación a coordenadas esféricas, (E_θ , E_ϕ , E_r). Sin embargo, dado que principalmente interesa obtener las polarizaciones lineales del DUT a medir, las componentes esféricas no son las más apropiadas, ya que a medida que se mueven sobre θ o ϕ , vectorialmente no apuntan hacia donde la polarización lineal lo hace.

Para este caso, y para ser concordante con los componentes que usualmente interesa medir en elementos con polarizaciones lineales, se definen las coordenadas Ludwig III (el caso Ludwig I corresponde a base cartesiana, y Ludwig II contiene dos formas distintas de Azimuth sobre Elevación y viceversa). La relación entre las coordenadas esféricas, y las coordenadas Ludwig III (llamadas convenientemente, Copolar y Crosspolar, en el mismo sentido de la definición usual de polarización en antenas), es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} E_{co} \\ E_{cross} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_\theta \\ E_\phi \end{bmatrix}$$

Las componentes $E_{copolar}$ y $E_{crosspolar}$ mantienen la orientación de la polarización lineal a medida que se mueven sobre los planos θ y ϕ . Particularmente, los vectores base se relacionan como:

$$\hat{e}_{\text{cross}} = \hat{e}_r \times \hat{e}_{\text{co}}$$

$$\hat{e}_{\text{co}} \cdot \hat{e}_{\text{cross}} = 0$$

Y el campo \mathbf{E} se expresa como:

$$\underline{E} = E_{\text{co}}\hat{e}_{\text{co}} + E_{\text{cr}}\hat{e}_{\text{cr}}$$

lo que es concordante con la utilización de las componentes Copolar y Crosspolar para definir antenas y otros elementos con polarización lineal. Para ver las diferencias gráficamente, se ilustran las componentes vectoriales de varios sistemas de coordenadas en las figuras 37, 38 y 39.

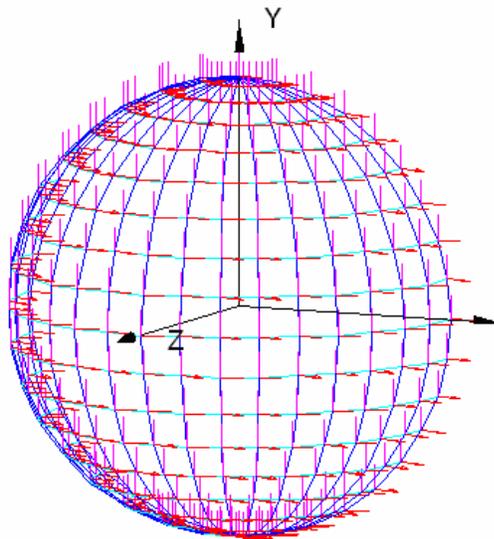


Figura 37. Componentes vectoriales en la base cartesiana.

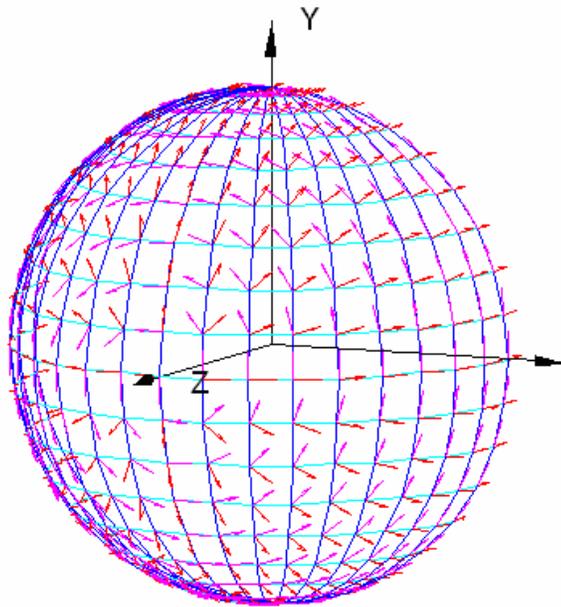


Figura 38. Componentes vectoriales en la base Polar-Esférica (sobre θ y ϕ).

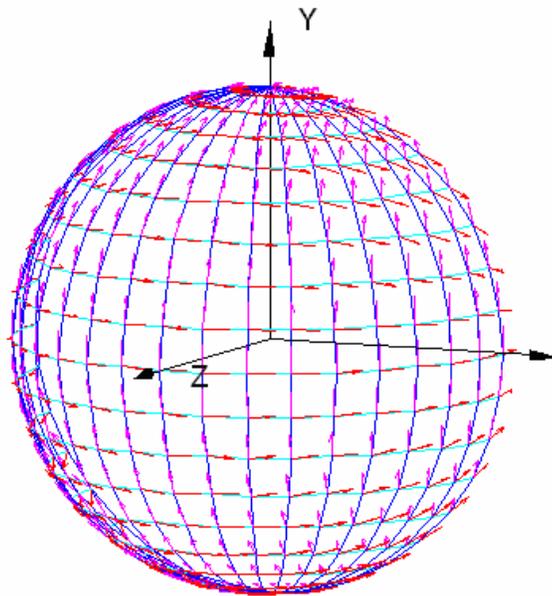
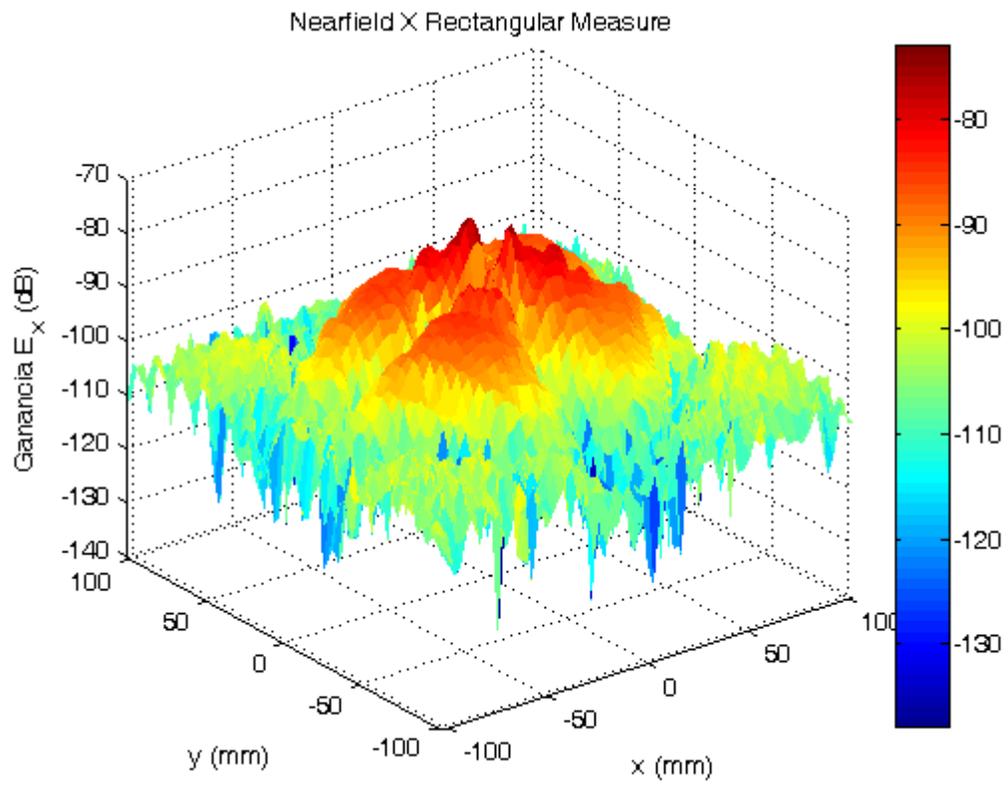


Figura 39. Componentes vectoriales en la base Ludwig III. Copolar y Crosspolar.

Luego de incorporar los 3 puntos anteriores, se escribió un script en Matlab que, a través de los datos de la medición, obtiene las componentes Copolar y Crosspolar del campo E. El script está contenido en el mismo software de control del sistema, de modo que se ejecutan los resultados desde ahí mismo. A modo de ejemplo, en las figuras 40, 41, 42 y 43, se ilustran los gráficos incluidos que se obtienen de ejecutar el script, para una medición de la antena horn de Banda 1, a 45 GHz.



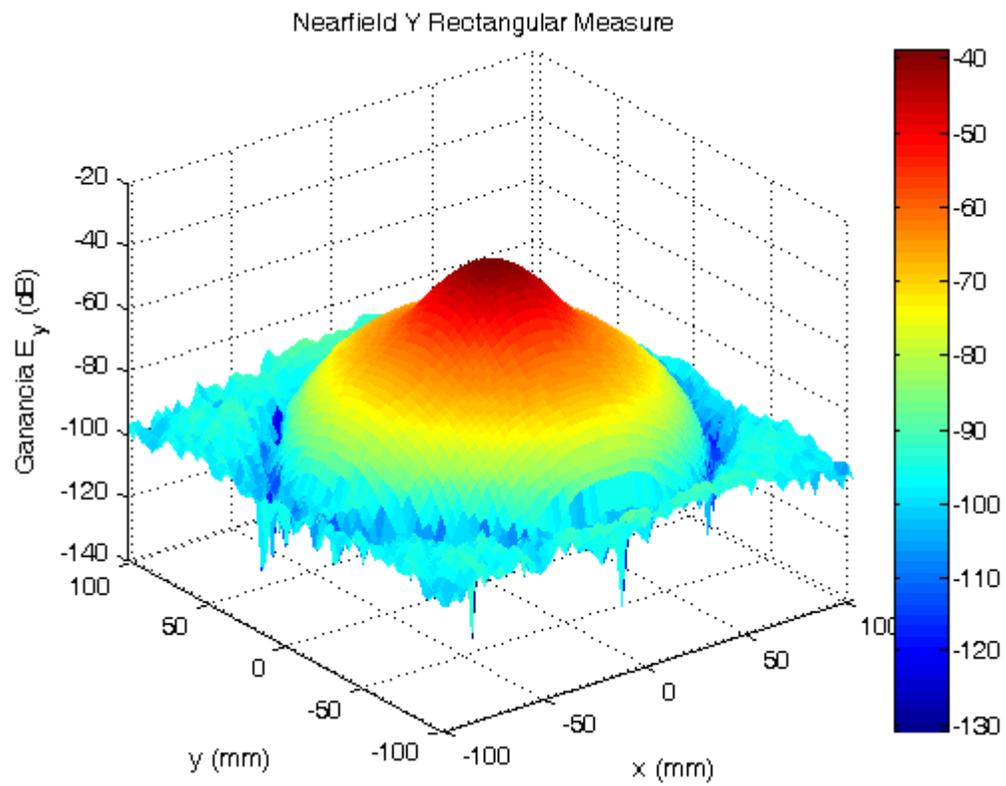


Figura 40. Gráficos del software de post-procesamiento correspondientes a una medida directa (sin normalizar). Patrón Crosspolar. (arriba) y Patrón Copolar (abajo).

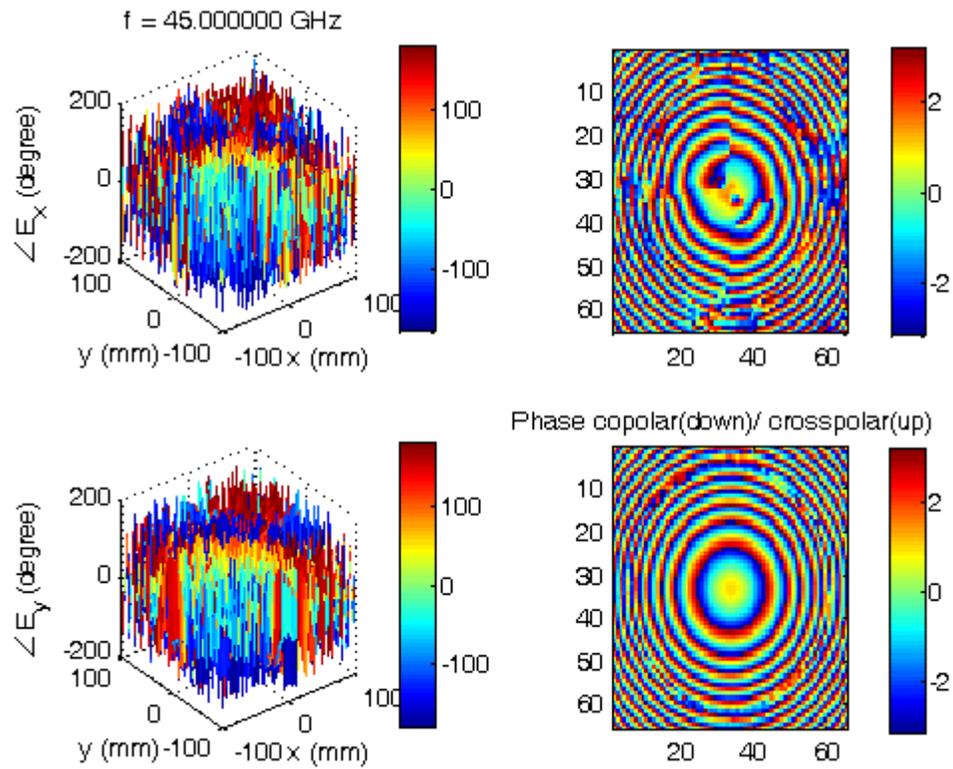


Figura 41. Fase relativa para los componentes Y y X, medida directamente (lado derecho del gráfico, vista frontal y ángulo en radianes).

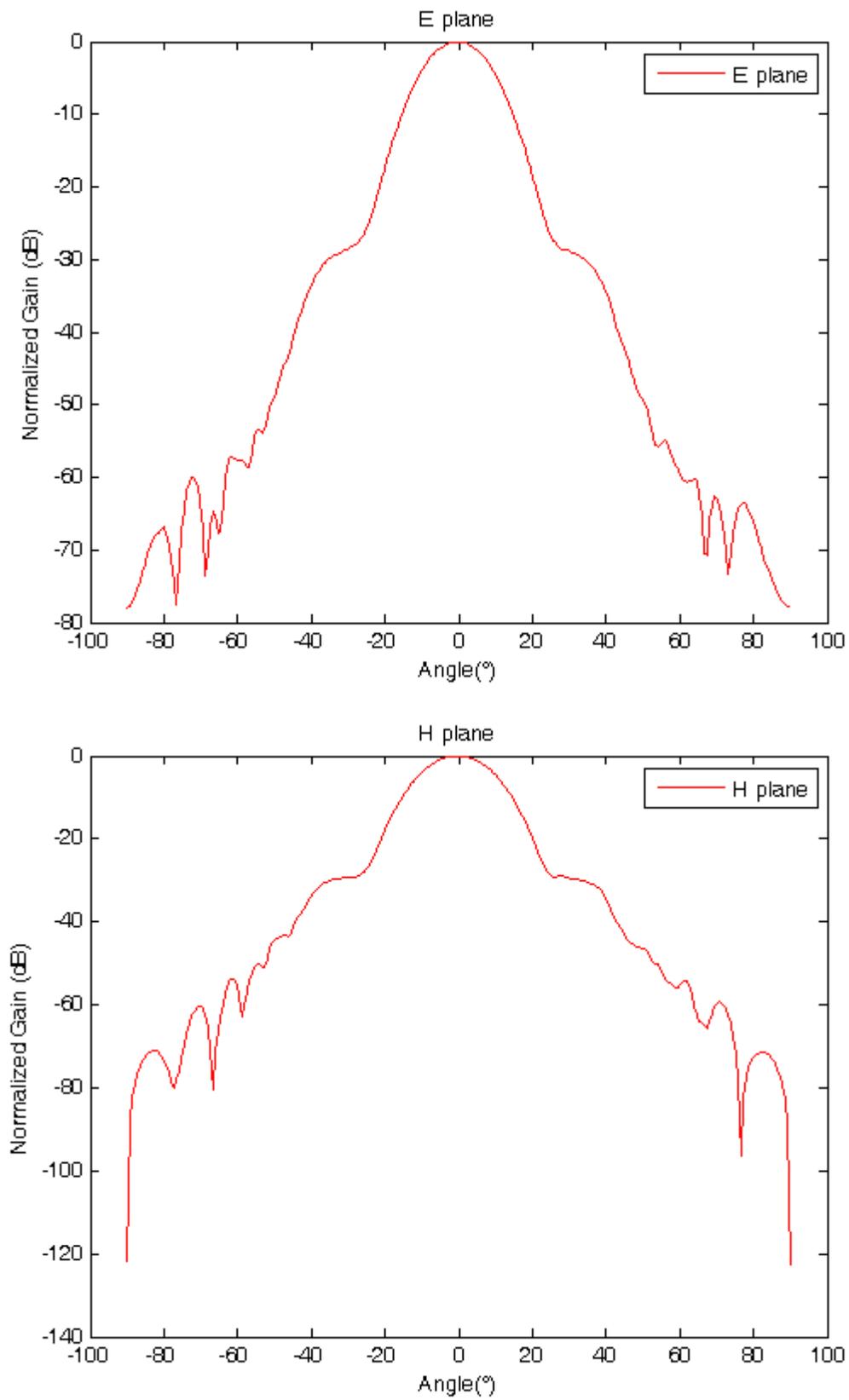


Figura 42. Patrón de radiación en el far-field, en los planos E y H.

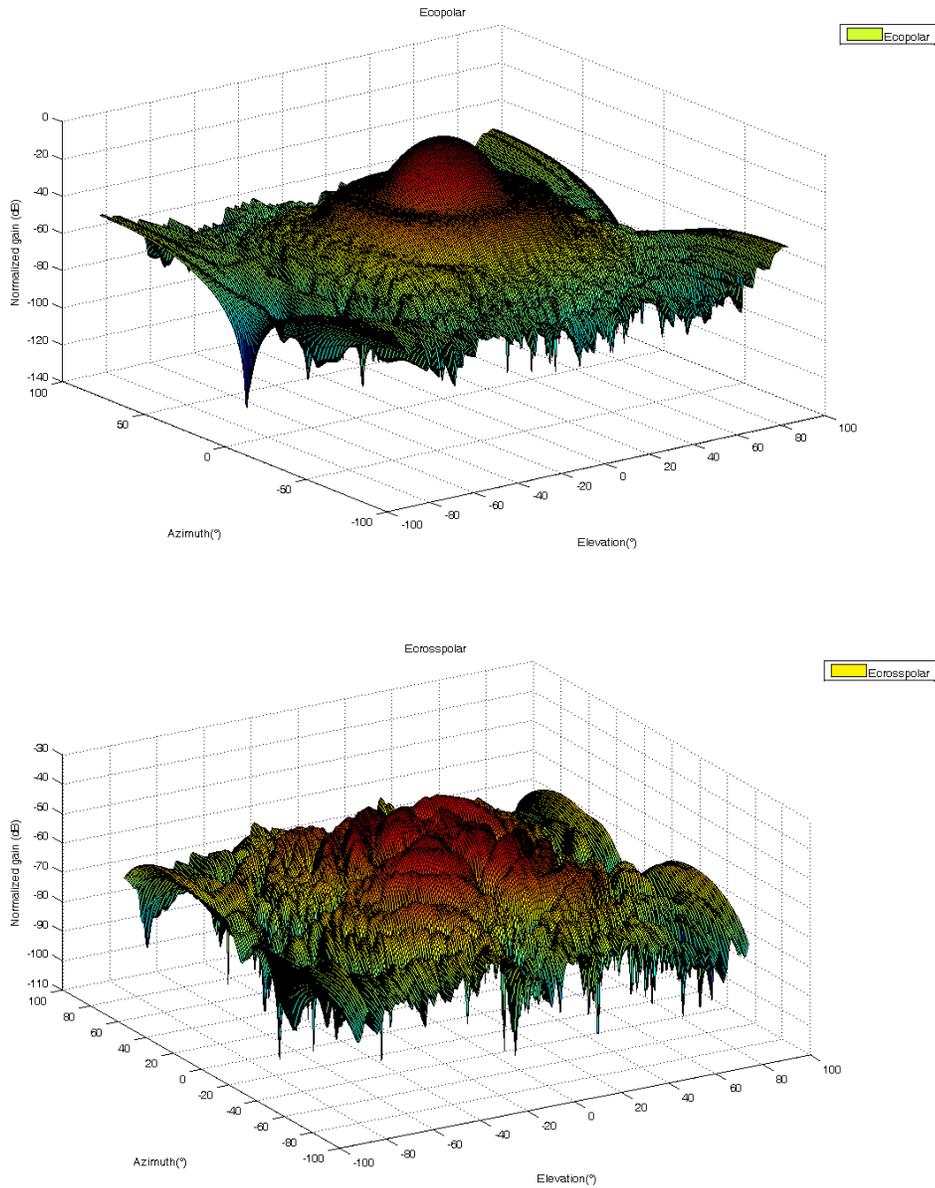


Figura 43. Patrón de radiación tridimensional, Azimuth vs Elevación, de las componentes Copolar y Crosspolar (Crosspolar normalizado respecto a Copolar).

Para una explicación completa del funcionamiento del software de control, la configuración del sistema y el proceso de medición, ver el anexo “Manual Beam Scanner”. También en los anexos se encuentra el código completo en Matlab para el post-procesamiento de los datos.

4. Análisis y resultados experimentales del sistema

El sistema completo se fue testado en distintas etapas. Durante la fase inicial estas pruebas se realizaron con una antena horn piramidal disponible en el laboratorio. A través de las mediciones, se fueron corrigiendo tanto los métodos de control, como el script de procesamiento de los datos, a la vez que se iban acumulando observaciones y sugerencias con respecto al experimento y los cuidados antes de realizar una medición.

4.1 Resultados medición horn piramidal

En las figuras 44 y 45 se muestran los resultados obtenidos al medir el horn piramidal. Como comprobación, los patrones de radiación fueron simulados en el software HFSS. Notar que en ambos casos, la concordancia entre experimento y simulación es excelente para ángulos de elevación menores a 30° . En este caso, las pruebas de medición se hacían con ángulos pequeños (aproximadamente entre 25° - 30°), lo que explica que, a partir de ese ángulo, las líneas ya no muestren la misma proximidad que antes (debido a que el sistema está diseñado para medir y reconstruir con precisión el patrón de campo lejano hasta 25° - 30° respecto a la referencia angular).

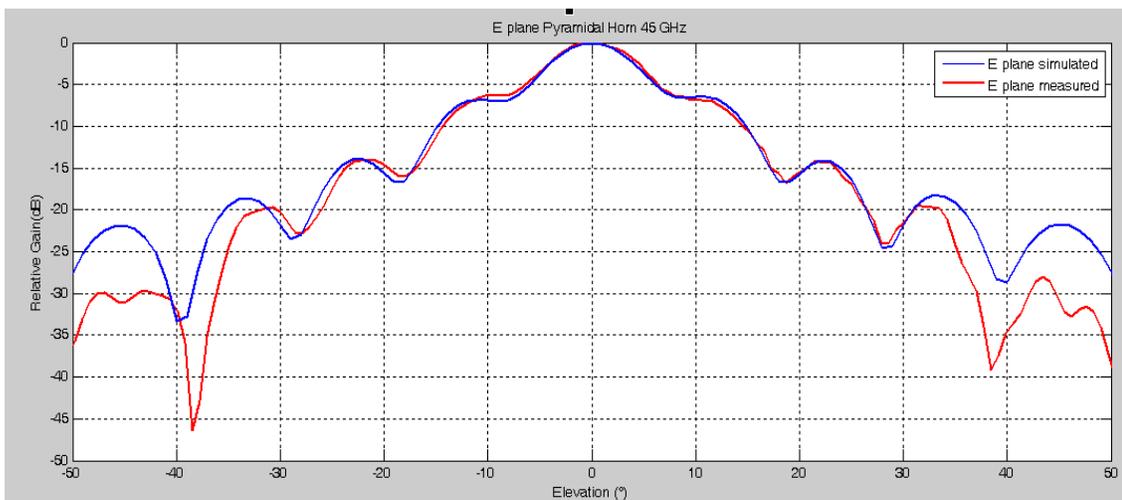


Figura 44. Plano E simulado vs medido.

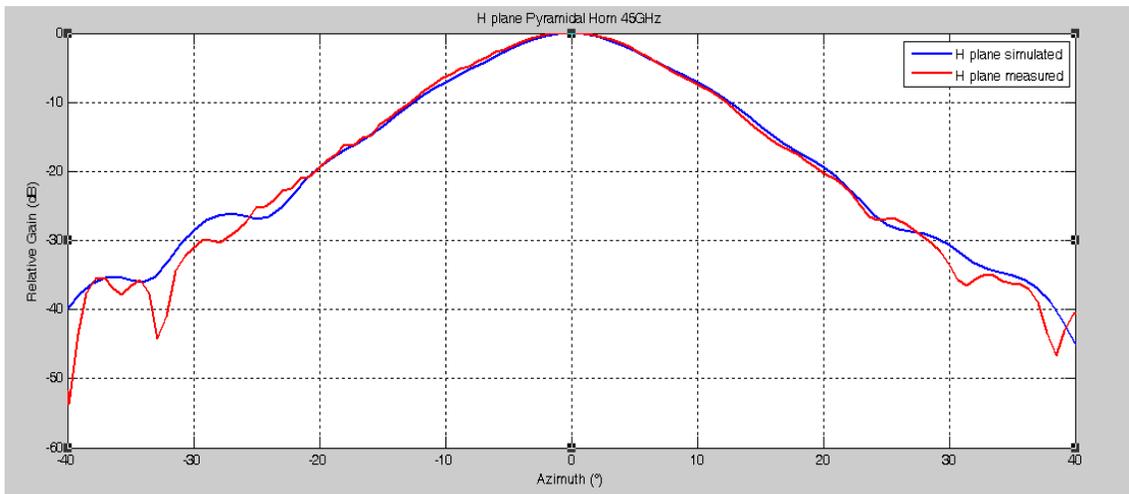


Figura 45. Plano H simulado vs medido.

En las figuras 46, 47 y 48 se muestran el patrón tridimensional Copolar medido, simulado y la diferencia entre ambos. Notar que las diferencias se producen principalmente para ángulos $> 30^\circ$ como se vio antes. Esto queda refrendado en la figura 50, que muestra las diferencias entre ambos patrones. Es claro que, en una región significativa, las diferencias están en torno a los 0 dB.

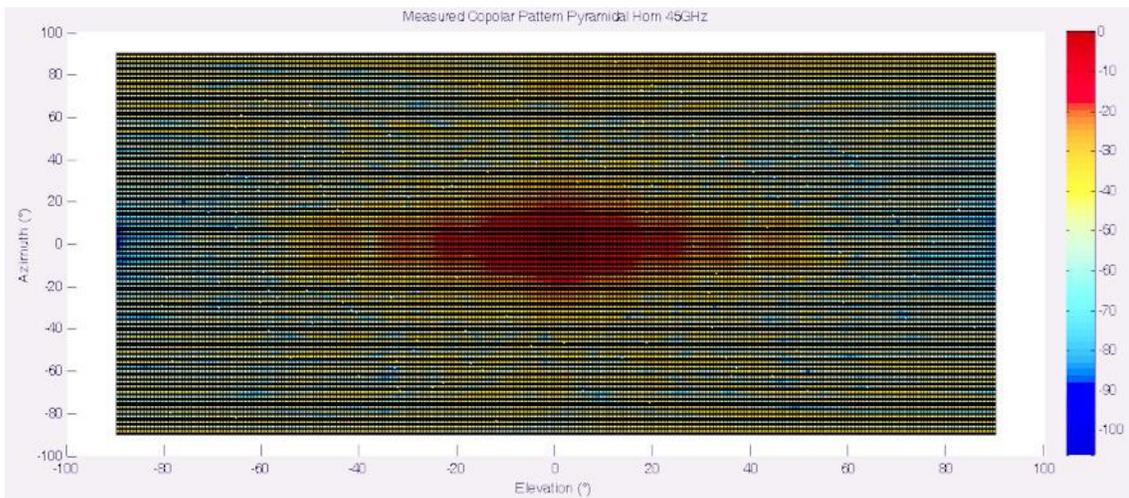


Figura 46. Patrón tridimensional Copolar medido.

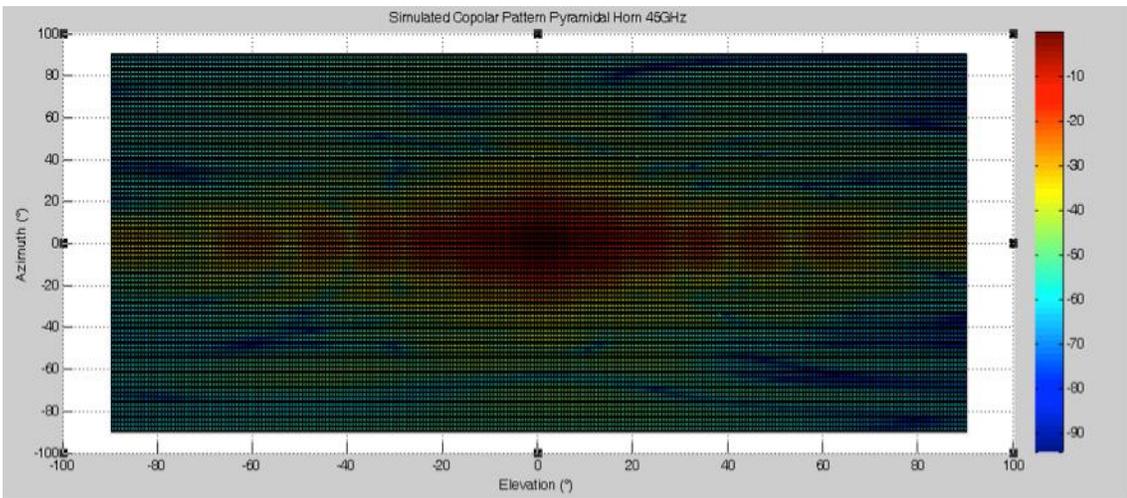


Figura 47. Patrón tridimensional Copolar simulado.

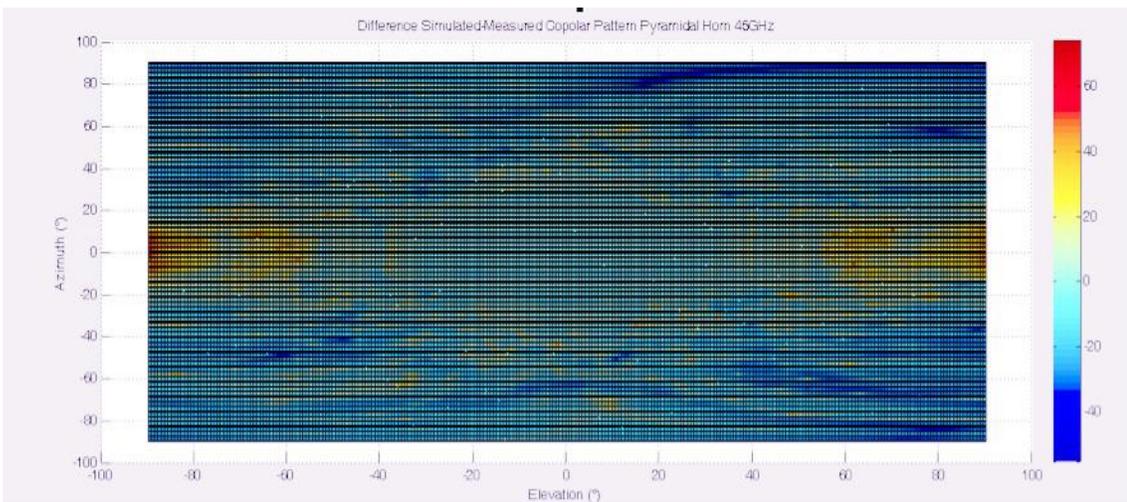


Figura 48. Diferencia Patrón tridimensional Copolar simulado y medido.

La figura 49 es interesante, ya que muestra la proyección holográfica del campo sobre la apertura del horn. En el contexto de antenas o de medidas en el near-field, se entiende por holografía la propagación de un plano medido en cierto punto hacia otro punto arbitrario. Particularmente, es interesante trasladar el plano hasta la apertura de la antena (ya que se conoce la distancia entre el scanner y la antena medida). De esta manera es posible comprobar anomalías o verificar el campo eléctrico en la apertura de esta. En este caso, se ve claramente que existe una zona rectangular, la cual corresponde al campo eléctrico en la apertura del horn utilizado.

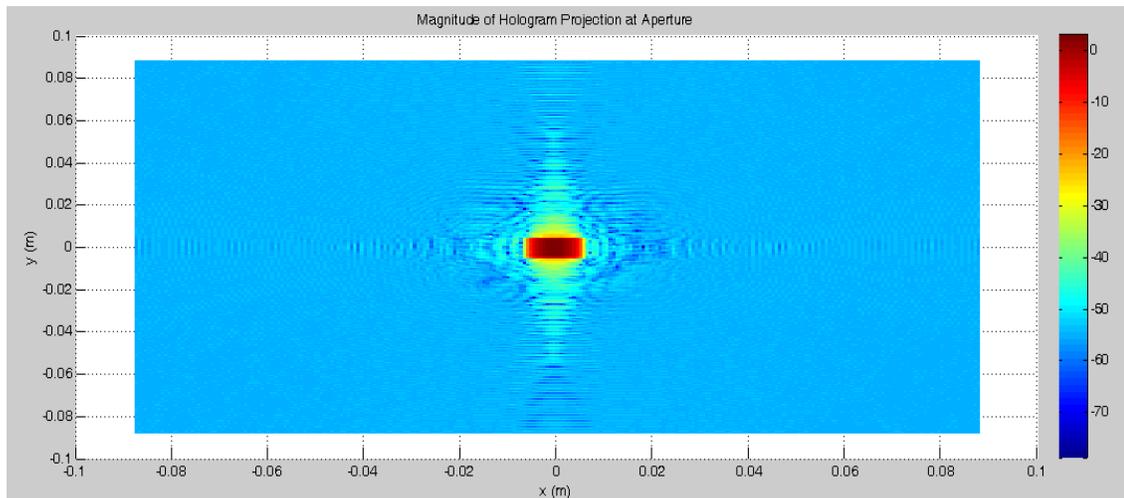


Figura 49. Proyección holográfica en la apertura del horn.

Lo anterior se explica mediante la siguiente ecuación (usando la terminología de 2.4):

$$u(x, y, z) = \mathfrak{S}^{-1} \left\{ \mathfrak{S} \{ f(x, y, z = 0) \} e^{-jk_z z} \right\}$$

Luego, desplazar el plano de medición hacia cualquier otra posición, en el dominio de Fourier es solo un cambio de fase, y entonces sabiendo la distancia “z” entre el scanner y la apertura de la antena, se puede obtener fácilmente la distribución de **E** en la apertura de la antena.

Se debe mencionar que para este horn se midió principalmente la componente “Y” (la que permite en gran medida obtener la componente copolar del campo), por lo que no se tomaron mayores datos de la componente crosspolar, para comparar con alguna simulación. Esto debido a que el sistema se estaba probando en varios ámbitos y se le dio preferencia a una medida que entregaba resultados claros y fáciles de verificar.

A través de la experiencia de medir el horn piramidal, se acumuló bastante conocimiento práctico en relación a cómo obtener medidas buenas y repetibles en el tiempo. Algunas lecciones para tener en cuenta son:

1.- El parámetro que más influencia tiene en las medidas finales es la flexión del cable que conecta el probe con el VNA. Esto se debe a que una flexión brusca o variación repentina de posición del cable, produce cambios relativamente grandes de fase, por lo que las medidas que se estén tomando en ese momento se verán afectadas. Dado que cada dato individual se convoluciona con todos los demás, al transformar a campo lejano, un error puntual se propaga a todo el resto del plano a reconstruir. Ya que este cable se mueve constantemente entre puntos, se deben tomar ciertas medidas, como:

- a) Sabiendo a priori el largo del plano a escanear, verificar la disposición del cable y comprobar que, durante el escaneo, puede recorrer de extremo a extremo del plano, sin sufrir una flexión brusca, u otra situación que implique un variación abrupta de la tensión

ejercida sobre él o de su posición (como chocar con un obstáculo, algún soporte, etc.). Para esto, se puede llevar el posicionador hasta las esquinas del plano de medición, y realizar un escaneo “en vacío” (sin tomar medidas), solo para comprobar que el cable no sufrirá desplazamientos ni movimientos bruscos durante el movimiento.

Se debe tener especial precaución en escaneos a frecuencias menores, o con ángulos grandes, ya que obviamente el cable estará más expuesto a flexionarse o cambiar de posición bruscamente en los extremos.

- b) Usar la función de delay entre medidas al escanear. Como el scanner está partiendo y frenando a cada medida puntual, el cable puede quedar oscilando durante la toma de una medida. Si se ajusta el delay entre medidas de modo de permitir que se amortigüe el movimiento del cable, las mediciones saldrán como si el cable no se hubiera movido.

A frecuencias menores, el paso de sampleo es mayor, por lo que el cable tiene mayor tendencia a oscilar en estos casos. Como referencia, se encuentra que un delay de aproximadamente 1.5 s entre medidas, es suficiente en el caso de los escaneos a frecuencias menores, y a frecuencias mayores, un tiempo de 0.5-0.8 s suele ser suficiente.

2.- Una buena distancia scanner- DUT es de aproximadamente de 7 a 8 λ . A menores distancias, el ruido por reflexiones aumenta progresivamente. A mayores distancias, la potencia naturalmente disminuye, por lo que el rango dinámico de la medición también disminuye. Sin embargo, a menores frecuencias (31 GHz, por ej.), al ser el patrón menos directivo, hace necesario de por sí que el patrón se mida a 10 λ aproximadamente.

4.2 Resultados medición horn circular

El horn circular es la antena que se utilizara en el prototipo del receptor de Banda 1. A continuación se muestran los resultados principales. De las varias mediciones que se hicieron con el horn circular, se muestran las mediciones utilizadas en la publicación [24].

4.2.1 Medidas de Amplitud

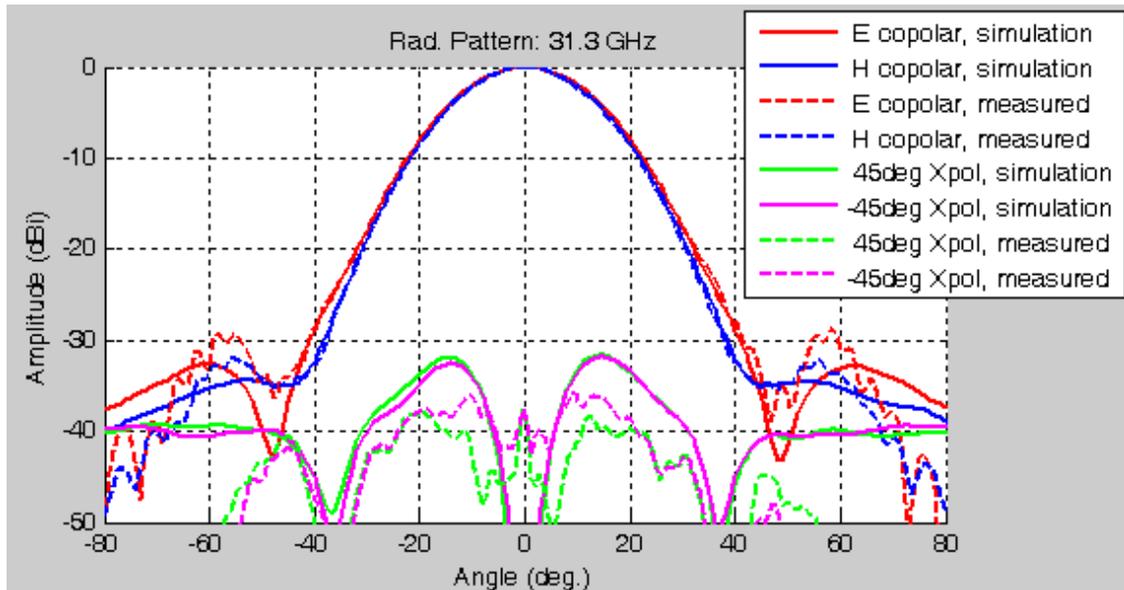


Figura 50. Patrón de radiación medido vs simulado a 31.3 GHz.

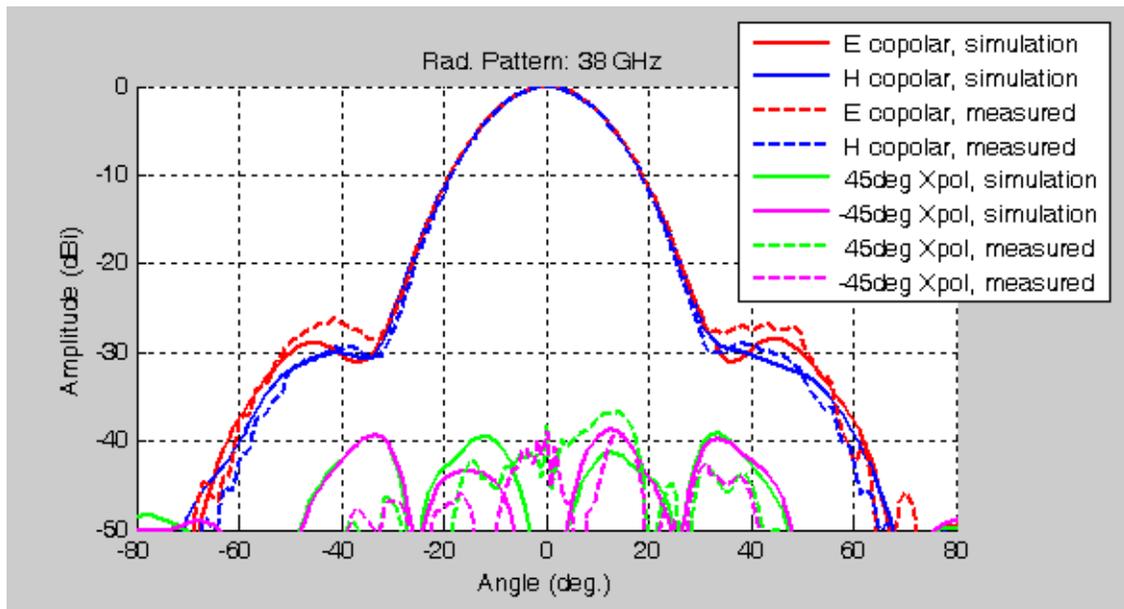


Figura 51. Patrón de radiación medido vs simulado a 38 GHz.

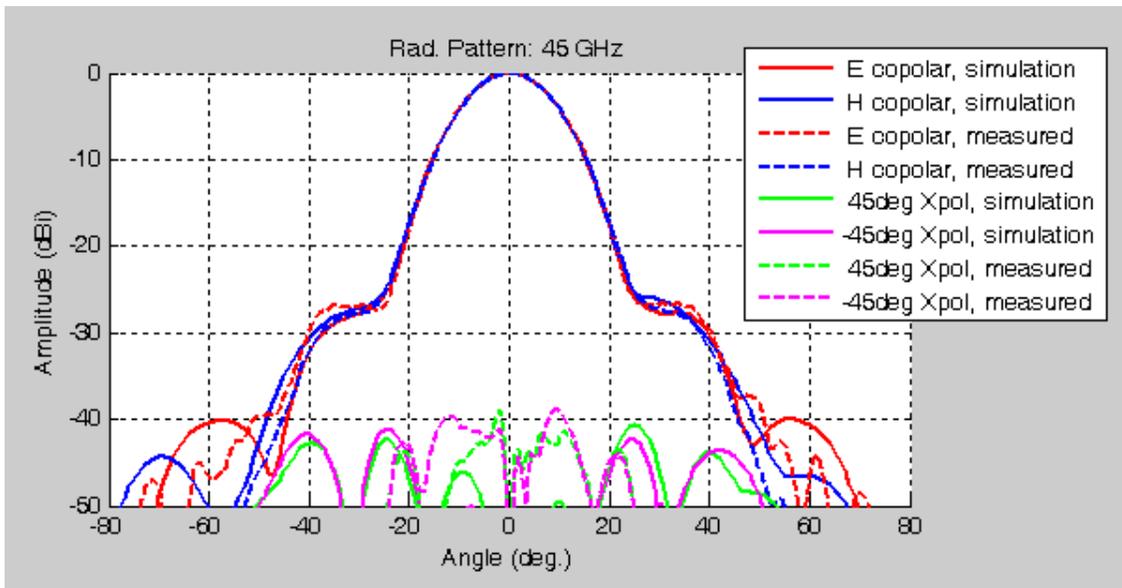


Figura 52. Patrón de radiación medido vs simulado a 45 GHz.

Para las tres frecuencias medidas y presentadas en las figuras 50, 51 y 52, se puede ver que hay gran concordancia entre los planos simulados y los medidos, al menos hasta el primer sidelobe (que es aproximadamente el máximo ángulo elegido en la medición para el cual se reconstruye el patrón).

4.2.2 Medidas de fase

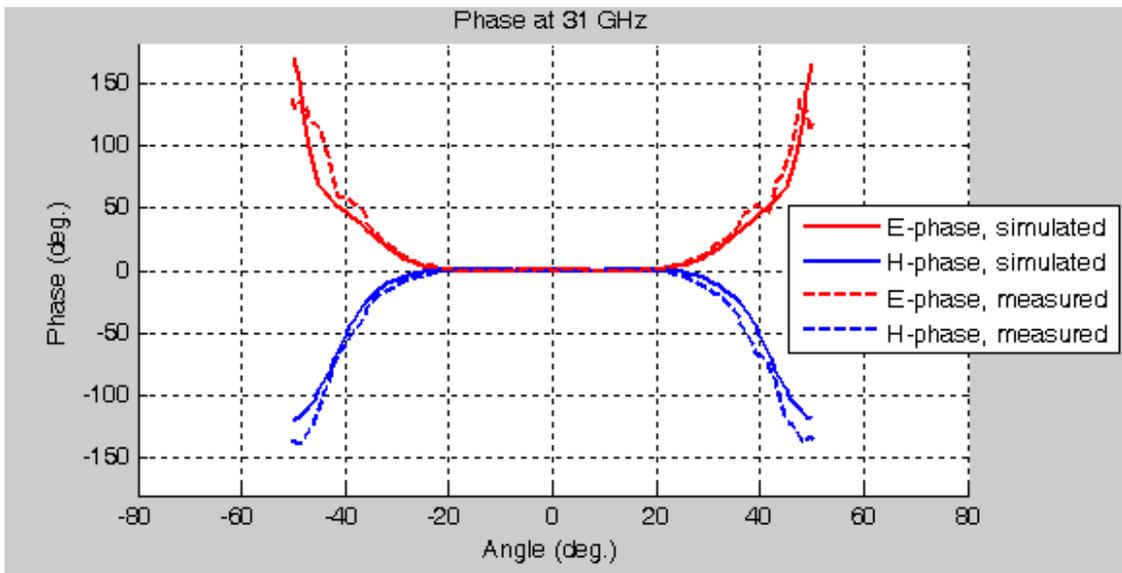


Figura 53. Patrón de fase medido vs simulado a 31 GHz.

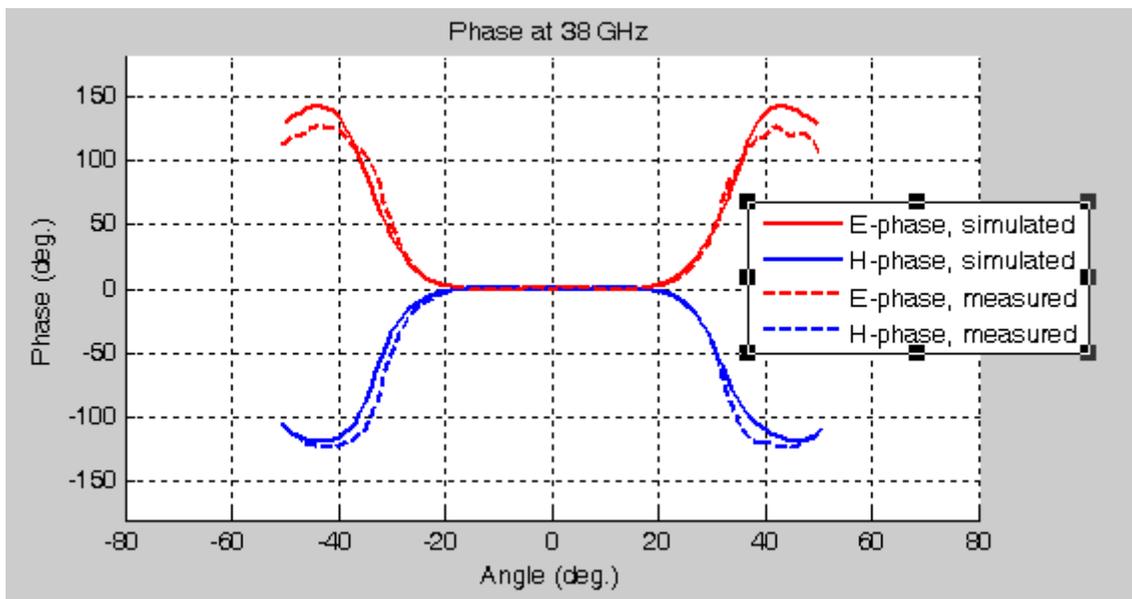


Figura 54. Patrón de fase medido vs simulado a 38 GHz.

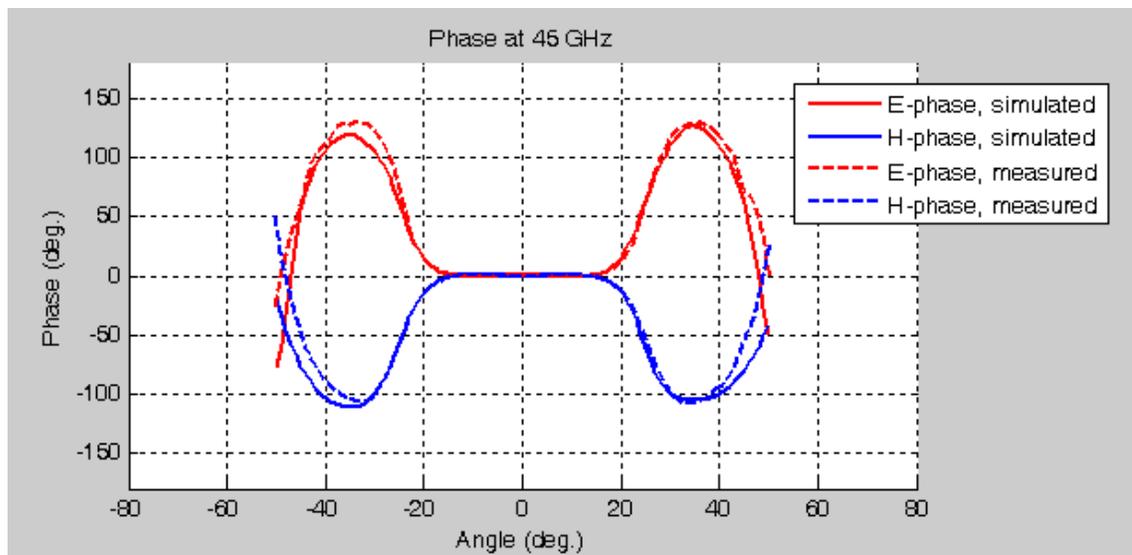


Figura 55. Patrón de fase medido vs simulado a 45 GHz.

El horn también ha de cumplir con un patrón de fase en particular. Este patrón no se obtiene directamente de los datos en campo lejano, ya que el centro de fase del patrón de radiación toma como referencia la distancia entre la antena caracterizada y el probe. Por tanto, se deben procesar los datos de modo de referenciar el centro de fase al centro de la antena medida. Para ello se implementa un algoritmo sugerido por [25], el cual encuentra, a través del patrón de campo lejano en magnitud y fase, y mediante optimización, el centro de fase del dispositivo medido. De esa manera es posible referenciar los datos a ese punto. El código implementado se detalla en los anexos.

Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 53,54 y 55. Hay una gran concordancia en todos los casos entre el patrón de fase medido y simulado, al menos dentro de la región de fase plana, que es la de mayor importancia en la operación del horn.

4.3 Medida del lente + horn

Adicionalmente a las medidas sobre el horn, se mide también la combinación lente de microondas y horn. Particularmente, este lente va antes del horn en el receptor de Banda 1, y tiene como función acoplar de forma más eficiente, el haz del horn al del subreflector de las antenas Cassegrain de ALMA. Más información sobre este lente se encuentra en la publicación [26].

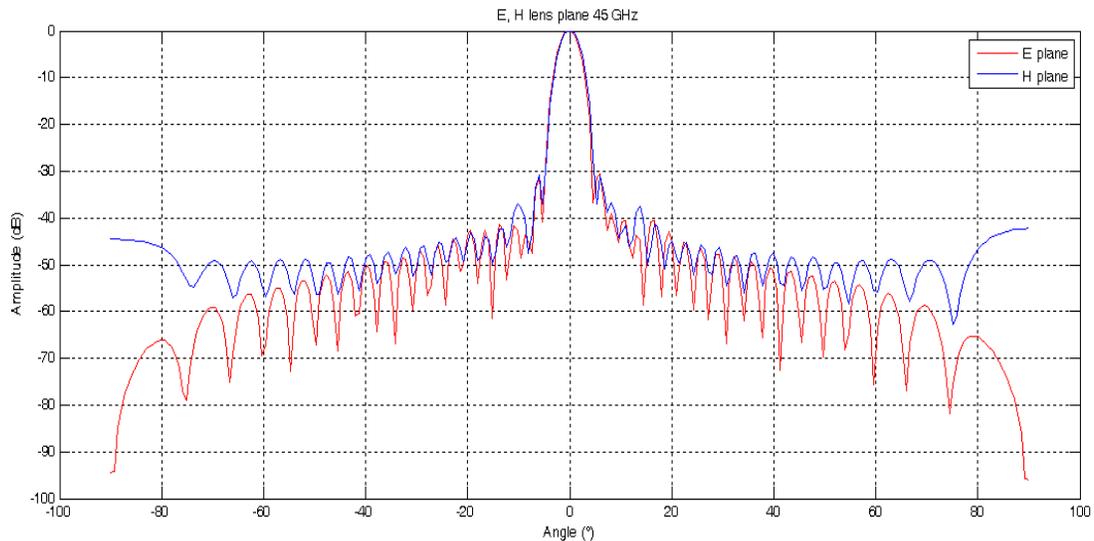


Figura 56. Planos E y H de la combinación lente + horn.

Los principales resultados se muestran en las figuras 56 a 62. Notar que el ancho del lóbulo principal (para todas las frecuencias medidas) en ambos planos disminuye considerablemente respecto al del horn por si solo, ya que el objeto del lente es disminuir la divergencia del haz del horn, y de este modo acoplar gran parte de la potencia al sub-reflector de la antena de 12 metros.

En la figura 57 se muestra la fase medida de la combinación lente y horn. Notar que la fase es esencialmente constante, lo que indica que el lente no deforma la fase de manera significativa, y entonces cumple la función de cambiar la forma del haz sin afectar la fase de este.

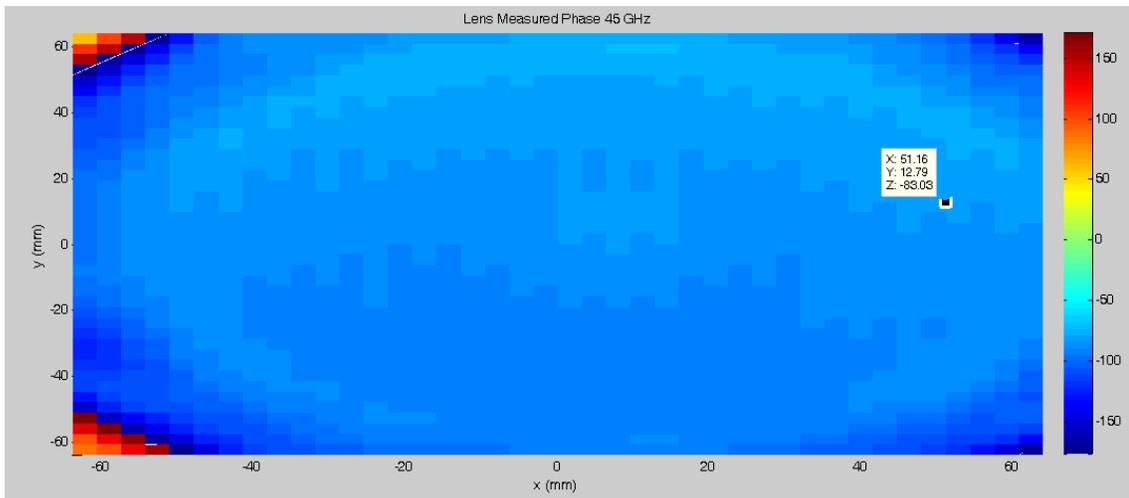


Figura 57. Fase directa medida de la combinación lente + horn a 45 GHz.

También se muestran los resultados para las otras frecuencias medidas (31GHz y 38 GHz) en las figuras 58 a 62. Se obtuvieron resultados equivalentes al anterior. En la medida a 38 GHz, el lente probablemente no estaba completamente paralelo a la apertura del horn, lo que se ve en cierta diferencia entre la parte superior e inferior.

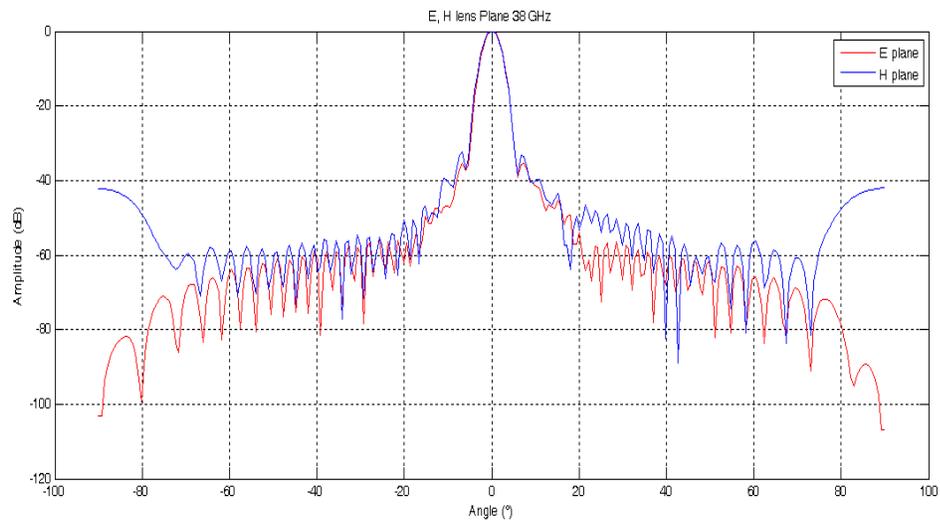


Figura 58. Planos E y H de la combinación lente + horn a 38 GHz.

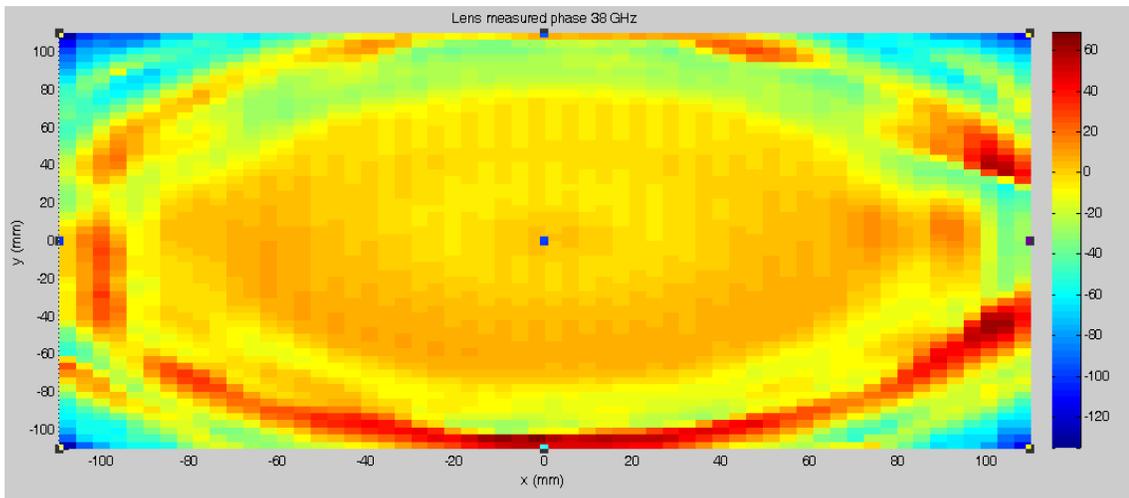


Figura 59. Fase directa medida de la combinación lente + horn a 38 GHz.

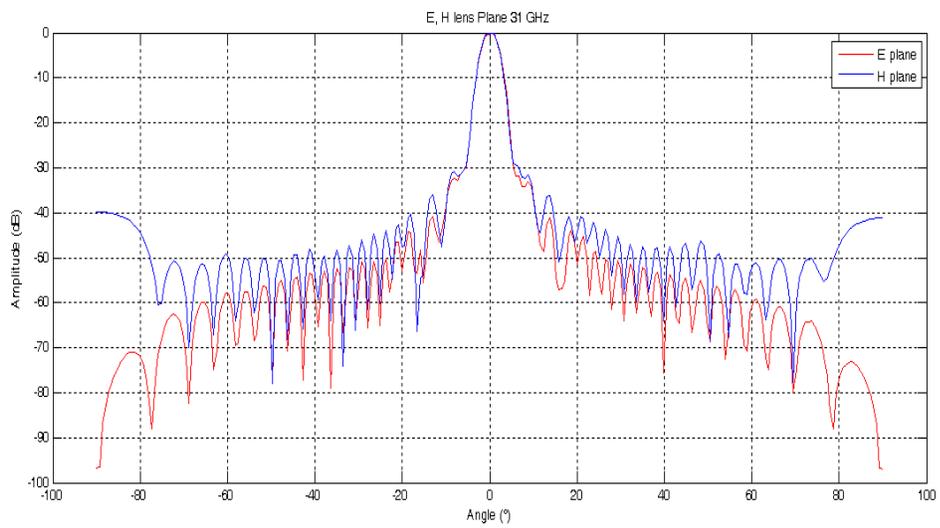


Figura 60. Planos E y H de la combinación lente + horn a 31 GHz.

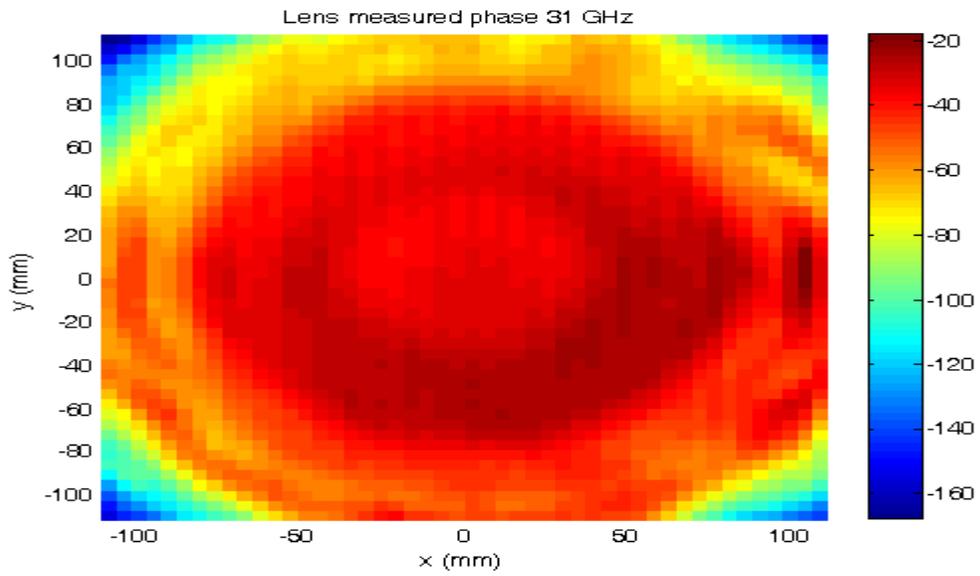


Figura 61. Fase directa medida de la combinación lente + horn a 31 GHz.

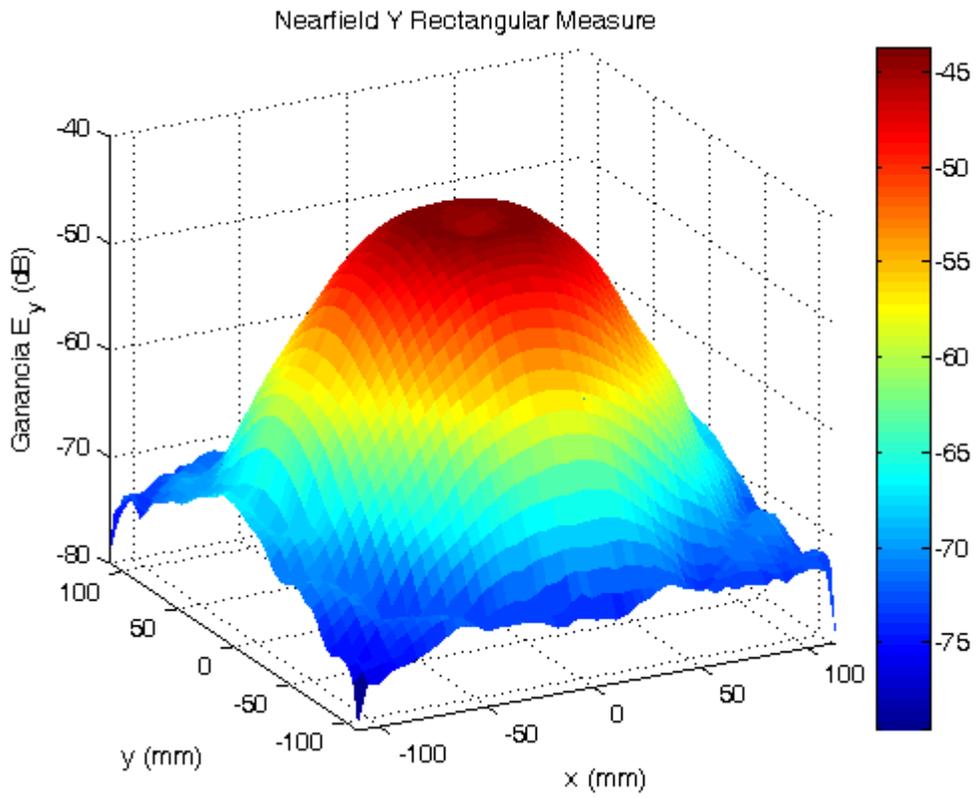


Figura 62. Medida directa de amplitud de la combinación lente + horn a 31 GHz.

En los resultados a 31 GHz (figura 62) se ve que la fase tiene cierta anomalía en la dirección +x. Hay un “valle” al centro del lente, lo que se vio en varias mediciones a 31 GHz. A priori, se cree que es efecto de una resonancia al interior del lente, pero se deja como tarea a mediano plazo investigar la causa precisa.

5. Conclusiones

El objetivo del tema de memoria consistió en diseñar e implementar un sistema automático para medir en el campo radiación cercano (amplitud y fase), para una antena directiva de tipo bocina en el rango de los 30GHz a 50GHz. Gracias a estas medidas, y de allí utilizando algoritmos de software basados en los métodos de la Transformada de Fourier, se pudo extrapolar éstos patrones de radiación al campo lejano, demostrando que el sistema cumple satisfactoriamente los requerimientos impuestos para este trabajo.

Pese a que el diseño original del sistema tenía como objetivo, caracterizar principalmente las antenas horn que son parte del prototipo de Banda 1, este sistema de diseñado tiene una flexibilidad mayor ya que eventualmente permite medir otro tipo de dispositivos que emitan gran parte de su energía en un solo plano (como en el caso del lente de microondas caracterizado) u otros tipos de antenas directivas. El sistema implementado es, entonces, de uso más amplio que el diseñado originalmente. Una extensión lógica es la posibilidad de medir a mayores frecuencias. Dadas las capacidades mecánicas del scanner, en principio se podría extender el rango de frecuencias hasta 300 GHz, contando por cierto con instrumental adicional para generar y medir señales a esas frecuencias.

El sistema fue probado extensamente durante varios meses, lo que permitió detectar y corregir problemas en el software de control, en el software de datos, y en general, permitió acumular una significativa experiencia práctica, que permitió generar una serie de consejos, recomendaciones y prácticas útiles al momento de realizar las mediciones. Todo este conocimiento permite que éstas sean repetibles y consistentes, lo que es el objetivo en sí mismo de cualquier sistema de medición.

Como parte de la prueba del sistema se midió la antena horn de Banda 1, así como el lente de acoplamiento de ésta con el secundario de una antena de ALMA. Las simulaciones son en gran medida concordantes con los datos medidos, y las discrepancias son explicables dada la configuración particular de cada medición (por ejemplo, si se sabe que tal medida es correcta hasta cierto ángulo particular, se espera que los datos reconstruidos a mayores ángulos sean menos precisos). Por lo tanto, se cumple con el objetivo principal de tener un instrumento de medición que permita medir confiablemente las antenas y la óptica en general del proyecto de Banda 1. Por tanto, esto que permitirá que el sistema sea utilizado próximamente en el sistema de mediciones del receptor completo, en el cual se verificara que el prototipo cumpla con las especificaciones de ALMA, etapa previa a la posible construcción e integración en el proyecto en sí.

En resumen, se logró diseñar e implementar por completo un sistema de medición funcional y confiable, que cumple con el objetivo de caracterizar la óptica de Banda 1, con opciones de extender el rango de operación a mayores frecuencias, y como beneficio adicional, queda un instrumento de laboratorio diseñado e implementado en Chile, lo que es algo positivo para el desarrollo de la instrumentación astronómica en el país.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] www.almaobservatory.org. Sitio web del radiotelescopio ALMA.
- [2] Yuh-Jing Hwang a*, Chau-Ching Chiong a , Yau-De Huanga , Chi-Den Huangb , Ching-Tang Liub , Yue-Fang Kuoc,a, Shou-Hsien Wenga , Chin-Ting Hoa , Po-Han Chianga , Hsiao-Ling Wua , ChihCheng Changa , Shou-Ting Jiana , Chien-Feng Leea , Yi-Wei Leea , Marian Pospieszalskid , Doug Henkee , Ricardo Finger , Valeria Tapia , Alvaro Gonzalez. “Band-1 Receiver Front-End Cartridges for Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA): Design and Development toward Production”. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation 2016, At Edinburgh, United Kingdom. June, 2016.
- [3] Stuart Gregson, John McCormick, Clive Parini. “Principles of Planar Near-field Measurements”. The Institution of Engineering and Technology. London, United Kingdom, 2007.
- [4] Optics. Eugene Hecht. 5th edition, Pearson 2016.
- [5] <https://www.rfglobalnet.com/doc/qwh-series-standard-gain-horn-antennas-0002>
- [6] <https://www.slideshare.net/RomaRicoFlores/apperture-and-horn-antenna>. Página 21.
- [7] https://www.geozondas.com/far_field.php
- [8] <https://slideplayer.com/slide/9972259/>
- [9] <http://christbangalore.blogspot.com/2018/08/inauguration-of-anechoic-chamber-rf.html>
- [10] http://www.ee.cityu.edu.hk/~sklmw/core_research_facilities.html
- [11] <http://www.nanophotonics.org.uk/niz/facilities/mwlab/>
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Near-field-measurement-system-setup_fig1_267840243
- [13] <https://quinstar.com/shop/antenna-products/open-waveguide-probe-gap/>
- [14] <https://slideplayer.com/slide/2367728/>
- [15] www.keysight.com
- [16] www.thorlabs.com
- [17] <https://www.eccosorb.eu/Eccosorb.html>
- [18] <https://www.nsi-mi.com/products/system-solutions/near-field-systems>
- [19] <https://www.newmarksystems.com/>

[20] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>

[21] <https://www.belfuse.com/product-detail/semflex-cable-assemblies>

[22] <https://www.ni.com/es-cl/shop/labview.html>

[23] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

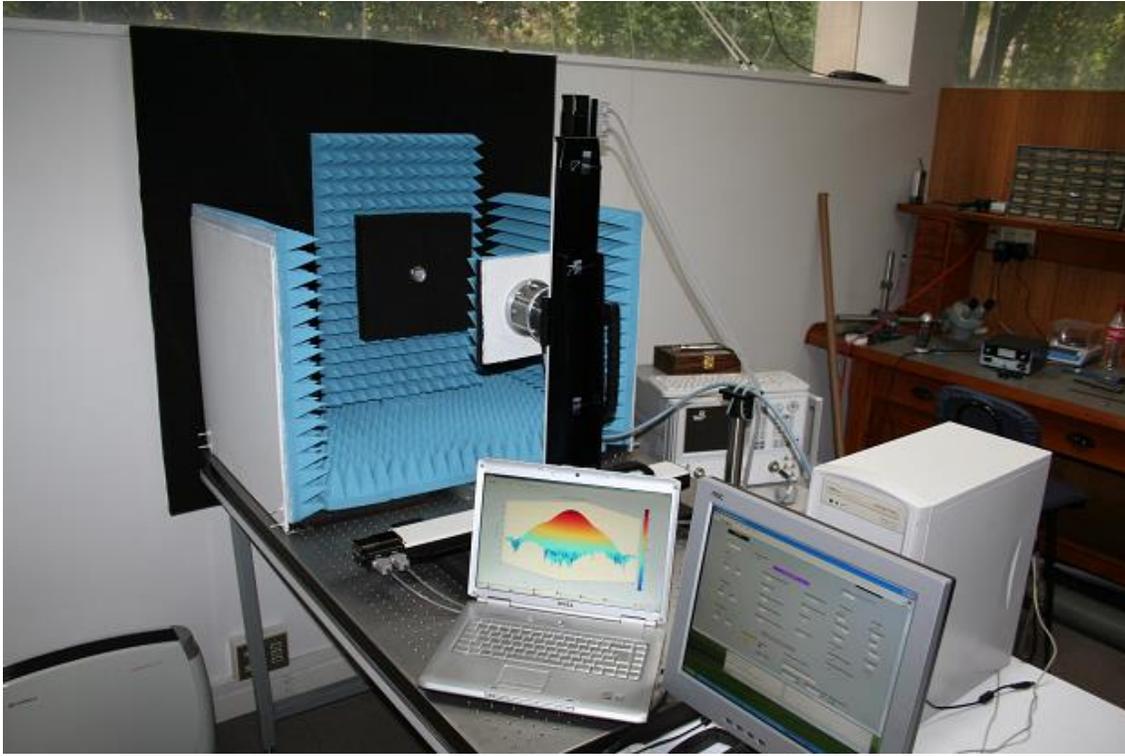
[24] Pablo Zorzi, Christophe Granet, Franco Colleoni, Nicolas Reyes, Jose Pizarro, Fausto-Patricio Mena, Leonardo Bronfman. “Construction and Measurement of a 31.3–45 GHz Optimized Spline-profile Horn with Corrugations”. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, October 2011.

[25] Pieter N. Betjes. “An Algorithm for Automated Phase Center Determination and its Implementation”. Nearfield Systems, Inc., Buziaulaan 48, 1948 AK Beverwijk, The Netherlands.

[26] P. Zorzi, D. Henke, S. Claude, P. Mena, L. Bronfman and J. May.” Revisiting the ALMA Band 1 Optics Design”. 21ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE TERAHERTZ TECHNOLOGY, OXFORD, 23-25 MARCH, 2010.

ANEXOS

A) MANUAL DE USO "BEAM SCANNER"



MANUAL DE USO “BEAM SCANNER”

Autor: Franco Colleoni
Fecha: 25/09/2011

Introducción

El presente manual entrega una guía de uso para utilizar el Beam Scanner del Laboratorio, junto con el software “Near_to_Far_field”.

El Beam Scanner + “Near_to_Far_field” permite realizar mediciones en el campo cercano de radiación (nearfield) de antenas, lentes y otros componentes ópticos de microondas para frecuencias >10 GHz hasta 50 GHz ⁽¹⁾, siempre que los componentes a medir radién preferentemente en un solo plano de la esfera (y entonces, elementos generalmente de alta directividad o ganancia).

El software se encarga del control automático de la medición y el posterior procesamiento de datos medidos, los cuales permiten obtener el beam pattern de radiación del componente medido (en el campo lejano, farfield).

El presente manual detalla y explica: 1) los componentes del sistema, 2) las conexiones físicas a realizar, 3) los softwares a utilizar, 4) como realizar una medición y finalmente 5) tips y recomendaciones para realizar buenas mediciones.

- (1) Es posible extender los rangos de medición con ciertas modificaciones o trade-offs entre los parámetros de medición, algunos se explican más adelante en esta guía.

ÍNDICE

1.-Componentes del sistema.....	Pag. 4
2.- Conexiones a realizar entre los componentes del Beam Scanner.....	Pag. 7
3.- Softwares del Beam Scanner.....	Pag. 7
4.- Como realizar una medida completa.....	Pag.18
5.- Tips y recomendaciones.....	Pag. 21

1.- Componentes del sistema

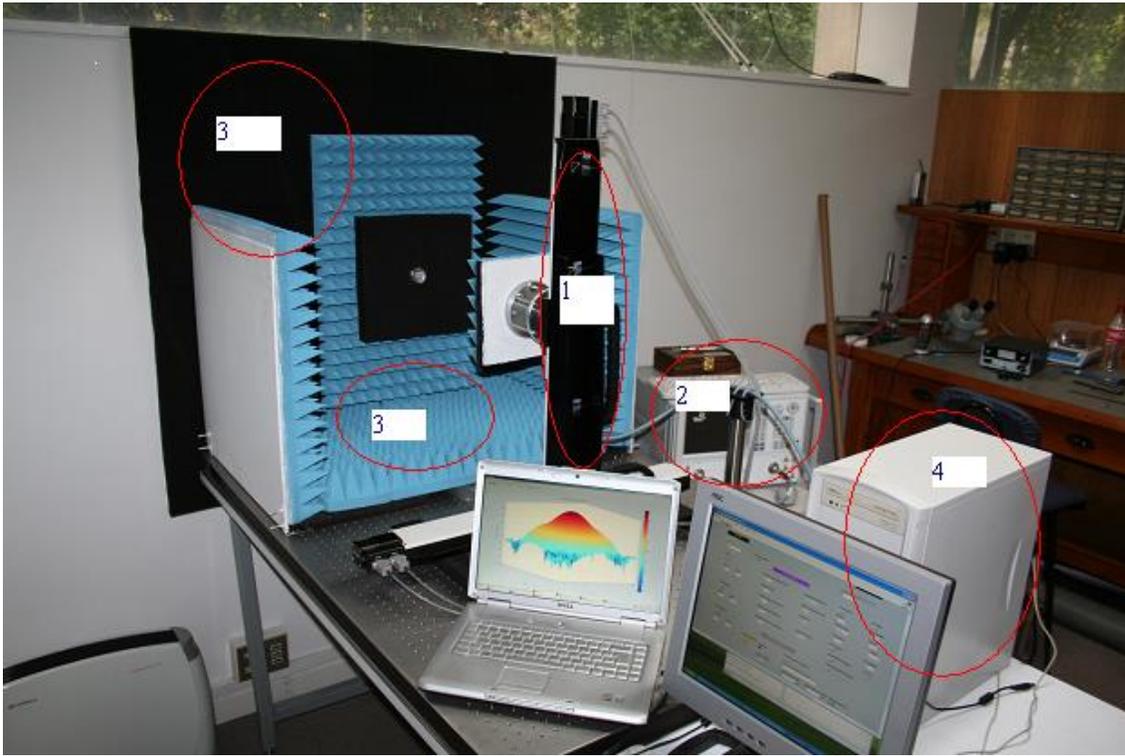


Figura 1: Setup completo Beam Scanner

La fig1. muestra el setup completo del Beam Scanner.

El sistema se compone de:

- 1.-Beam scanner: Scanner plano de dos ejes, con una antena probe sujeta a la montura del eje vertical.
- 2.-VNA: Vector Network Analyzer, instrumento que mide y almacena la radiación de nearfield del componente a medir.
- 3.-Absorbentes: absorbentes de radiación electromagnética.
- 4.-PC general: computador de uso general, que contiene el software “Near_to_Far_field” que maneja todo el sistema.
- 5.-Controlador Scanner: (no visible en la foto): controlador de los motores de paso del scanner.

En la fig2. se muestran los otros componentes del sistema:

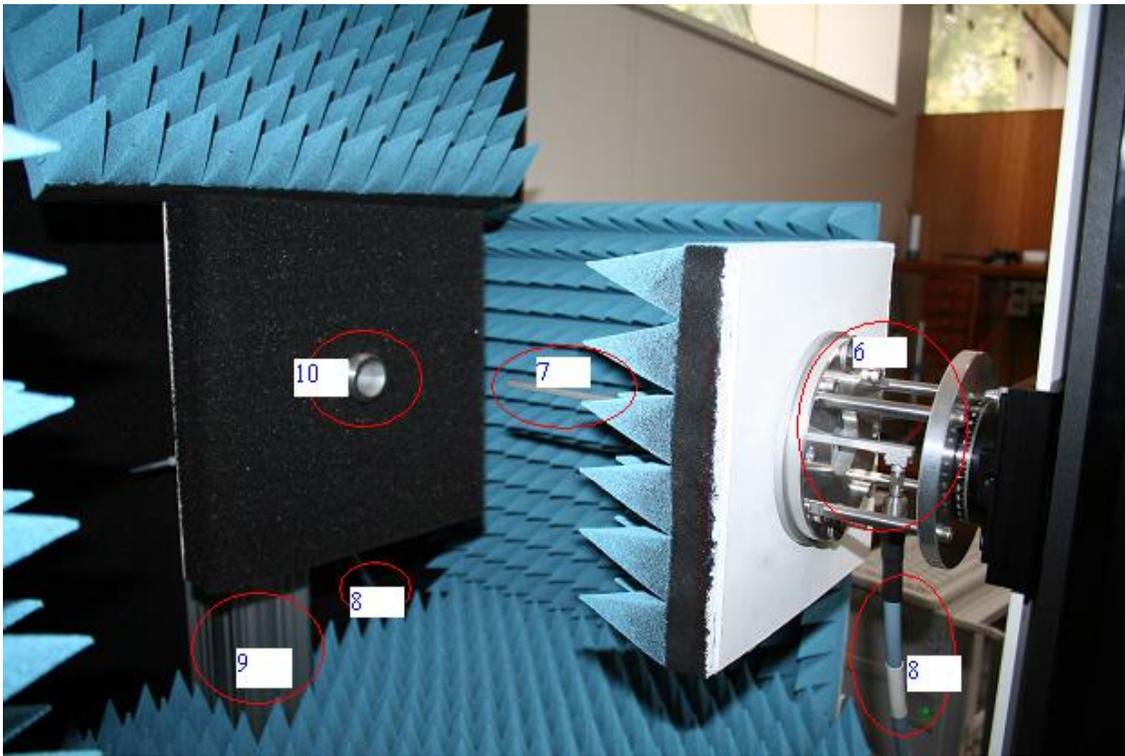


Figura 2: Componentes del Beam Scanner

6.-Montura Probe: es la montura de la antena probe que realiza las mediciones, acoplada a un rotador.

7.-Probe: antena semi-isotrópica y de beam pattern conocido (teórico al menos) que transmite radiación al elemento a medir

8.-Cables flexibles: cables RF flexibles a conectar entre el a) VNA y la antena probe, b) VNA y el componente a medir

9.-Riel de montaje: perfil de aluminio que cumplen la función de mover verticalmente el elemento a medir. Hay otro perfil bajo el absorbente inferior que puede ajustar la distancia del riel vertical al probe.

10.-Componente a medir: en este caso, se realiza una medición sobre una antena horn.

Un esquema del setup del sistema se indica en la fig3 (la dirección de las flechas indica el sentido de la transmisión de datos o mensajes entre los componentes del sistema):

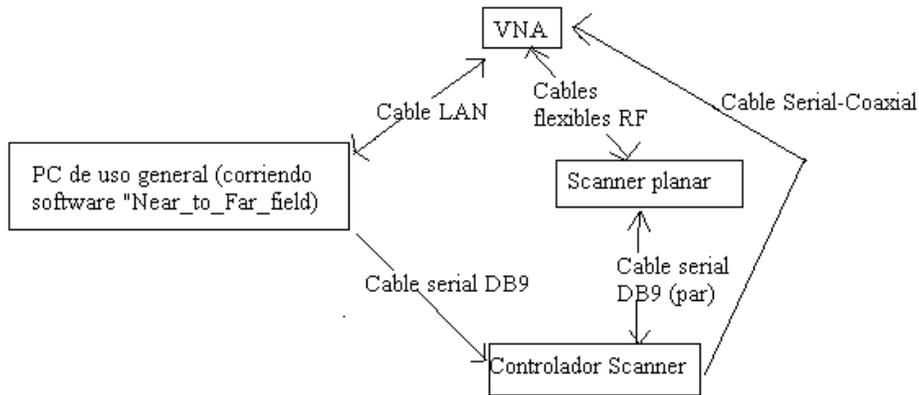


Figura 3: Esquema del setup y conexiones del Beam Scanner

En forma resumida, el sistema opera de la siguiente forma:

- a.- Se disponen en el software los parámetros necesarios para realizar la medición (a explicar más adelante).
- b.- Al iniciar la medición, un script con las posiciones del scanner y la sincronización con el VNA es enviado hacia el controlador.
- c.- El controlador ejecuta el código, posicionando el scanner en la posición inicial de medición y luego realizando la secuencia: esperar- enviar señal de trigger al vna – medir - mover a la siguiente posición. Las posiciones del scanner corresponden a los vértices de una grilla cuadriculada imaginaria, y a cada “punto” le corresponde un dato (medido por el VNA).
- d.- Al terminar la medición, mediante el software se deben guardar los datos de ésta (que corresponden a la radiación nearfield sobre un plano) en el VNA y luego se traspasan al PC.
- e.- El software procesa los datos y se generan gráficos con información de la medición realizada (correspondiente al near-field), con el que se obtiene el beam pattern (en el farfield) y otras medidas adicionales..

2.- Conexiones a realizar entre los componentes del Beam Scanner

Las conexiones físicas a realizar entre los elementos del sistema son las siguientes:

- 1.- PC – VNA: esta conexión se realiza mediante un cable LAN (el cual debe ser cruzado, ya que la transmisión de datos es bidireccional). El VNA dispone de una sola entrada LAN en particular (en la parte posterior)
- 2- PC – Controlador Scanner: esta conexión requiere un cable serial de 9 pines (DB9) en el lado del controlador. Es decir, una conexión USB-Serial (USB en el lado del PC) es suficiente. La conexión en el controlador se realiza en el puerto correspondiente.
- 3.- Controlador Scanner- Scanner: esta conexión se realiza mediante dos cables seriales de 9 pines (DB9), una para cada eje del scanner (X e Y). Tanto el scanner como el controlador tienen indicado claramente cuál es el puerto correspondiente a cada eje.
- 4.- Controlador Scanner- VNA: esta conexión se realiza entre el puerto “I/O” del controlador, y la entrada “I/O Trigger 1” del VNA. El cable a utilizar es un Serial-Coaxial (hecho a medida en el Laboratorio), con el lado serial al controlador y el coaxial al VNA.
- 5.- Scanner - VNA: esta conexión transmite y recibe la radiación del probe y el componente a medir. Corresponde a un par de cables flexibles de RF. Las conexiones son: “Port 1” (en el VNA) – Probe y “Port 2” (en el VNA) – Componente a medir.

3.- Softwares del Beam Scanner

El sistema del Beam Scanner utilizar dos softwares o aplicaciones: uno principal, con el nombre “Near_to_Far_Field” y otro auxiliar (“Guardar posición inicial”) que solo tiene como función guardar una posición de referencia (debido a un conflicto en la utilización del puerto serial, no se pudo agregar la función del software auxiliar al principal, por eso la existencia de ambas aplicaciones por separado). Ambas aplicaciones se ejecutan en la plataforma Labview.

1.- “Near_to_Far_Field”

En la fig4, una vista general de la aplicación:

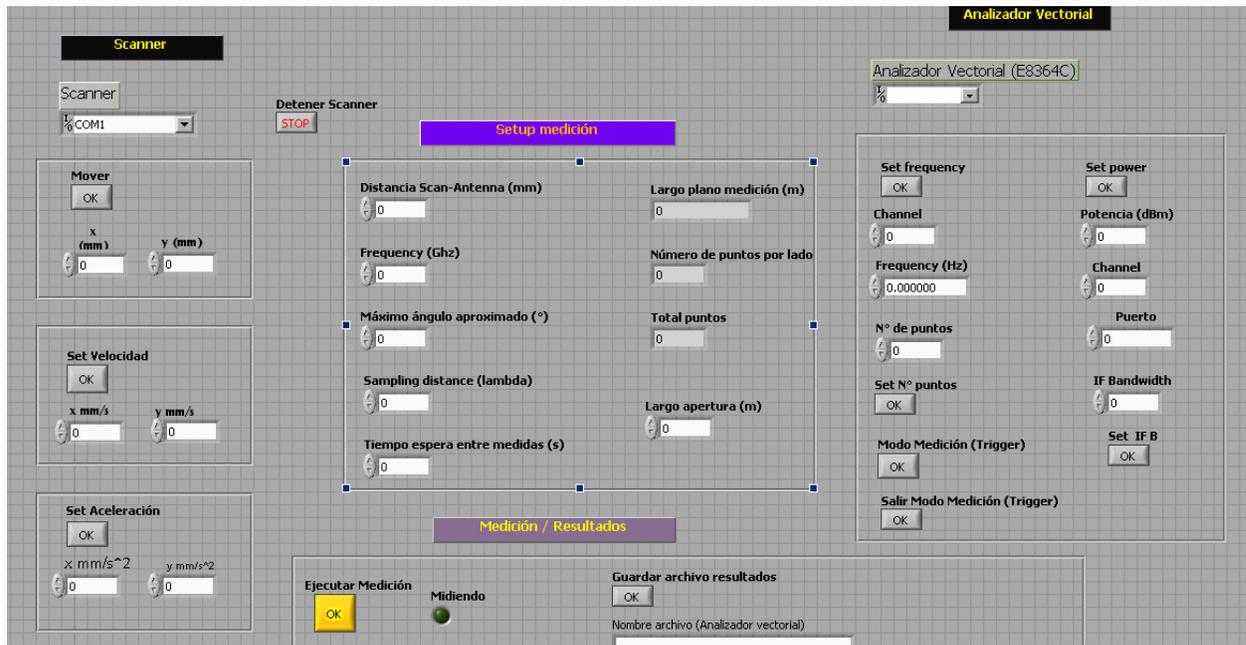


Figura 4: Vista general “Near_to_Far_Field”

El programa contiene 4 secciones principales:

- 1.-Setup del Scanner (“Scanner”)
- 2.-Setup del VNA (“Analizador Vectorial”)
- 3.-Setup de la medición (“Setup Medición”)
- 4.-Procesamiento de datos y ejecución de resultados(“Medición/Resultados”)

1.- Scanner

Esta sección del programa configura algunos parámetros básicos del scanner. Una vista general en la fig5.

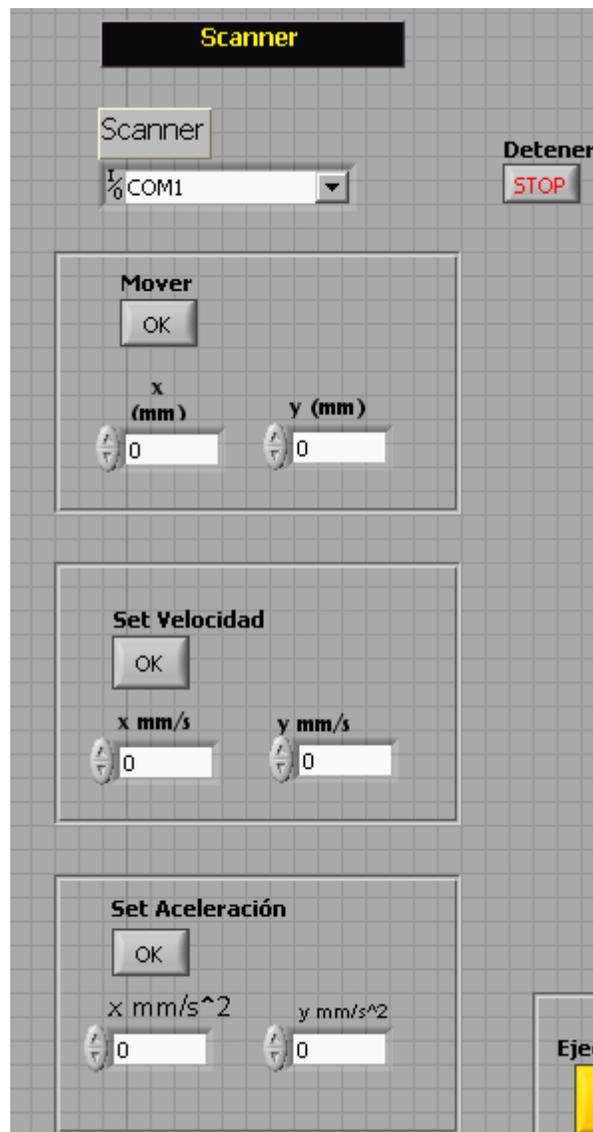


Figura5. Sección “Scanner”

- **Puerto I/O(Scanner):** este control debe indicar la conexión entre el scanner y el programa (en la figura, el puerto seleccionado es el COM1, pero depende de cual puerto se esté utilizando en el PC). Éste indicador se dispone al comienzo, de lo contrario no hay comunicación entre el PC y el scanner y no se pueden setear los otros parámetros.
- **Mover:** mueve el scanner en las direcciones x (horizontal) e y (vertical), relativas a la posición actual, en la cantidad de milímetros indicada. Si se quiere mover el scanner en un sólo eje, entonces se deja el otro casillero en 0 (así, mover el scanner horizontalmente 10mm, sería $x = 10, y = 0$).
- **Set Velocidad:** cambia las velocidades de ambos ejes independientemente. La máxima velocidad admisible es de 66 mm/s aprox., y por default (al encender el scanner) es de 15mm/s (eje x) y 10mm/s (eje y).

- **Set Aceleración:** cambia la aceleración en ambos ejes. Por default, éstas corresponden a 80 mm/s² (x e y). El máximo valor es de 500 mm/s² aprox.
- **Detener:** este control detiene el movimiento del scanner en cualquier momento, tanto durante una medición, como en un desplazamiento cualquiera.

2.- Analizador Vectorial

Esta sección configura los parámetros del VNA, necesarios para realizar la medición. Una vista general en la fig5:

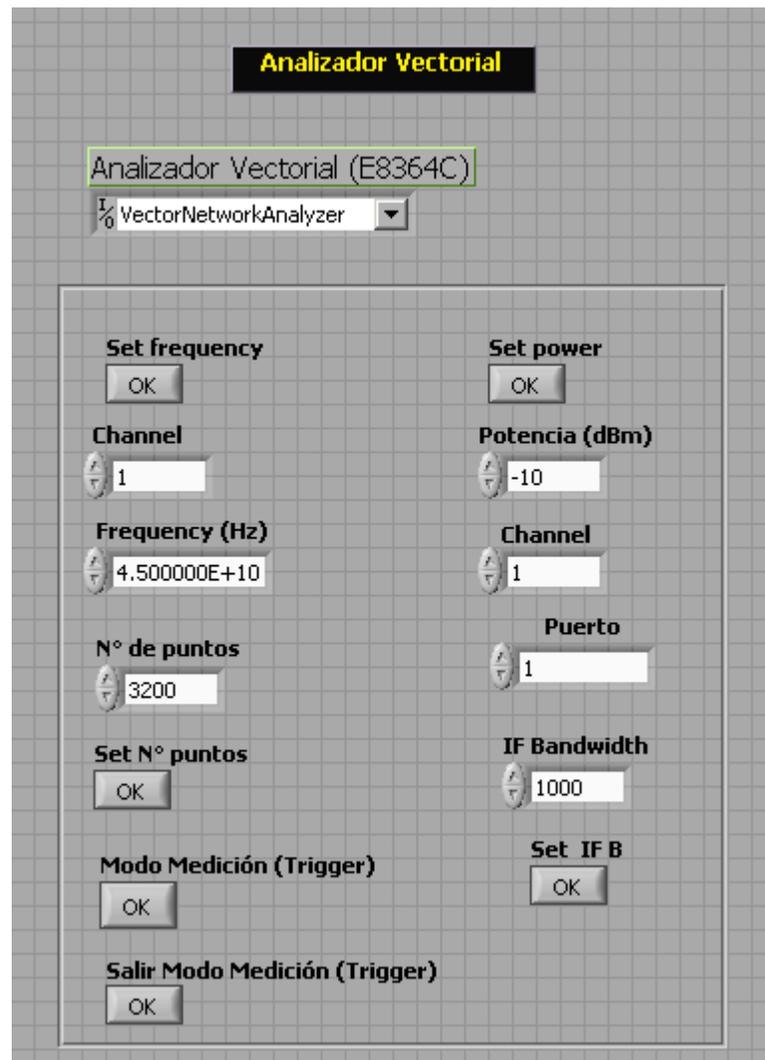


Figura 6: Sección “Analizador Vectorial”

Puerto I/O(Scanner): como el caso anterior, éste indicador hace la conexión entre el VNA y el programa. Se selecciona exclusivamente la opción “VectorNetworkAnalyzer”(como se vé en la fig5), ya que contiene la interfaz de conexión LAN entre Labview y el VNA.

Set Frequency: se elige la frecuencia a la cual se realiza la medición, además del canal a donde aplica. El cambio queda realizado al presionar el botón

Set Power: se dispone la potencia a utilizar (en dBm), además del canal, y el puerto al que aplica (el puerto es el 1 generalmente, y el canal, el mismo que el utilizado en Set Frequency). El VNA tiene un límite de potencia para cada frecuencia, en caso de sobrepasar éste límite el VNA indica un mensaje de error, el cual se vá de la pantalla de éste al cambiar la potencia bajo el límite de la frecuencia utilizada.

Número de puntos: es la cantidad de puntos que el VNA puede medir en un solo sweep completo. Se debe elegir una cantidad igual o mayor a la cantidad de puntos en la medición, ya que de lo contrario el VNA sobrescribe los datos de la misma medida (por ej. si la medición consta de 2000 puntos, elegir n° puntos > 2000 en éste parámetro).

IF Bandwidth: es el ancho de banda del receptor heterodino móvil que realiza el barrido en el VNA. A menor valor, disminuye el ruido en la medición pero aumenta el tiempo de adquisición para tomar un dato. Como referencia, disminuir el IF Bandwidth en un factor de 10 disminuye el ruido en 10 dB.

Modo Medición(Trigger): al presionar este botón, se ejecutan una serie de tareas que disponen al VNA en modo de medición (principalmente el setup de los parámetros de trigger externo con barrido punto por punto, que coordina el scanner y el VNA durante las mediciones). Este botón debiera presionarse luego de ajustar todos los parámetros del VNA, y antes de ejecutar una medición.

Salir Modo Medición(Trigger): éste botón lleva al VNA al modo normal (sweep continuo con trigger interno). Al terminar una medición, es necesario salir del modo de medición, para que la memoria del VNA se actualice (si se realizan dos mediciones seguidas, sin intermediar una salida al modo trigger, entonces los datos de la segunda medida se sobrescriben sobre los datos de la primera medición, perdiendo éstos datos).

3.- Setup medición

En ésta sección se disponen los parámetros de la medición. Ver la fig7.

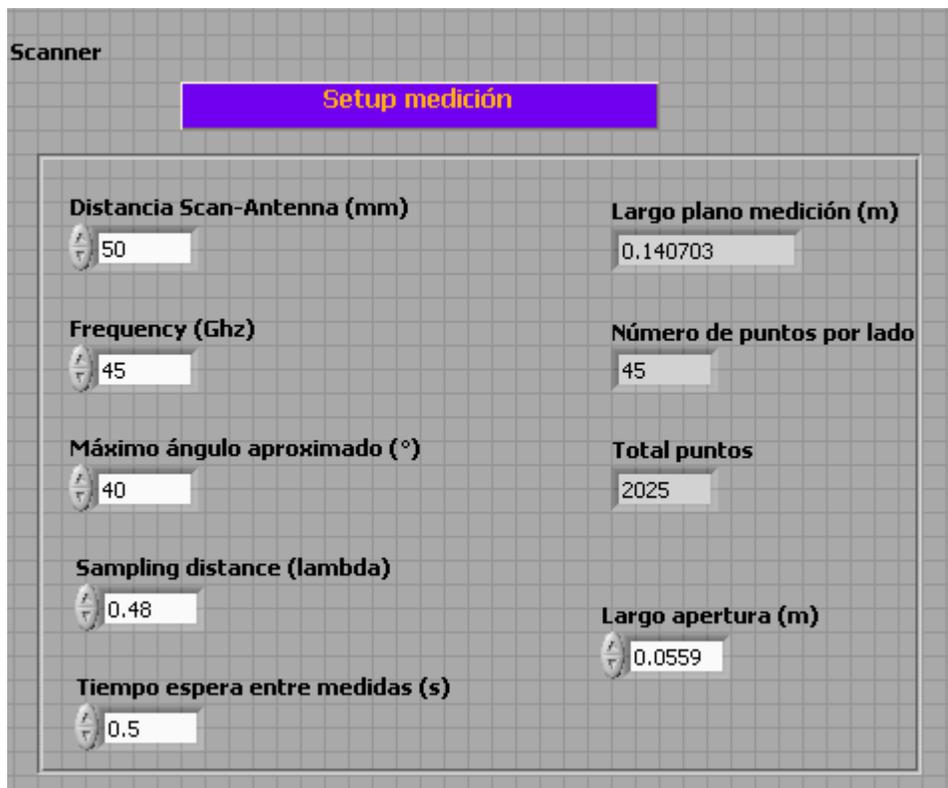


Figura 7: Sección “Setup medición”

Distancia Scan-Antenna: aquí se coloca la distancia (en mm), entre las aperturas del probe y de la antena a medir. La precisión no es crítica en éste parámetro, pero es preferible aproximarlo al siguiente número más grande (ej. si se mide una distancia aproximada de 20-22 mm, dejarlo en 22).

Frecuencia: la frecuencia a la que se realiza la medición (en GHz)

Máximo ángulo aproximado: corresponde al máximo ángulo en el que, aproximadamente, se recupera en el patrón de campo lejano. Ej. si se dispone un ángulo de 40° , el patrón evidencia los efectos del truncamiento en las regiones $> 40^\circ$ y $< -40^\circ$, tomados desde el eje de la antena a medir, tanto en azimuth como elevación.

Sampling distance: la fracción de lambda a utilizar como distancia entre puntos. Entonces, samplear a $\lambda/2$ (la frecuencia de Nyquist) se dispone como 0.5.

Tiempo espera entre medidas: es el tiempo que espera el scanner antes de realizar la medición, para disminuir errores por el balanceo del cable RF al moverse de un punto a otro.

Largo apertura: es la máxima dimensión de la apertura en el caso de una antena. Ej, para un horn rectangular, es el lado mayor, y para uno circular, corresponde al diámetro.

Largo plano medición, número de puntos por lado y total de puntos: éstos valores resultan de los otros parámetros (no se modifican), e indican respectivamente, el largo del lado del plano de

medición, el número de puntos por lado, y el total de puntos (que dado el plano de medición cuadrado, es el cuadrado del número de puntos por lado).

4.- Medición / Resultados

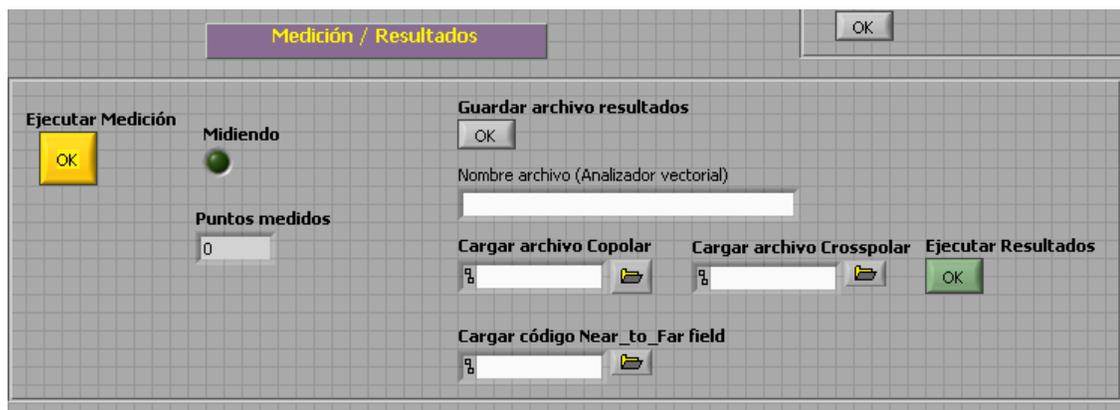


Figura 8: Sección “Medición/ Resultados”

Esta sección procesa los datos medidos, y obtiene los datos requeridos finalmente (principalmente el patrón de campo lejano).

Ejecutar Medición: este botón da inicio a la medición, es decir, se debe accionar en cuanto estén todos los parámetros dispuestos (VNA, Scanner, y medición). Un LED indica cuando se mide un punto, y un contador (Puntos medidos) indica el número actual de puntos medidos.

Guardar archivo resultados: al terminar una medición, se deben traspasar los archivos desde el VNA hasta el PC donde corre el programa. Primero, se debe poner un nombre de archivo para que éste se guarde en el VNA (en un path predefinido). Al accionar el botón, el programa guarda el archivo en el VNA (en el path indicado), y luego lo traspasa al PC (el programa pregunta donde guardar el archivo).

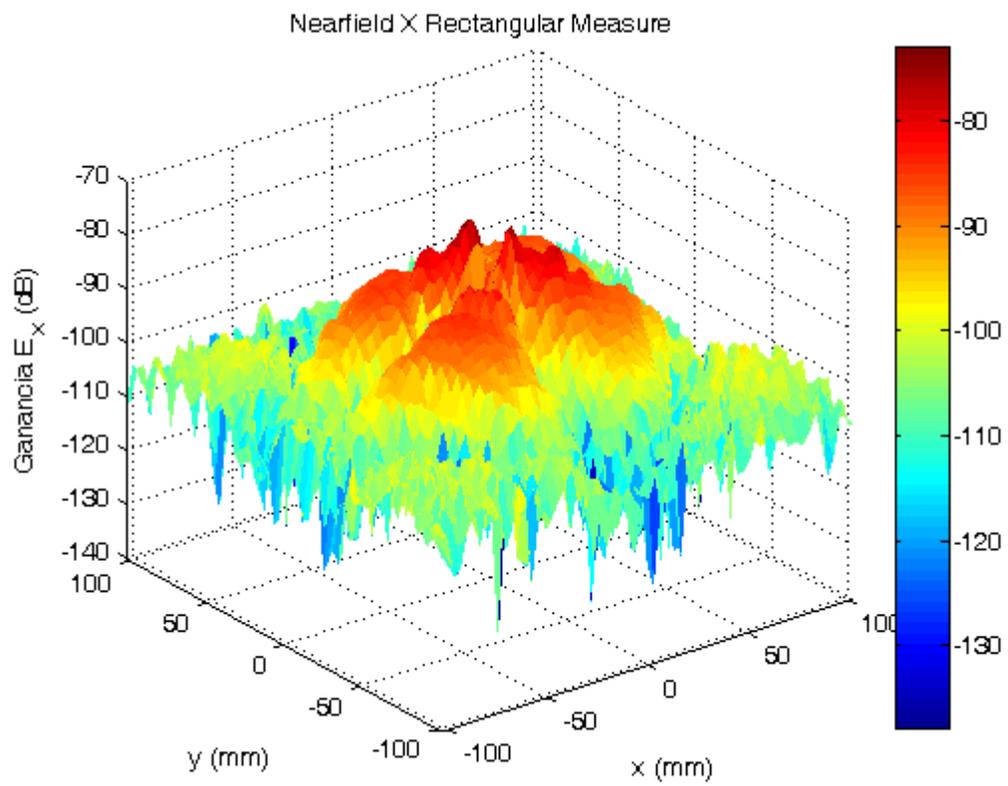
Es importante tener en cuenta que los datos están almacenados temporalmente en el sweep “Single Point” del VNA dado por el “Modo Medición (Trigger)” ajustado anteriormente. Por lo tanto, se deben guardar los datos antes de salir del modo de medición, ya que en ese caso se pasa al modo de sweep “Continuos/Internal” en el cual se sobrescriben los datos del sweep anterior.

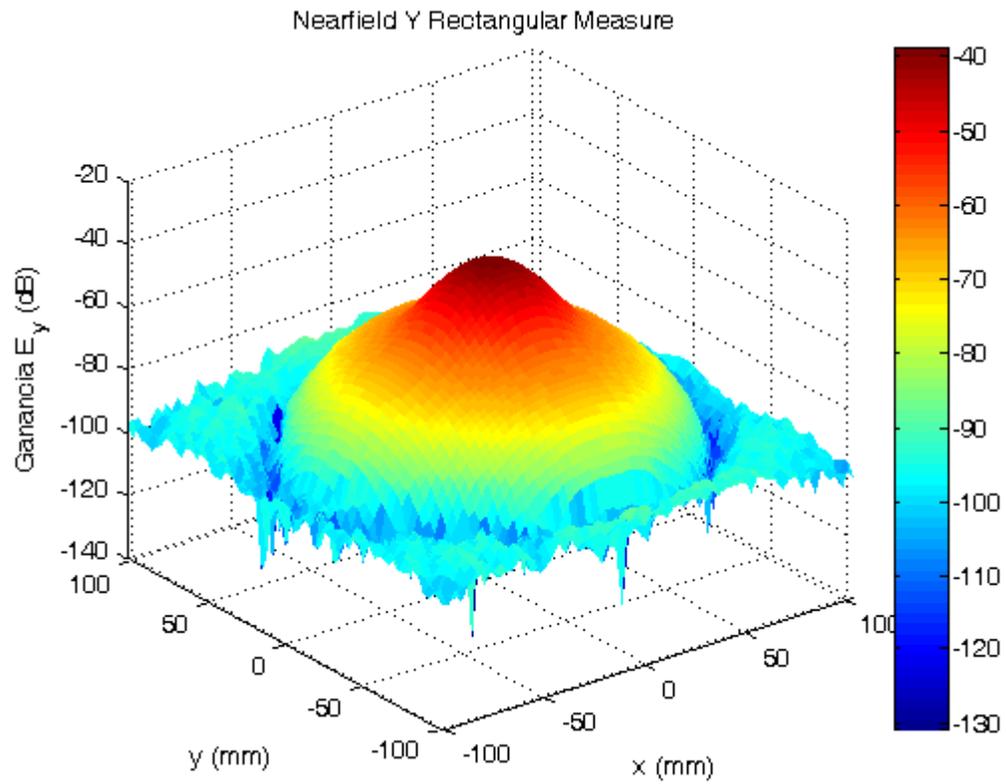
Cargar archivo Nearfield_Eje_Y/ Nearfield_Eje_X: aquí se cargan los archivos que corresponden a las medidas de componentes rectangulares Y e X (cada uno se carga por separado), con Y como eje vertical.

Cargar código Near to Far field: se carga el archivo M-file que procesa los datos, particularmente realiza la transformación a farfield.

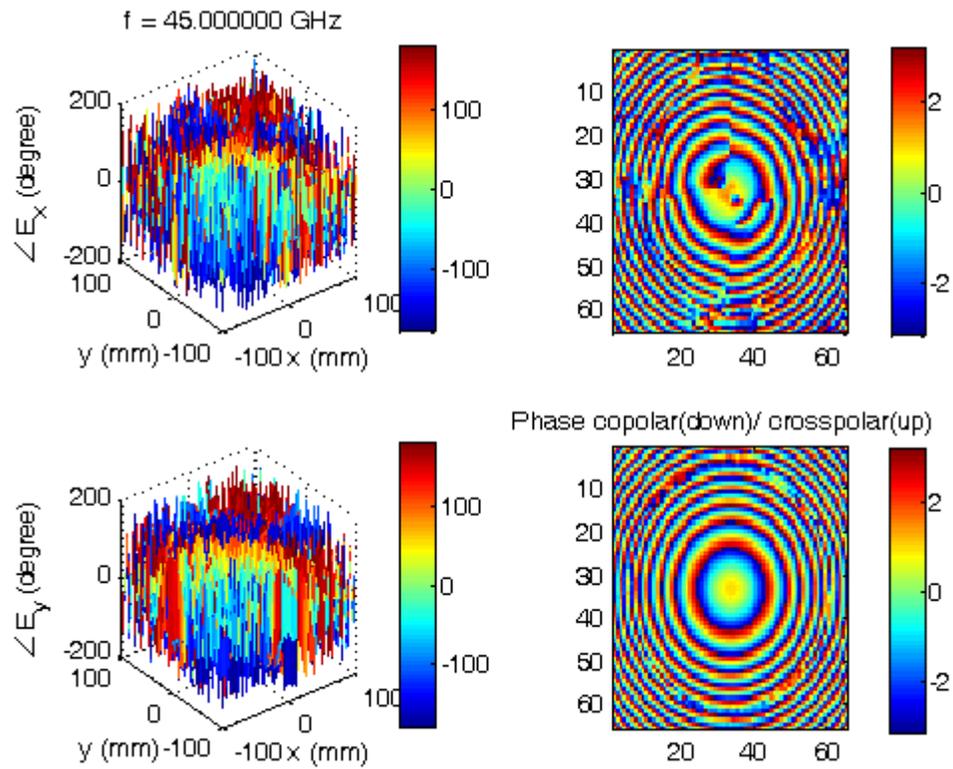
Ejecutar Resultados: al accionar éste botón, los datos son procesados por el software, y son convertidos a los gráficos de patrones de radiación y otros.

Se muestran los gráficos de resultados que entrega el programa, con los resultados de una antena horn medida a 45 GHz:

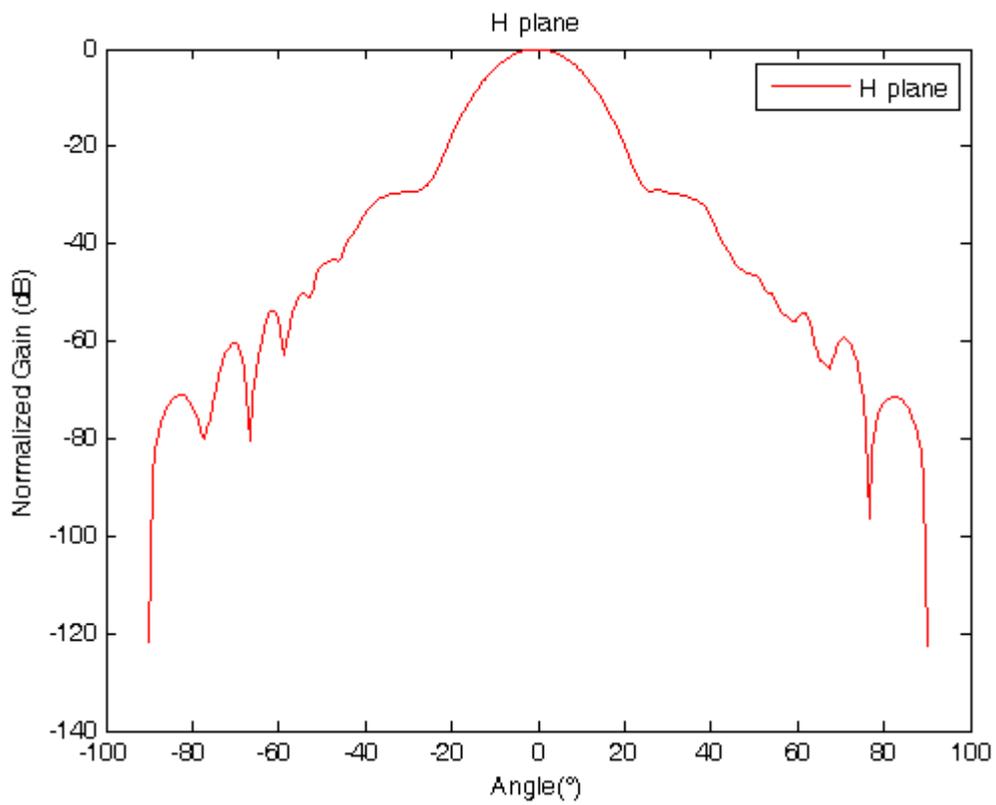
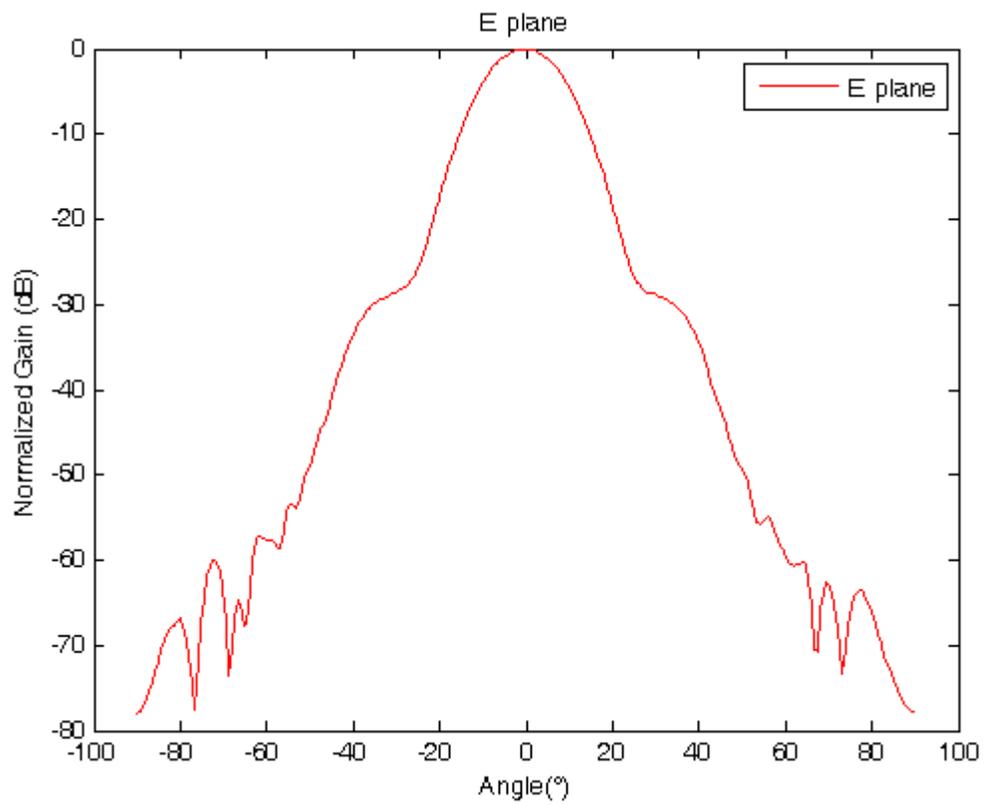




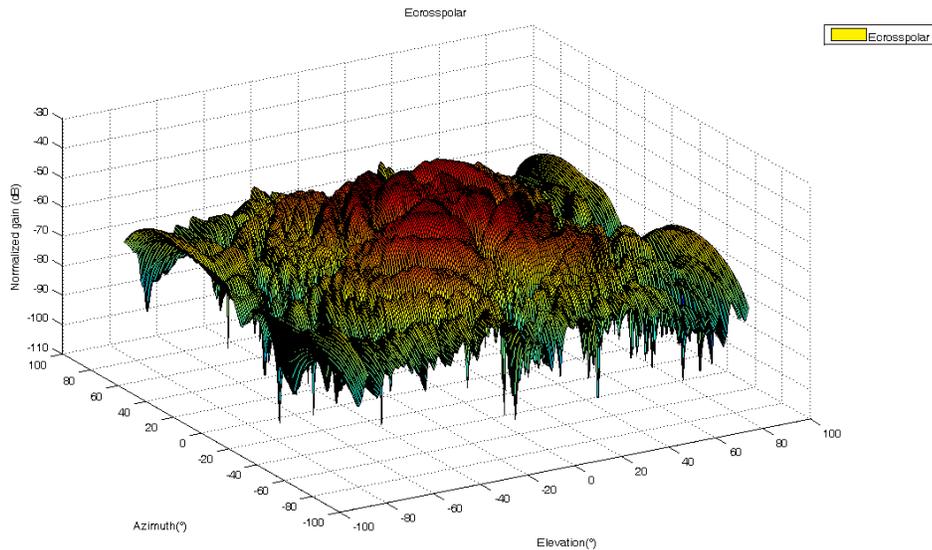
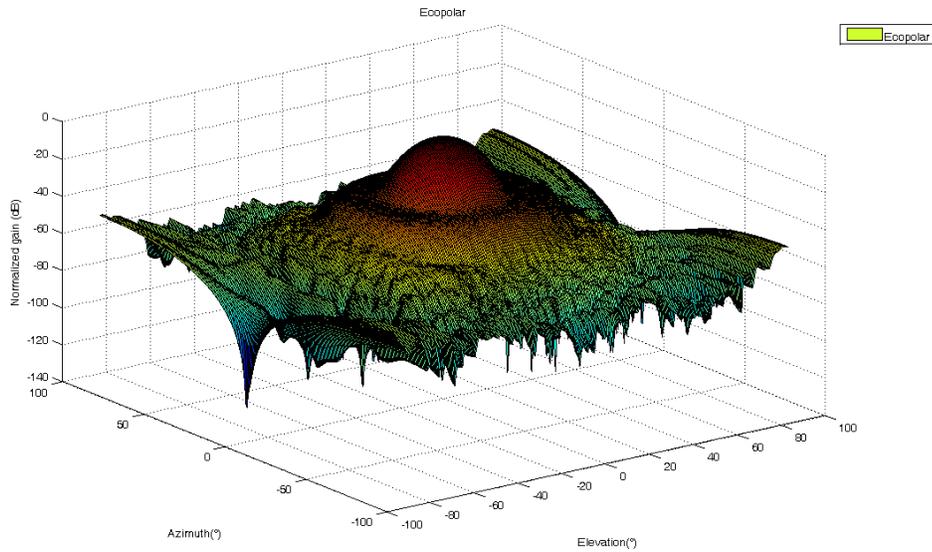
Este par de gráficos muestra la medida directa en el nearfield (sin normalizar). El eje Y corresponde al eje vertical (dirección positiva hacia arriba, mirando de frente el componente a medir) y el eje x al eje horizontal (dirección positiva a la derecha, mirando de frente el componente a medir).



Este gráfico muestra la fase relativa del componente medido en el nearfield. El lado derecho del gráfico tiene la misma información que el izquierdo, en radianes y de vista frontal.



Este par de gráficos muestra los planos E y H del beam pattern en el farfield.



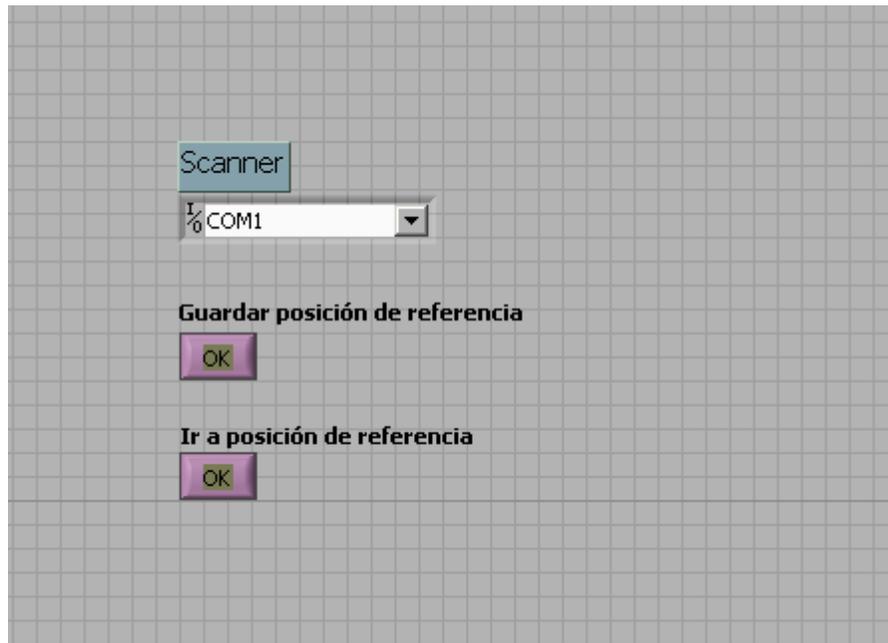
Aquí se ve los componentes Copolar y Crosspolar del beam pattern (el crosspolar normalizado respecto al copolar)

2. “Guardar posición referencia”

Este programa tiene solo una función, que es la de guardar una posición particular del scanner, de modo de utilizarlo como referencia en las mediciones.

Por ej. se quieren hacer varias mediciones a un componente, por lo que el scanner al terminar una medición, debiera volver el punto inicial para la siguiente medida. Entonces, para comenzar una serie de mediciones, a) se elige una posición central (el centro del plano de medición) y b) se guarda con el botón “Guardar posición de referencia”. Luego, al terminar la medida, el botón “Ir a posición de referencia” regresa al punto guardado. Esta función por el momento no se ha podido

integrar al programa principal, debido a un conflicto con la utilización del puerto serial de las funciones del programa principal, con las funciones que permiten guardar este punto de referencia.



4.- Como realizar una medida completa

Se da un ejemplo de cómo realizar una medida completa. Valores sugeridos para ciertos parámetros, o datos importantes se marcan en negrita.

1.- Chequear conexiones

Verificar que todas las conexiones físicas entre el scanner, el controlador, VNA, PC, sean las que correspondan (ver el apartado anterior “Conexiones físicas a realizar entre los componentes del scanner”).

2.- Poner parámetros en el software “Near_to_Far_Field”

Los parámetros a ajustar para la medición son:

2.1.- En “Setup medición”

- a) Distancia Scan-antenna: se mide la distancia entre el plano de apertura del probe y el plano de apertura del componente a medir. La distancia debe ser al menos $> 3 \lambda$ (dependiendo de la geometría del componente a medir, se pueden producir reflexiones en la medición que hagan que la distancia mínima deba ser mayor). **Un valor recomendado sería $> 7 \lambda$** . La distancia ideal es la distancia mínima que permite tomar mediciones sin interferencias o reflexiones notorias.
- b) Frecuencia: la frecuencia a la cual se realiza la medición

- c) Máximo ángulo aproximado: máximo ángulo que se reconstruye al transformar luego a Farfield.
- d) Sampling Distance: el espacio entre puntos como fracción de λ (longitud de onda). **Un valor típico es de 0.48** (ligeramente bajo el límite de Nyquist)
- e) Tiempo espera entre medidas: tiempo de espera del scanner antes de moverse al siguiente punto, con el objeto de amortiguar el balanceo del cable flexible conectado al VNA y disminuir errores por variación de fase. Dependiendo de la medición, **un valor recomendable es de 0.8-1.5 seg.**
- f) Largo apertura: en el caso que se esté midiendo una antena, se debe ingresar la dimensión más larga de la apertura.

De setear los parámetros anteriores, se genera el largo del plano de escaneo, el número de puntos por lado, y el total de puntos a medir.

2.2.- En “Analizador Vectorial”

Los parámetros a setear son:

- a) Set frequency: se setea la frecuencia de medición (la misma de “Setup medición”) , y el canal a utilizar en el VNA. **Puede ser cualquier canal (en general se puede utilizar el canal 1).**
- b) Número de puntos: número de puntos de la medición, **el cual debe ser igual o mayor al entregado por “Setup medición”.**
- c) Set power: potencia de salida del VNA al probe, se debe elegir c1) el canal (mismo del paso a)), c2) el puerto “1” (ya que aquí va conectado el probe) y c3) la potencia en dBm.

El valor por default del VNA es de -17 dBm, pero para tener mayor rango dinámico puede ser recomendable subir el valor. Como referencia, para 45 GHz la máxima potencia es de **-5 dBm**.

- d) IF Bandwidth: un valor típico para este parámetro es de **10 Hz**, ya que es el valor mas bajo a utilizar sin aumentar demasiado el tiempo de escaneo total.
- e) Modo medición: al seleccionar este botón, el VNA **entra en modo de trigger externo y medida puntual**. Esto puede comprobarse al mirar la pantalla del VNA y ver al extremo izquierdo una pequeña flecha detenida (que indica la posición del sweep, y que se moverá sincronizada mente con el escáner).
- f) Salir modo medición: este botón sale del modo de medición, **y el VNA vuelve al modo de trigger interno continuo**, pero manteniendo los parámetros fijados anteriormente (frecuencia, potencia, IF bandwidth, etc.).

Al volver al modo de medición (después de haber salido con “Salir modo medición”), se escuchará un pitido de “warning” del VNA(indicando duplicación de canal). Este mensaje puede ser utilizado para asegurarse que el VNA ha entrado nuevamente en “Modo medición”, en caso de no mirar la pantalla de éste. El pitido no suena necesariamente la primera vez que

se setea el “Modo medición”, pero basta salir una vez del “Modo medición”, para que las siguientes veces si se produzca el “warning”.

2.3.- En “Scanner”

Aquí, sabiendo ya el tamaño del plano (dado por “Setup Medición”), **se lleva el scanner hasta un punto que corresponde aproximadamente al centro del plano** (para tener mayor rango de movimiento). Dado que el largo total de escaneo es de aprox. 60X60 cm. se debe elegir un centro de modo que el plano de medición esté dentro de los límites del escáner, **y además que preferentemente el probe esté alineado con el eje óptico del componente a medir.**

Así, para el caso de una antena, dejar el probe apuntando aprox. al centro de la apertura, de modo de que el plano nearfield esté centrado, lo que puede hacer más fácil la visualización de los datos a obtener.

Los otros parámetros, como la velocidad y aceleración del escáner, probablemente no debieran variarse ya que los valores por default son suficientes y en general adecuados para realizar las mediciones.

3.- En el software “Guardar posición inicial”

Seleccionado ya el punto central del plano de medición, se debe activar este software y presionar “Guardar posición referencia”. Así este punto queda guardado para las siguientes mediciones.

4.- Realizar medición (en “NearField_to_FarField”)

Con todos los parámetros dispuestos, se va a la sección “Medición/Resultados” de “NearField_to_FarField” y **se inicia la medición con el botón “Ejecutar medición”.**

El escáner se moverá del centro hasta el extremo superior derecho(desde la perspectiva del probe), y de ahí comenzará a moverse horizontalmente de derecha a izquierda, punto por punto. Al llegar al extremo izquierdo del plano de medición, el scanner descende una línea y hace el recorrido ahora de izquierda a derecha. Así sucesivamente hasta llegar al último punto de la medición (el progreso se puede ver en el contador de “Medición/Resultados”).

5.- Guardar datos y generar resultados

Al terminar la medición, el escáner se detendrá junto con el led indicador de “Medición/Resultados”.

Para guardar los datos, **se ingresa un nombre de archivo en “Nombre Archivo”(dentro de “Medición/Resultados”)**. Luego al presionar el botón “Guardar archivo resultados” se abre una ventana para elegir la carpeta donde se guardarán los datos en el PC, habiéndose guardado previamente en el VNA(en el path predefinido'C:\Documents and Settings\laboratorio\Desktop\Medidas_NearField\'', el cual se puede modificar en el diagrama de bloques de “NearField_to_FarField” en Labview).

Luego, para obtener los resultados, se carga a) los archivos de datos correspondientes a cada medida, Nearfield Y y Nearfield X, b) se carga el M-file “NEAR_TO_FAR_FIELD”, y c) se presiona “Ejecutar Resultados”, generándose los gráficos con los datos en el Nearfield y Farfield.

6.- Realizar siguiente medición

Luego de haber guardado los datos y generado los resultados, para realizar nueva medición se debe: **a) Presionar “Salir modo medición”**, para reiniciar el archivo de datos en el VNA, b) en el programa auxiliar “Guardar posición referencia”, **presionar “Ir a posición de referencia”**, así el escáner retorna al centro del plano de medición. **C) Cambiar los parámetros correspondientes a la nueva medida** en el software principal y **d) ingresar nuevamente a “Modo Medición”** (se escuchará un pitido del VNA, lo que indica que está nuevamente en modo de medición).

5.- Tips y recomendaciones

Se entregan algunos consejos útiles para realizar buenas mediciones.

5.1- Minimizar flexiones en cable RF conectado al scanner

El cable RF conectado al scanner, al ser flexible, tiende a balancearse (por inercia), al moverse el scanner de un punto a otro para luego detenerse. Este balanceo altera la fase de la señal mientras el VNA mide, introduciendo errores en las mediciones.

Para minimizar este efecto, una acción a tomar es setear un “tiempo de espera entre medidas” entre 0.8-1.5 seg. (como se indicó más arriba), de modo de dar tiempo al cable para amortiguar el movimiento. Otra acción es verificar las flexiones que tendrá el cable durante toda la medición, especialmente en las esquinas del plano de medición.

Por ej. sabiendo el tamaño del plano de medición, se puede mover el cable a cada esquina, y observar que no se produzcan flexiones bruscas en algún punto. También se puede iniciar una medición de prueba para ver como se mueve el cable, y ver si hay una posición mejor para que no se produzcan flexiones muy extremas.

5.2 Usar amplificador

En caso que las señales a acoplar sean muy débiles, una opción es utilizar un amplificador. El amplificador debiera ir conectado al puerto 2 del VNA, de modo de amplificar la señal de entrada a éste (si se pone en el puerto 1 de salida, al tener mas potencia también se incrementa la potencia de las reflexiones en la medición)

Sin embargo, experimentalmente se ve que en mediciones de rango dinámico significativo (en que se requiere reconstruir el farfield beam pattern con un rango dinámico > 40 dB y ángulo relativamente grande >40°-50°), el amplificador puede introducir ruido de fase suficiente para alterar las mediciones en las zonas de menor potencia, lo que altera luego el far-field beam

pattern. Por tanto, dependiendo del componente a medir, no siempre se obtienen mejoras con un amplificador (además que el VNA de por sí tiene un rango dinámico significativo, pudiendo medir hasta -90dBm aprox., y menor aún con ciertas modificaciones).

5.3 Centrar el probe con el eje óptico del componente a medir

En el caso que se conozca a priori como debiera ser el near-field de cierto componente (particularmente, que en el eje óptico tenga un máximo o mínimo local), se puede hacer lo siguiente: ubicar el probe en una posición aproximadamente al centro, y luego ir moviendo verticalmente hasta encontrar un máximo(o mínimo), luego variar las posición horizontalmente, y así repetir el proceso hasta encontrar un centro aproximado. Notar que este método es apropiado en el caso que el eje óptico tenga un máximo (o mínimo) bien definido, o en una zona no muy extensa angularmente.

Otro método podría ser ubicar el scanner en un centro aproximado, y realizar mediciones cortas (con ángulos a reconstruir pequeños), de modo de ver gráficamente(y rápido) donde está el máximo(o mínimo) del componente a medir.

5.4 Interferencias en los cables

El cable serial-coaxial (que conecta el controlador con una entrada coaxial del VNA) puede ser susceptible a las interferencias, por lo que se sugiere colocarlo no muy cerca de algún otro cable que transmita señales digitales, ni tampoco enrollarlo sobre sí.

En una ocasión, un filtro en el conector de poder del VNA (más el cable enrollado sobre sí) fue suficiente para que se produjera interferencia que provocó que el VNA recibiera varias señales de trigger por cada punto. Esto puede verse en la pantalla del VNA, en que una pequeña flecha(el cursor del sweep), que usualmente se mueve sincronizadamente con el scanner, se mueve más de una vez por punto y aleatoriamente.

B Codigo Near_to_Far_Field

```
extX_1=NF_X_Complex(1,1);
extX_2=NF_X_Complex(1,npuntos_por_lado);
extX_3=NF_X_Complex(npuntos_por_lado,1);
extX_4=NF_X_Complex(npuntos_por_lado,npuntos_por_lado);

extY_1=NF_Y_Complex(1,1);
extY_2=NF_Y_Complex(1,npuntos_por_lado);
extY_3=NF_Y_Complex(npuntos_por_lado,1);
extY_4=NF_Y_Complex(npuntos_por_lado,npuntos_por_lado);

extX=[extX_1 extX_2 extX_3 extX_4];
extY=[extY_1 extY_2 extY_3 extY_4];

[max_X,index_X]=max(extX);
[max_Y,index_Y]=max(extY);

extX(index_X)=0;
extY(index_Y)=0;

average_X=mean(extX);
average_Y=mean(extY);

NF_X_Complex(1,1)=average_X;
NF_X_Complex(1,npuntos_por_lado)=average_X;
NF_X_Complex(npuntos_por_lado,1)=average_X;
NF_X_Complex(npuntos_por_lado,npuntos_por_lado)=average_X;

NF_Y_Complex(1,1)=average_Y;
NF_Y_Complex(1,npuntos_por_lado)=average_Y;
NF_Y_Complex(npuntos_por_lado,1)=average_Y;
NF_Y_Complex(npuntos_por_lado,npuntos_por_lado)=average_Y;

c=2.99792458*10^8;
lambda=c/f;
samples_y = samples_x;
dx =dx1*lambda;
dy = dx;
largo_x = dx*(samples_x-1);
largo_y = dy*(samples_y-1);
x = -largo_x/2:largo_x/(samples_x-1):largo_x/2;
y = -largo_y/2:largo_y/(samples_y-1):largo_y/2;

MI=256; NI=256

theta=linspace(-pi/2,pi/2,MI);
phi=linspace(-pi/2,pi/2,NI);
[theta,phi]=meshgrid(theta,phi);

m=-MI/2:1:MI/2-1;
n=-NI/2:1:NI/2-1;

k_X_Rectangular=2*pi*m/(MI*dx);
```

```
k_Y_Rectangular=2*pi*n/(NI*dy);
```

```
NF_X_Magnitude = 20*log10(abs(NF_X_Complex));  
NF_Y_Magnitude = 20*log10(abs(NF_Y_Complex));
```

```
figure(1)  
surf(x*1000,y*1000,NF_X_Magnitude);  
title(sprintf('Sampleo E_{x} f = %f GHz',f/1000000000));  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('Ganancia E_{x} (dB)');  
set(gca,'XLim',[min(x)*1000 max(x)*1000]);  
set(gca,'YLim',[min(y)*1000 max(y)*1000]);  
view(-37.5,30);  
shading flat;  
colorbar;  
title('Nearfield X Rectangular Measure')
```

```
figure(2);  
surf(x*1000,y*1000,NF_Y_Magnitude);  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('Ganancia E_{y} (dB)');  
title(sprintf('Sampleo E_{y} f = %f GHz',f/1000000000));  
set(gca,'XLim',[min(x)*1000 max(x)*1000]);  
set(gca,'YLim',[min(y)*1000 max(y)*1000]);  
view(-37.5,30);  
shading flat;  
colorbar;  
title('Nearfield Y Rectangular Measure')
```

```
NF_X_Phase=angle(NF_X_Complex);  
NF_Y_Phase=angle(NF_Y_Complex);
```

```
figure(3);  
subplot(2,2,1)  
surf(x*1000,y*1000,NF_X_Phase*180/pi);  
title(sprintf('f = %f GHz',f/1000000000));  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('\angle E_{x} (degree)');  
set(gca,'XLim',[min(x)*1000 max(x)*1000]);  
set(gca,'YLim',[min(y)*1000 max(y)*1000]);  
view(-37.5,30);  
shading flat;  
colorbar;  
subplot(2,2,2);  
imagesc(NF_X_Phase');  
colorbar;  
subplot(2,2,3);  
surf(x*1000,y*1000,NF_Y_Phase*180/pi);  
xlabel('x (mm)');  
ylabel('y (mm)');  
zlabel('\angle E_{y} (degree)');  
set(gca,'XLim',[min(x)*1000 max(x)*1000]);  
set(gca,'YLim',[min(y)*1000 max(y)*1000]);  
view(-37.5,30);
```

```

shading flat;
colorbar;
subplot(2,2,4);
imagesc(NF_Y_Phase');
colorbar;
title('Phase copolar(below) and crosspolar(above)')

largoy=length(NF_Y_Complex);
largox=length(NF_X_Complex);

zeropady=ones(MI,NI).*(NF_Y_Complex(1,1)+NF_Y_Complex(1, largoy)+NF_Y_Complex(1
argoy, largoy)+NF_Y_Complex(largoy,1))/4;

zeropadx=ones(MI,NI).*(NF_X_Complex(1,1)+NF_X_Complex(1, largox)+NF_X_Complex(1
argox, largox)+NF_X_Complex(largox,1))/4;

NF_Y_Complex_extended=zeropady;
NF_X_Complex_extended=zeropadx;

for j_1=1:largoy
for i_1=1:largox

NF_Y_Complex_extended(MI/2-ceil(largoy/2)+i_1-1,MI/2-ceil(largoy/2)+j_1-
1)=zeropady(MI/2-ceil(largoy/2)+i_1-1,MI/2-ceil(largoy/2)+j_1-
1)+NF_Y_Complex(i_1,j_1);

NF_X_Complex_extended(NI/2-ceil(largox/2)+i_1-1,NI/2-ceil(largox/2)+j_1-
1)=zeropadx(NI/2-ceil(largox/2)+i_1-1,NI/2-ceil(largox/2)+j_1-
1)+NF_X_Complex(i_1,j_1);

end
end

f_X_Rectangular=ifftshift(ifft2(fftshift(NF_X_Complex_extended)));
f_Y_Rectangular=ifftshift(ifft2(fftshift(NF_Y_Complex_extended)));

f_X_Rectangular_Magnitude=20*log10(abs(f_X_Rectangular));
f_Y_Rectangular_Magnitude=20*log10(abs(f_Y_Rectangular));

k0=2*pi/lambda;
PWS_AngularX =
rot90(interp2(k_X_Rectangular,k_Y_Rectangular,f_X_Rectangular',k0*cos(theta).*
sin(phi),...
k0*sin(theta)));

PWS_AngularY =
rot90(interp2(k_X_Rectangular,k_Y_Rectangular,f_Y_Rectangular',k0*cos(theta).*
sin(phi),...
k0*sin(theta)));

Etheta=(j/lambda)*(PWS_AngularX.*cos(phi)+PWS_AngularY.*sin(phi));
Ephi=(j/lambda)*cos(theta).*(-
PWS_AngularX.*sin(phi)+PWS_AngularY.*cos(phi));

```

```

Ex=(j/lambda)*PWS_AngularX.*cos(theta);
Ey=(j/lambda)*PWS_AngularY.*cos(theta);
Ez=(j/lambda)*(PWS_AngularX.*cos(phi)+PWS_AngularY.*sin(phi)).*-
sin(theta)+cos(theta).*(-PWS_AngularX.*sin(phi)+PWS_AngularY.*cos(phi));
Ecopolar=Etheta.*sin(phi)+Ephi.*cos(phi);
Ecrosspolar=Etheta.*cos(phi)-Ephi.*sin(phi);
U=1/(2*120*pi).*(Etheta.*conj(Etheta)+Ephi.*conj(Ephi));

```

```

figure(4)
plot(theta(1,:)*180/pi,dB(Ecopolar(MI/2,:))-
max(max(dB(Ecopolar(MI/2,:))), 'r'))
title('E plane');
legend('E plane')

```

```

figure(5)
plot(theta(1,:)*180/pi,dB(Ecopolar(:,NI/2))-
max(max(dB(Ecopolar(:,NI/2))), 'r'))
title('H plane');
legend('H plane')

```

```

figure(6)
surf(dB(Ecopolar)-max(max(dB(Ecopolar))))
title('Ecopolar');
legend('Ecopolar')

```

```

figure(7)
surf(dB(Ecrosspolar(10:MI-10,10:MI-10))-max(max(dB(Ecopolar(10:MI-10,10:MI-
10))))))
title('Ecrosspolar');
legend('Ecrosspolar')

```

C.- Codigo Holography

```
[k_X_Rectgrid,k_Y_Rectgrid] = meshgrid(k_X_Rectangular,k_Y_Rectangular);
k_Z_Rectgrid = sqrt(k0^2 - (k_X_Rectgrid.^2 + k_Y_Rectgrid.^2));

%Initial AUT to Probe Distance
%z0 = z0;
z0 = 70/1000;

%Desired Projection Distance from AUT
%z1 = z1;
z1 = 0;
%f_Y_Rectangular2=max(max(f_Y_Rectangular))-f_Y_Rectangular;
f_Y_Rectangular2=f_Y_Rectangular;
%Test for Evanescent Waves - Ignore Them
for zerotest2 = 1:1:NI
    for zerotest = 1:1:MI
        if(k_Z_Rectgrid(zerotest2,zerotest)^2 < 0)
            final(zerotest2,zerotest) = 0;
        else
            final(zerotest2,zerotest) =
f_Y_Rectangular2(zerotest2,zerotest)*exp(-
j*k_Z_Rectgrid(zerotest2,zerotest)*(z1-z0));
        end
    end
end

hologramAmp = dB(fftshift(fft2(final)));
%hologramPhase = unwrap(angle(hologramAmp));
hologramPhase = (angle(fftshift(fft2(final))));
figure(8);
%subplot(2,1,1);
surf(xholo,yholo,hologramAmp);
xlabel(sprintf('x (m)'));
ylabel(sprintf('y (m)'));
zlabel('|f_{x}| (dB)');
% set(gca,'XLim',[min(xRange) max(xRange)]);
% set(gca,'YLim',[min(yRange) max(yRange)]);
view(-37.5,30);
shading flat;
colorbar;

holoTitle = 'Magnitude of Hologram Projection at Aperture ';
%holoTitle(length(holoTitle)+1:length(holoTitle)+length(int2str(z0))) =
int2str(z0);
%holoTitle(length(holoTitle)+1:length(holoTitle)+ 25 ) = ' Aperture';
title(holoTitle);

figure(9)
%subplot(2,1,2);
surf(hologramPhase);
xlabel(sprintf('x (m)'));
ylabel(sprintf('y (m)'));
% set(gca,'XLim',[min(xRange) max(xRange)]);
% set(gca,'YLim',[min(yRange) max(yRange)]);
```

```
view(0,90);
shading flat;
colorbar;

holoTitle = 'Phase of Hologram Projection at ';
holoTitle(length(holoTitle)+1:length(holoTitle)+length(int2str(z0))) =
int2str(z0);
holoTitle(length(holoTitle)+1:length(holoTitle)+ 25 ) = ' inches from AUT
Aperture';
title(holoTitle);
```

