

Proyecto Medidas Electrónicas 2 :

Antena con lente tipo Lüneburg para guía de onda

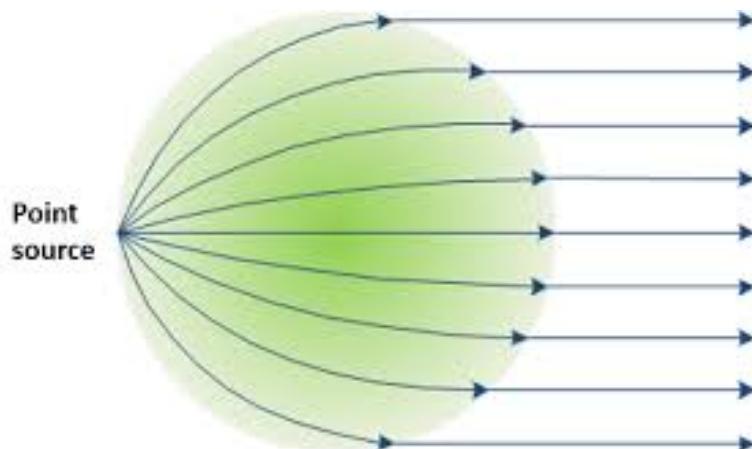
Integrantes:

- Juan Falabella
- Juan Agustín Boirazian

Consigna: Diseño y construcción de antena en guía de onda con lente tipo Lüneburg en Banda X fabricado con impresora 3D.

Etapa: Segunda entrega y presentación final

Teoría detrás de la lente:



La lente Lüneburg es un dispositivo óptico que se utiliza en aplicaciones de RF para manipular las propiedades de las ondas electromagnéticas, como la propagación, la focalización y la dirección. Su diseño se basa en la variación continua de la permitividad dieléctrica en función de la distancia desde el centro de la lente. Esta variación permite que la lente Lüneburg enfoque las ondas electromagnéticas de manera análoga a cómo una lente óptica enfoca la luz visible.

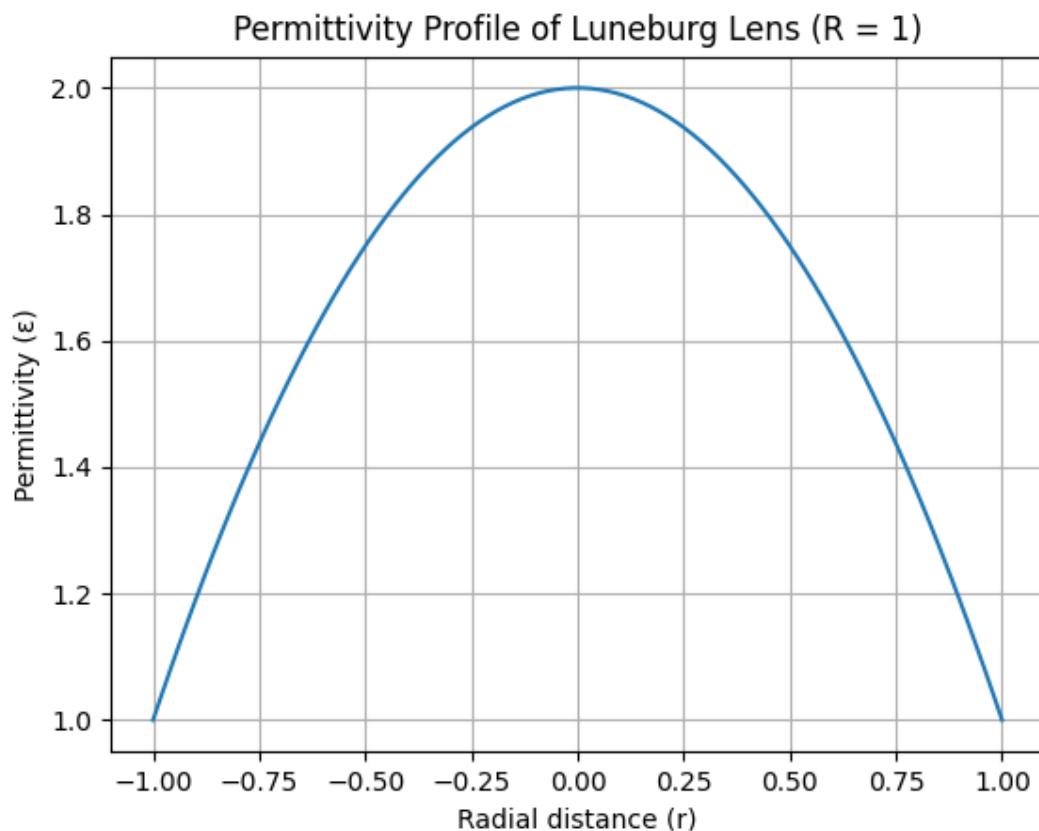
La permitividad dieléctrica ϵ en una lente Lüneburg varía de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2},$$

Si consideramos nuestra lente como una esfera de radio unitario $R=1$, obtendremos la siguiente ecuación:

$$\epsilon(r) = 2 - r^2$$

Cuando las ondas electromagnéticas inciden en la lente Lüneburg, experimentan un cambio en su velocidad de propagación y una desviación en su trayectoria debido a la variación de la permitividad. Esto provoca que las ondas se refracten hacia el centro de la lente, logrando la focalización.



Fabricación de la lente Lüneburg:

Si bien la ecuación teórica planteada anteriormente puede parecer sencilla , la complejidad de dicha lente recae en obtener dicha variación de permeabilidad en la realidad. Dicha parábola descrita anteriormente será prácticamente imposible de replicar en la realidad , pero mediante diversas estrategias de fabricación podremos obtener objetivos similares a ella.

Entre ellos se encuentran:

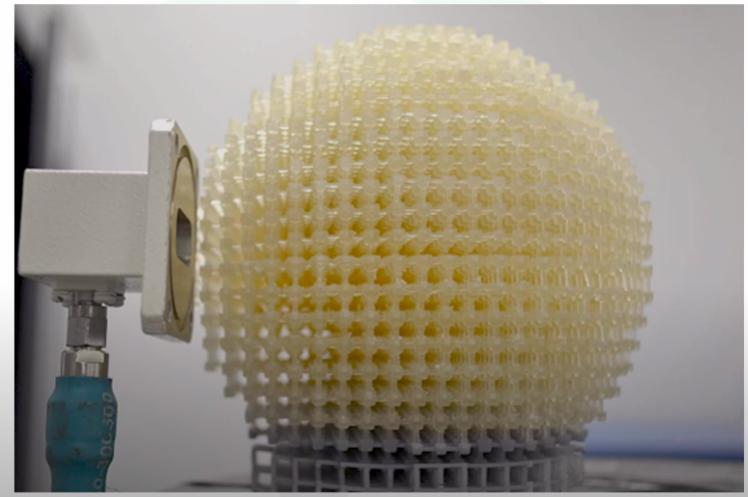
- **Capas Concéntricas:** Consiste en construir la lente de Lüneburg utilizando capas concéntricas de materiales dieléctricos con diferentes índices de refracción. La forma de las capas se diseña para lograr la distribución del índice de refracción deseada.



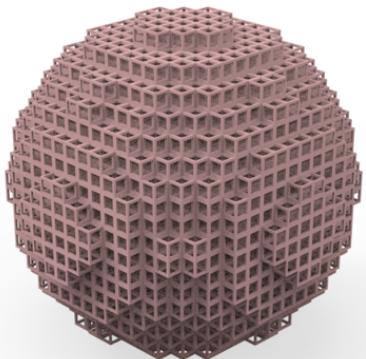
- **Estructuras Complejas mediante permitividad efectiva:**

Este método se basa en la modificación de la permitividad efectiva de un material dieléctrico mediante la estructura interna del material. En lugar de crear una lente con una variación continua de índice de refracción, se diseñan estructuras internas complejas que interactúan con las ondas electromagnéticas de manera que la permitividad efectiva del material se comporte como si tuviera una distribución de índice de refracción específica.

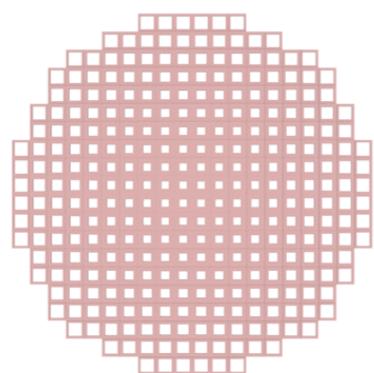
Dichas estructuras internas pueden diseñarse utilizando técnicas de metamateriales, que son materiales artificiales diseñados para tener propiedades electromagnéticas que no se encuentran en materiales naturales. Los metamateriales pueden diseñarse para tener permitividades efectivas que generan efectos de enfoque, dispersión y refracción similares a los de una lente de Lüneburg.



3D rendering of the Luneburg lens

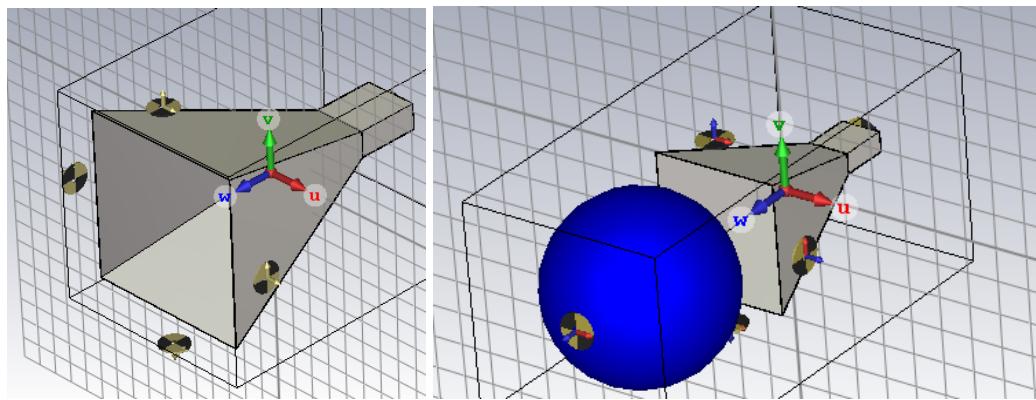


Cross-sectional view



Simulaciones y observaciones obtenidas:

Para verificar el funcionamiento de dicha lente , analizamos múltiples casos. Primero generamos una lente acorde a los rangos de frecuencia establecidos mediante el uso de la herramienta provista por el CST Tools (Antenna Magus). Luego planteamos 2 casos , primero evaluamos una antena horn (de iguales dimensiones a las que se encuentra en el laboratorio) y luego esa misma antena horn con una lente colocada frente a ella.

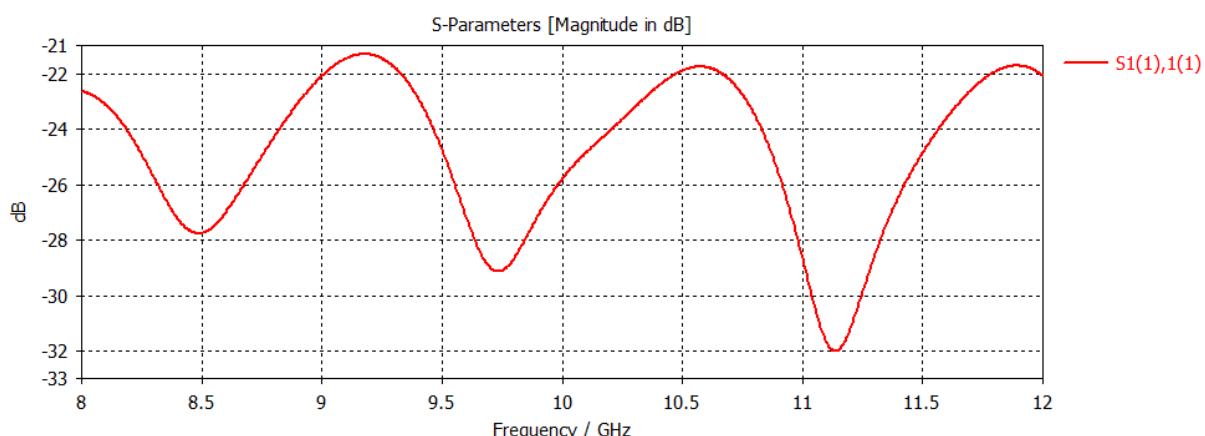


El material conductor es PEC y el dieléctrico (ideal sin pérdidas) de la esfera tiene la siguiente distribución:

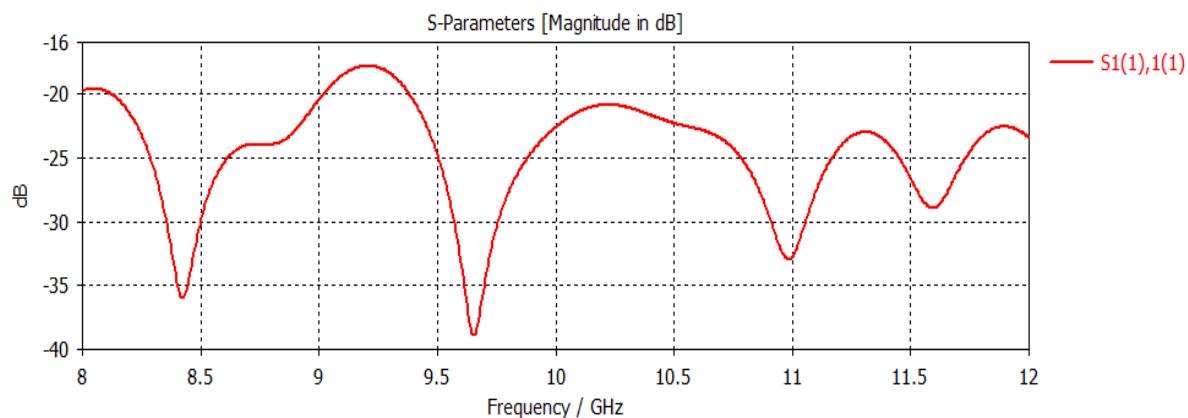
<code>relative_permittivity_6</code>	= 1.04979715607701
<code>relative_permittivity_5</code>	= 1.14752381254857
<code>relative_permittivity_4</code>	= 1.24557113550903
<code>relative_permittivity_3</code>	= 1.34420309253751
<code>relative_permittivity_2</code>	= 1.44430797092388
<code>relative_permittivity_1</code>	= 1.59213548898456
<code>diameter_6</code>	= 109.46872787768
<code>diameter_5</code>	= 99.9308193333333
<code>diameter_4</code>	= 89.3808420306334
<code>diameter_3</code>	= 77.4060798101724
<code>diameter_2</code>	= 63.2017995080245
<code>diameter_1</code>	= 44.6904210153167

Parámetros S11:

Antena Horn:

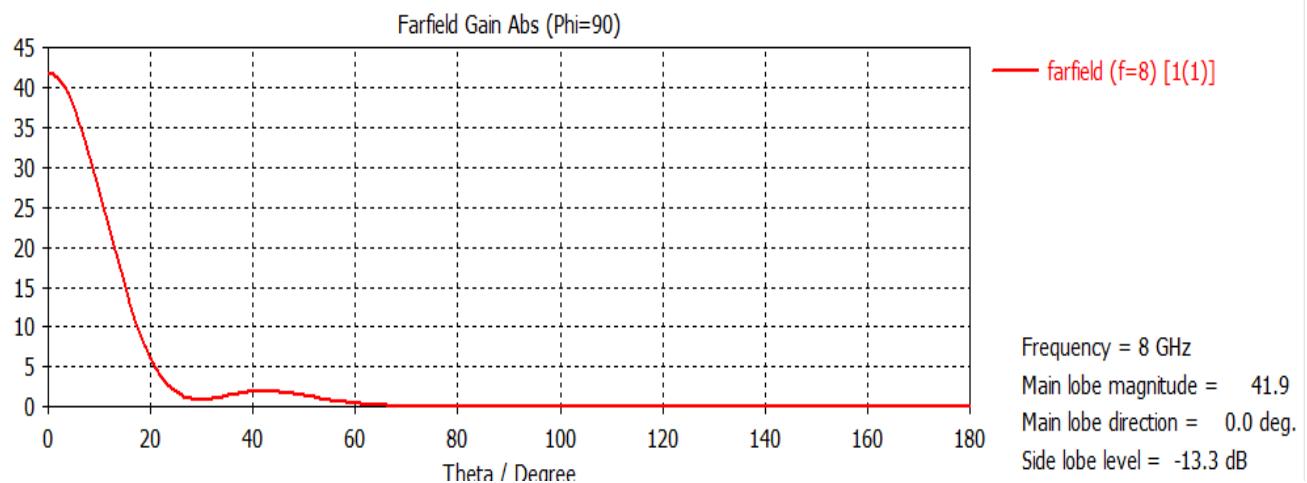
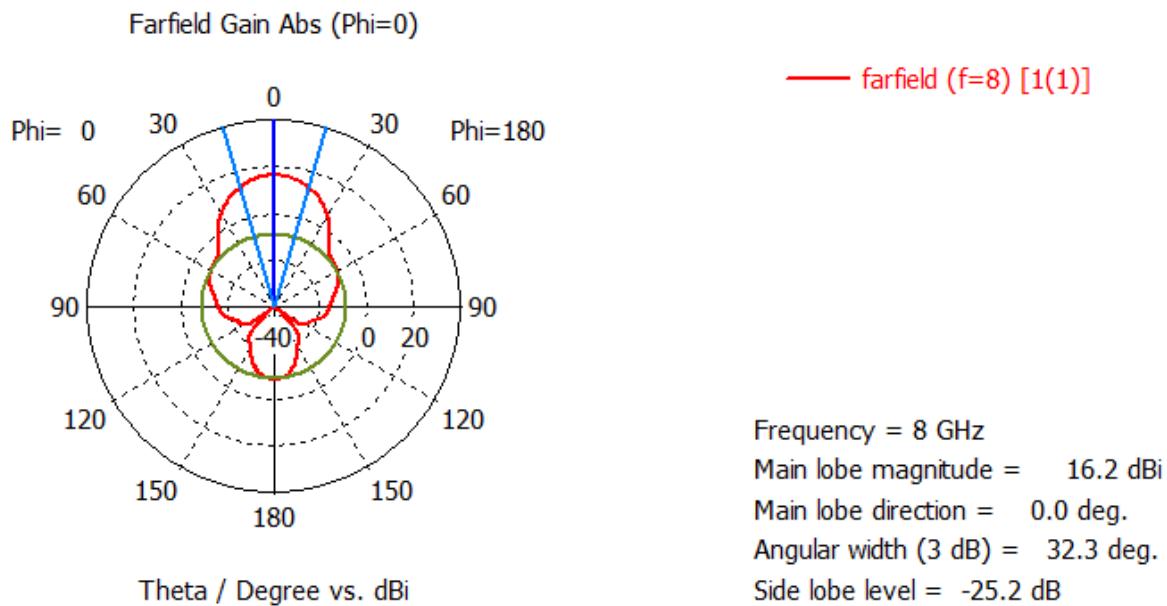


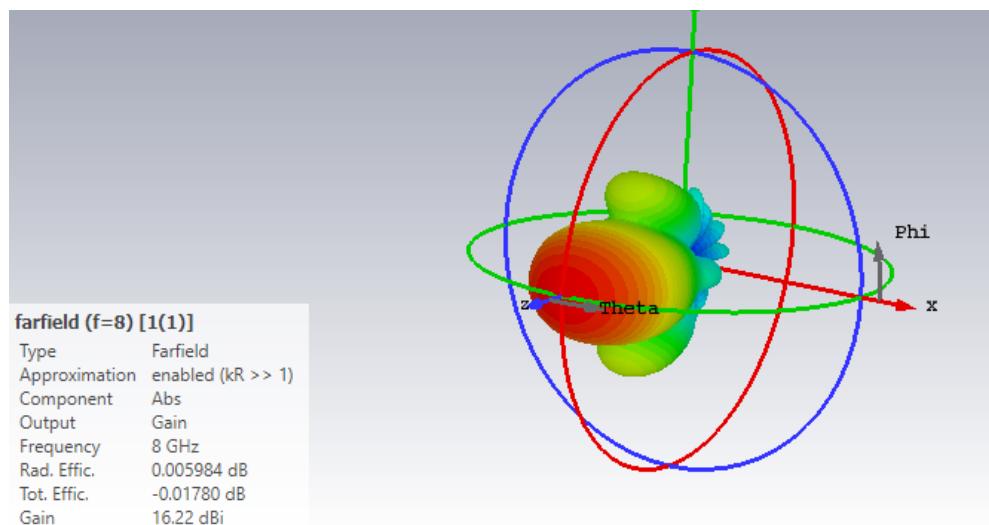
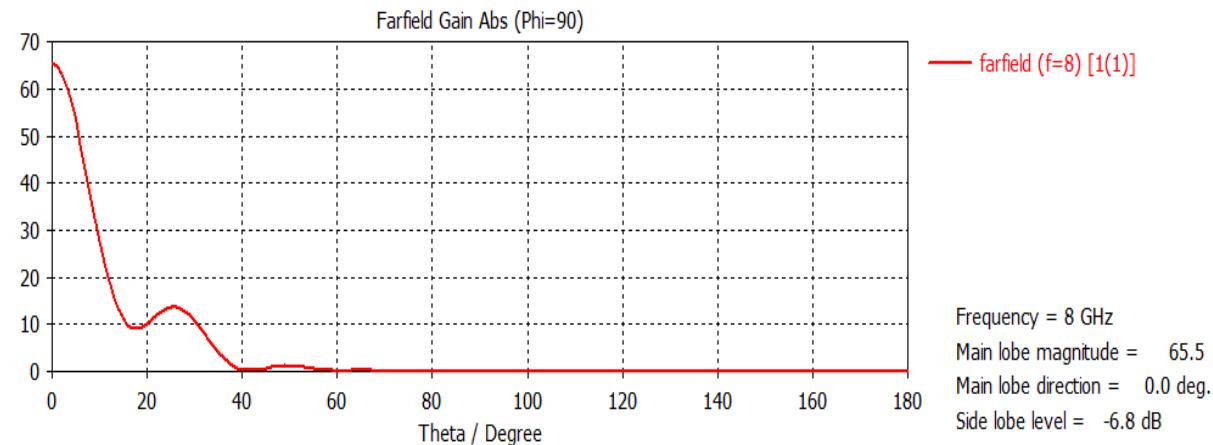
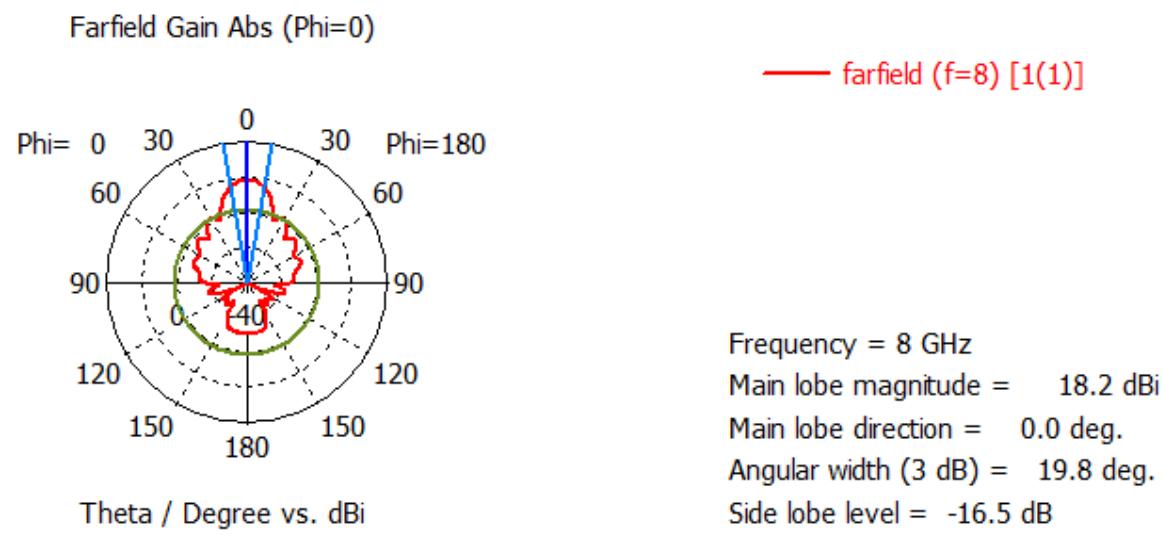
Antena Horn + Lente:

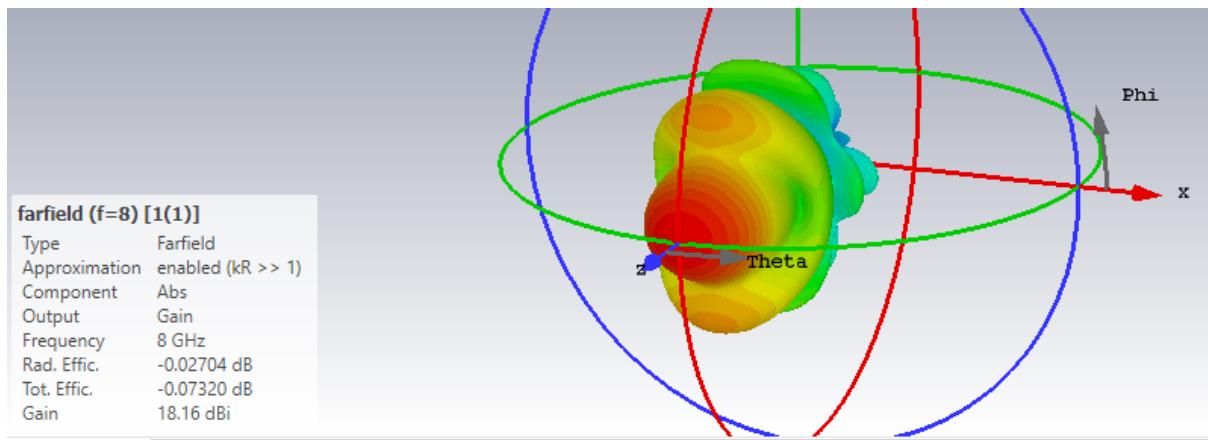


Directividad y ganancia:

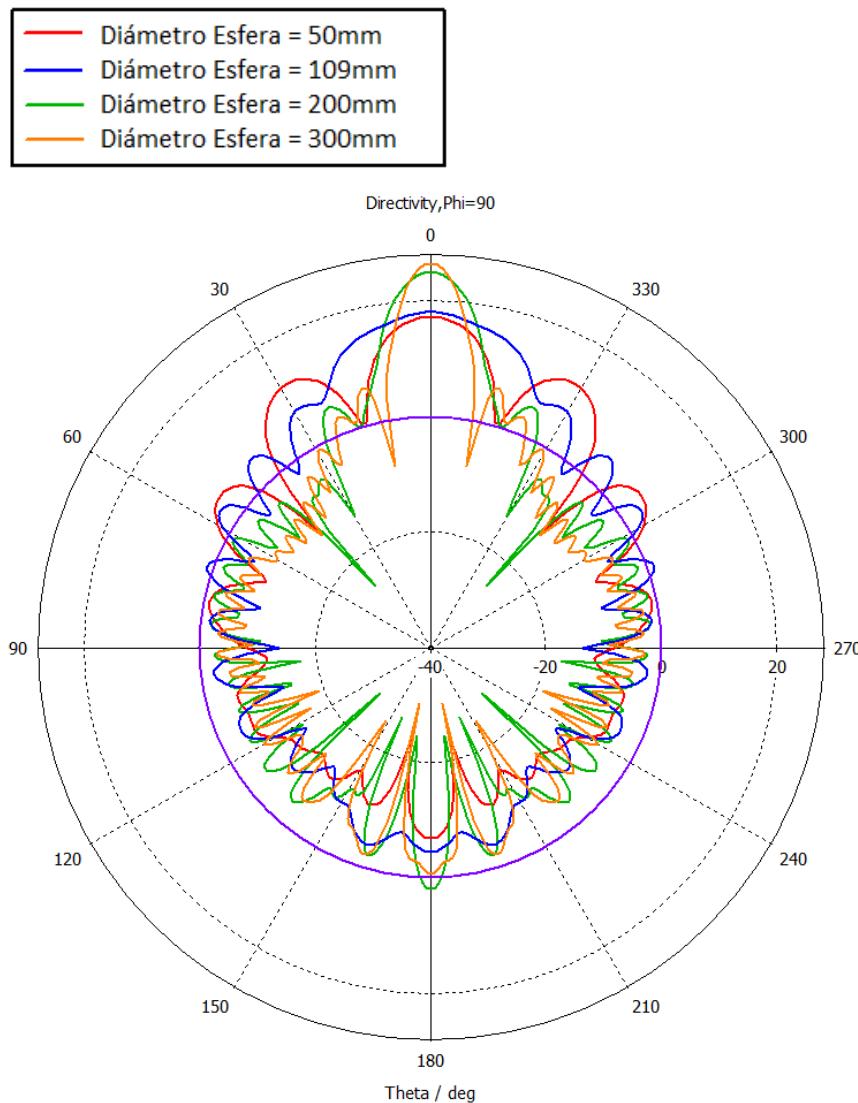
Antena Horn:



**Antena Horn + Lente:**



Analizando ambos casos , podemos ver que la presencia de la lente Lüneburg frente a la antena es evidente y que genera un impacto considerable en su ganancia y directividad. Podemos ver que obtenemos una ganancia de 1.56 veces en el lóbulo de radiación central al colocar la lente y que el Angular width (a 3 db) disminuye en 10 grados. Por otro lado , vemos que la presencia de la lente genera lóbulos secundarios apreciables que no estaban presentes en la condición inicial de la antena horneada. Finalmente al ver el fairfield en 3D podemos apreciar que existe cierta elipticidad en la propagación de la onda cuando utilizamos la antena horn sola , y al introducir la lente Lüneburg al sistema vemos que esa geometría desaparece y observamos una propagación más simétrica en el eje Z. Esto también es evidente en el gráfico en 2D al observar una similitud con una gaussiana.

Directividad y Ganancia en función del diámetro de la esfera:**Diseño y construcción de la Lente:**

Luego de las simulaciones previamente mencionadas , se procedió a desarrollar la lente Lüneburg. Para ello desarrollamos una herramienta en Python para poder generar los modelos 3D en formato .stl para poder ser importados al CST Studio e impreso mediante una impresora 3D FDM.



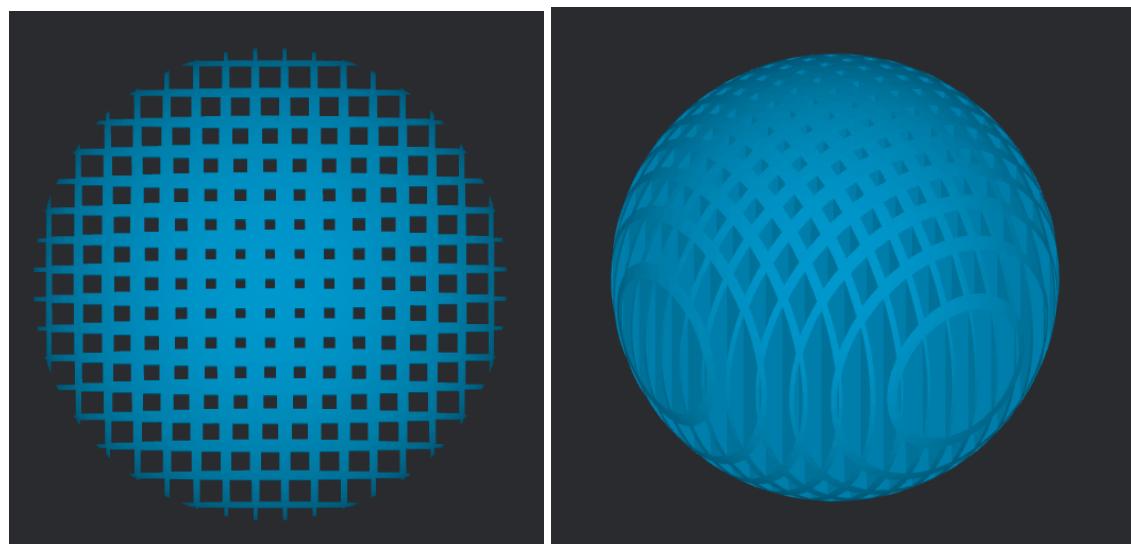
Link del repositorio del proyecto: <https://github.com/jboirazian/LuneburgLensGenerator>

La herramienta se basa en el módulo de python [Pymesh](#) que cuenta con diversas funciones básicas para generación de modelos 3D.

Nuestro objetivo principal con esta herramienta era:

- Tener control completo de la generación de la lente
- Evitar tener que usar un software de edición (pago o gratuito)
- Poder exportarlo a formato .stl para su impresión y importación en CST Studio
- Tener una herramienta open source... ya que no existe ninguna hoy en día.

Debido a utilizar una impresora FDM , nos propusimos a realizar un diseño cuyas cavidades se encontrasen realizadas en el 1 solo eje de la siguiente manera:



Parámetros de diseño:

Para el diseño de nuestra lente , hay que tener en cuenta los siguientes parámetros de diseño:

- Diámetro de la esfera
- Lado mínimo que tendrá la cavidad cuadrada central de la lente
- Separación entre cavidades
- Función por la cual variará el tamaño de la cavidad
- El ϵ del material

Algunos de estos parámetros fueron tomados de las simulaciones del primer cuatrimestre. El diámetro de la esfera fue uno de ellos , ya que de las simulaciones de farfields variando el diámetro obtuvimos que la mejor relación costo-beneficio era utilizar un diámetro de 200mm.

Sabiendo que estaríamos trabajando en banda X (8-12Ghz) , supusimos que para generar las cavidades en la esfera , estas mismas deberían estar en el orden de la longitud de onda de la frecuencia en la que estábamos trabajando dando entonces : $\lambda = 8\text{GHz}/C = 3.75 \text{ cm}$

Finalmente para la función de variabilidad de la lente , supusimos que para cumplir con el modelo teórico de la lente de :

$$\epsilon(r) = 2 - r^2$$

La dependencia del tamaño de la cavidad debería depender de forma cuadrática , siendo menor en el centro de la esfera y mayor en la periferia de la misma.

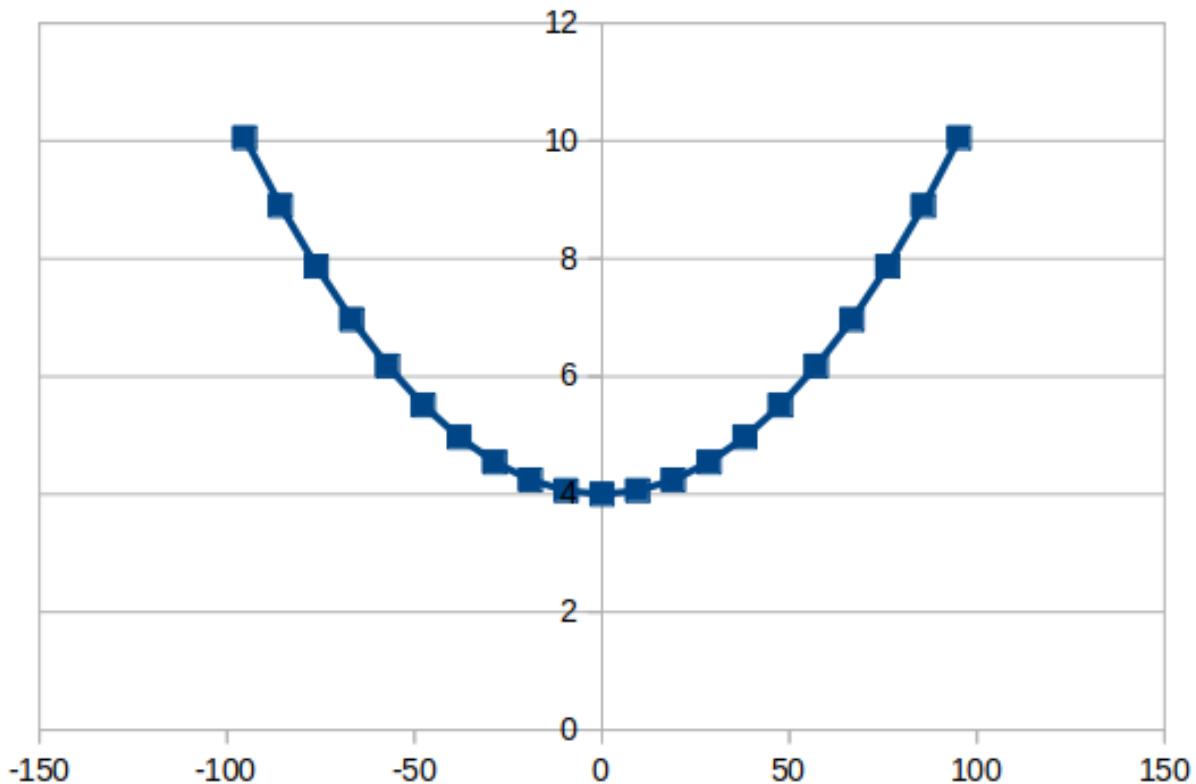
Luego de mucha iteración esta sería nuestra fórmula de variabilidad:

$$variability = \frac{(x^2 + y^2 + 3L)}{3}$$

A su vez estos fueron los demás parámetro finales de construcción:

- Diámetro de la esfera : 200mm
- Lado mínimo que tendrá la cavidad cuadrada central de la lente: 4mm $\approx \lambda/10$
- La separación entre cavidades: $D/16 = 12.5\text{mm}$

Estos parámetros nos permitieron generar el modelo .stl de nuestra esfera. El gráfico a continuación muestra cómo es la variabilidad de la esfera en Y=0:



Algunas cosa a observar de este gráfico son:

- $L(X=0\text{mm})=4\text{mm}$
- $L(X=100\text{mm})=10,046\text{mm}$
- 21 cavidades en $y=0$

Para la elección del material que utilizamos para imprimir nuestra lente , nos basamos en el siguiente paper realizado por la University of Arkansas:

University of Arkansas, Fayetteville

ScholarWorks@UARK

Electrical Engineering Undergraduate Honors
Theses

Electrical Engineering

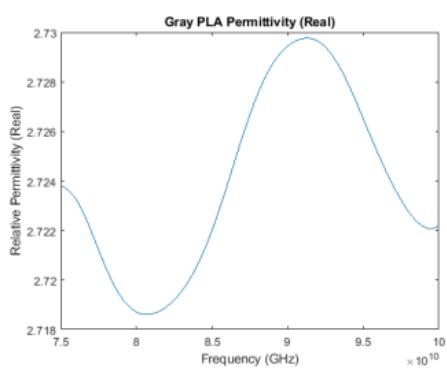
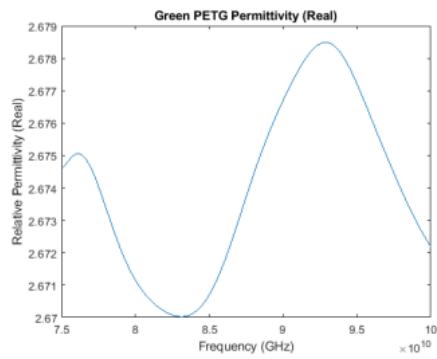
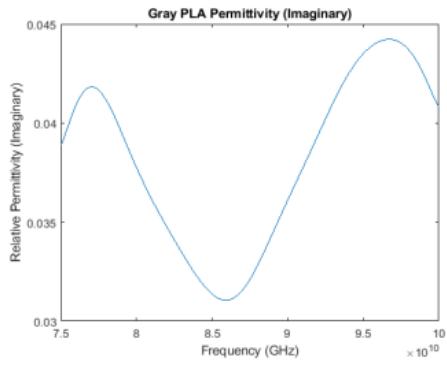
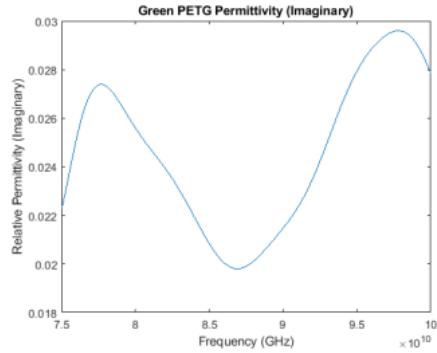
5-2022

Measuring the Electrical Properties of 3D Printed Plastics in the W-Band

Noah Gregory

Link al paper:<https://scholarworks.uark.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1086&context=eleguht>

El trabajo científico demuestra que múltiples materiales utilizados comúnmente en impresiones FDM (PLA,PETG y ABD) poseen parámetro de ϵ_r y $\tan(\Theta)$ estables en rangos de frecuencia del orden de los Ghz.

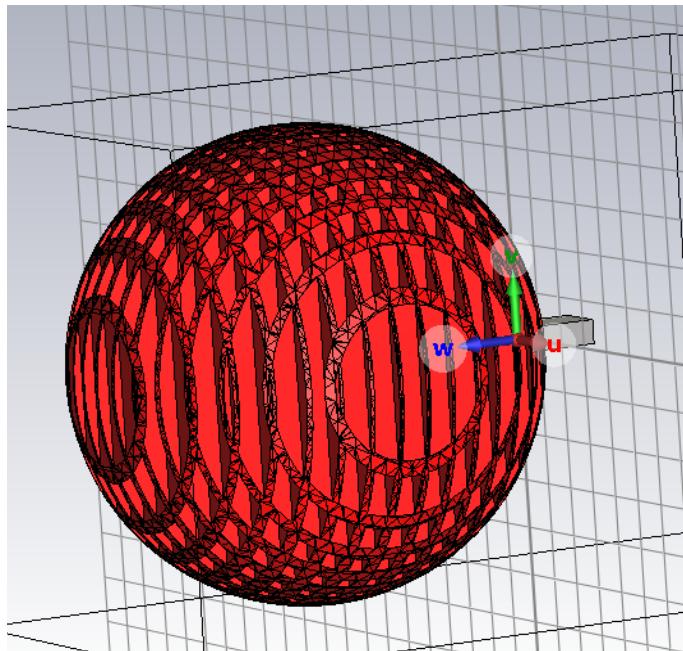
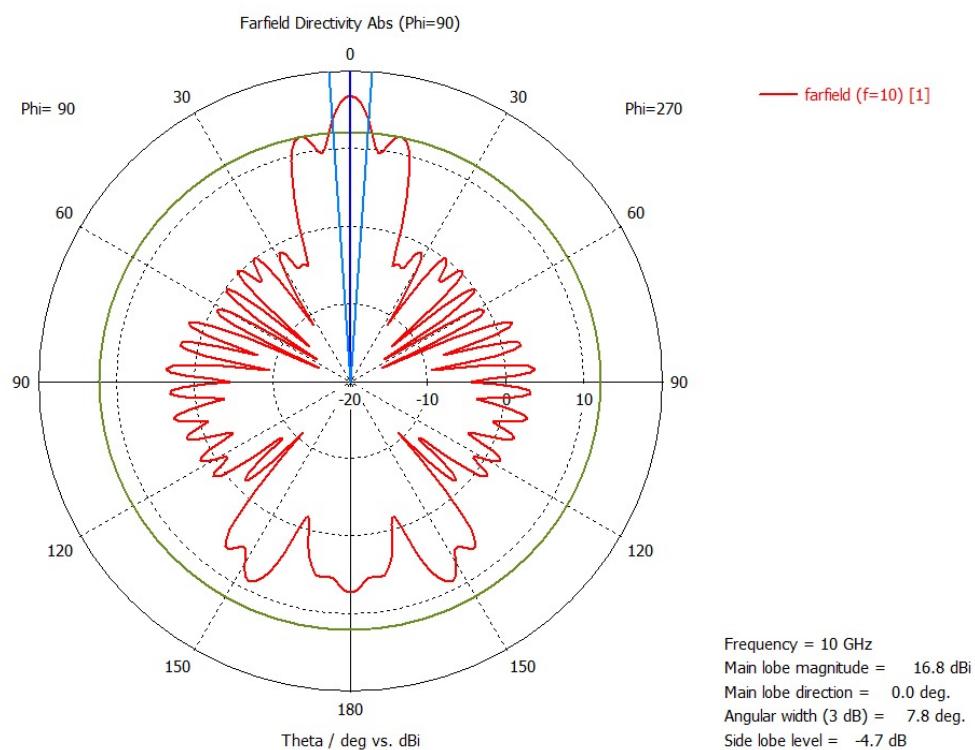
Figure 9: Relative Permittivity (ϵ) of Gray PLA (real)Figure 11: Relative Permittivity (ϵ) of Green PETG (real)Figure 10: Relative Permittivity (ϵ) of Gray PLA (imaginary)Figure 12: Relative Permittivity (ϵ) of Green PETG (imaginary)

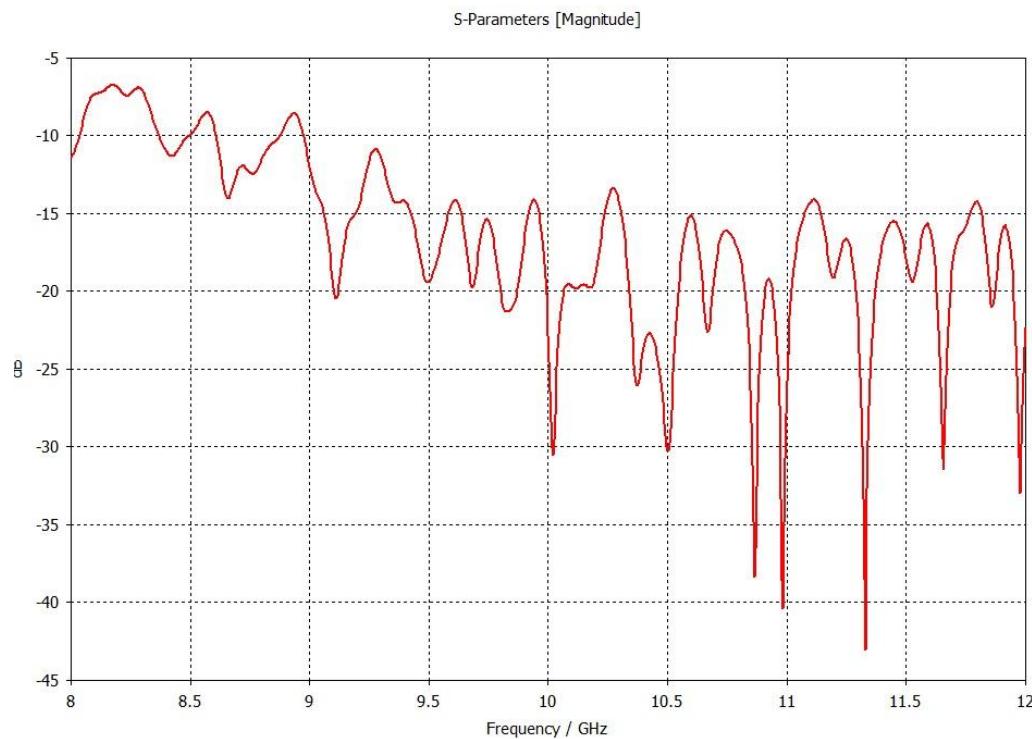
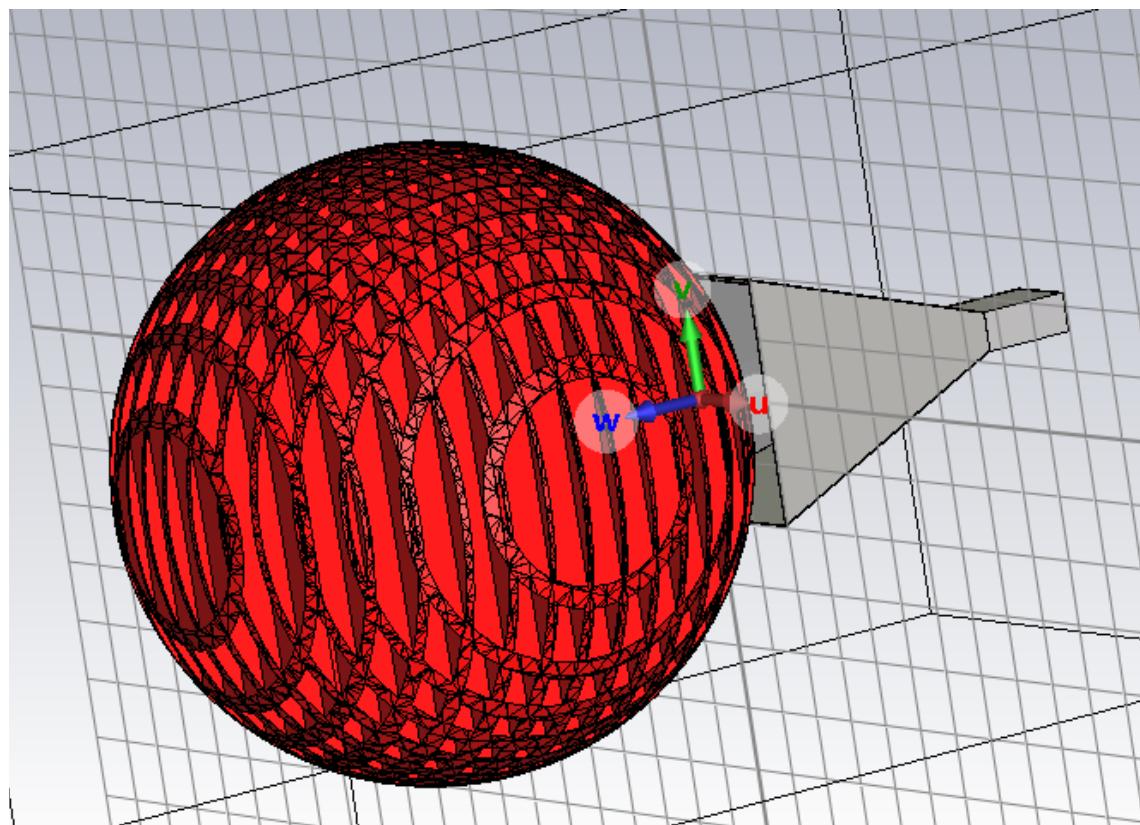
En el trabajo también se remarca que si bien , el valor real de la permitividad es relativamente estable en el rango de 7.5 GHz a 10 Ghz (con una variación menor al 1%), el pigmento utilizado para darle color al plástico puede ser un factor determinante en el comportamiento del material.

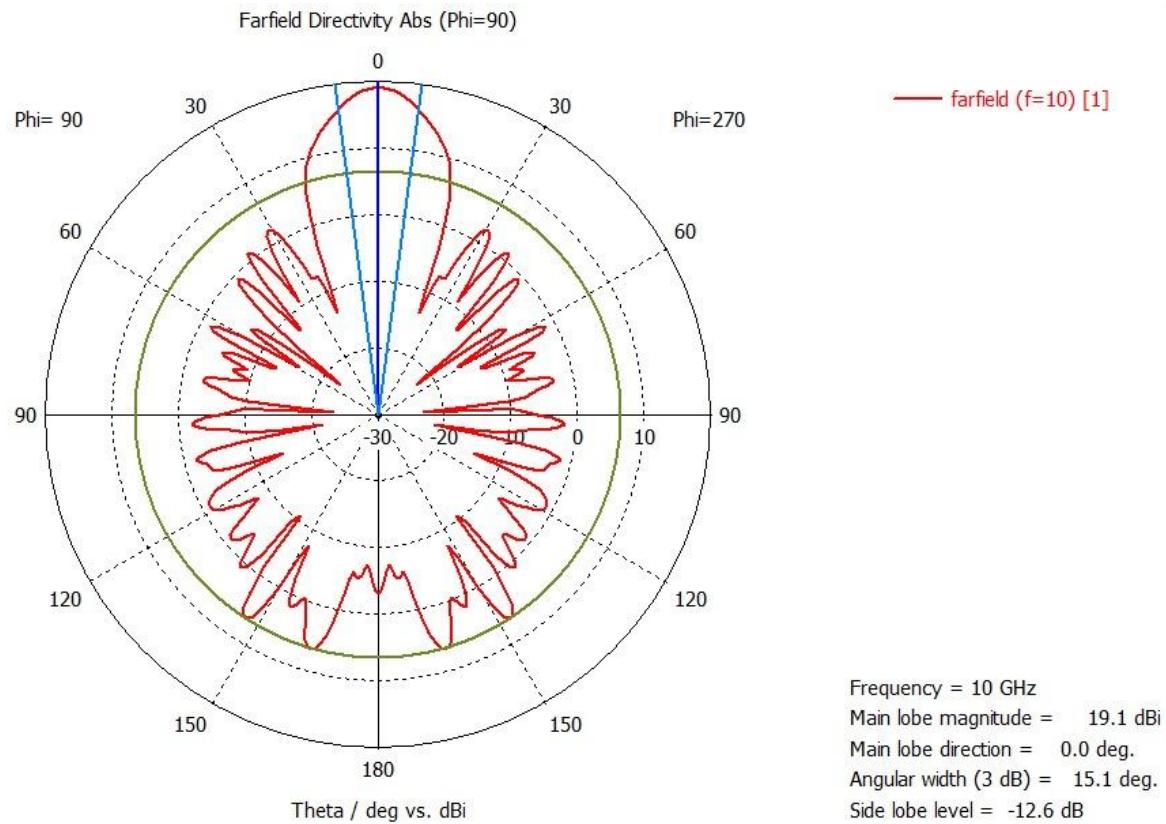
Debido al trabajo mencionado anteriormente , además de su disponibilidad y costo , elegimos el material plástico PLA con un ϵ_r de 2.7.

Simulaciones realizadas en CST Studio:

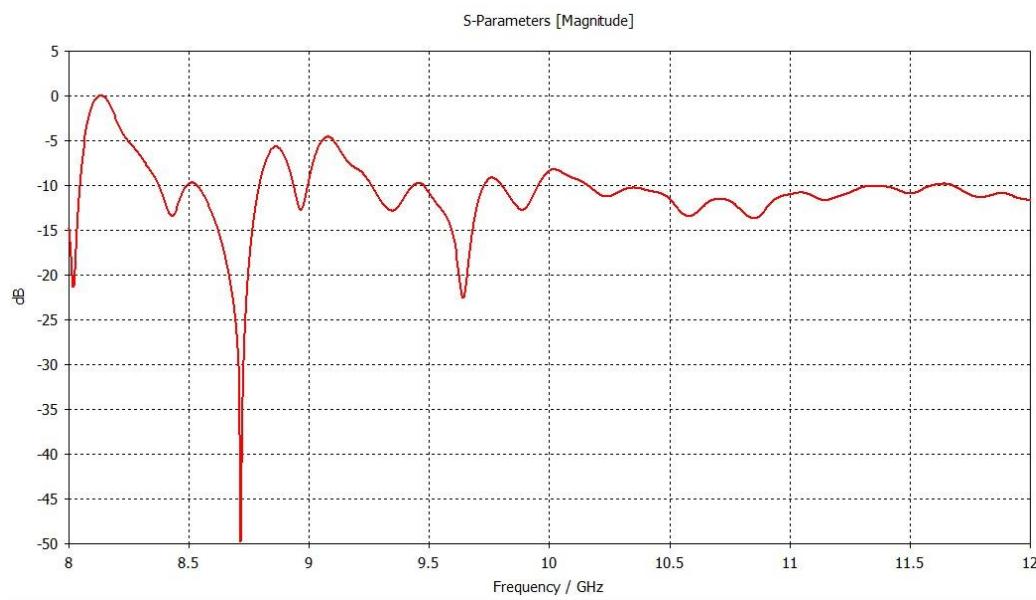
CASO 1: Lente Lüneburg con guia de onda

**Farfields:****Parámetro S11 de Lente con Guía de onda:**

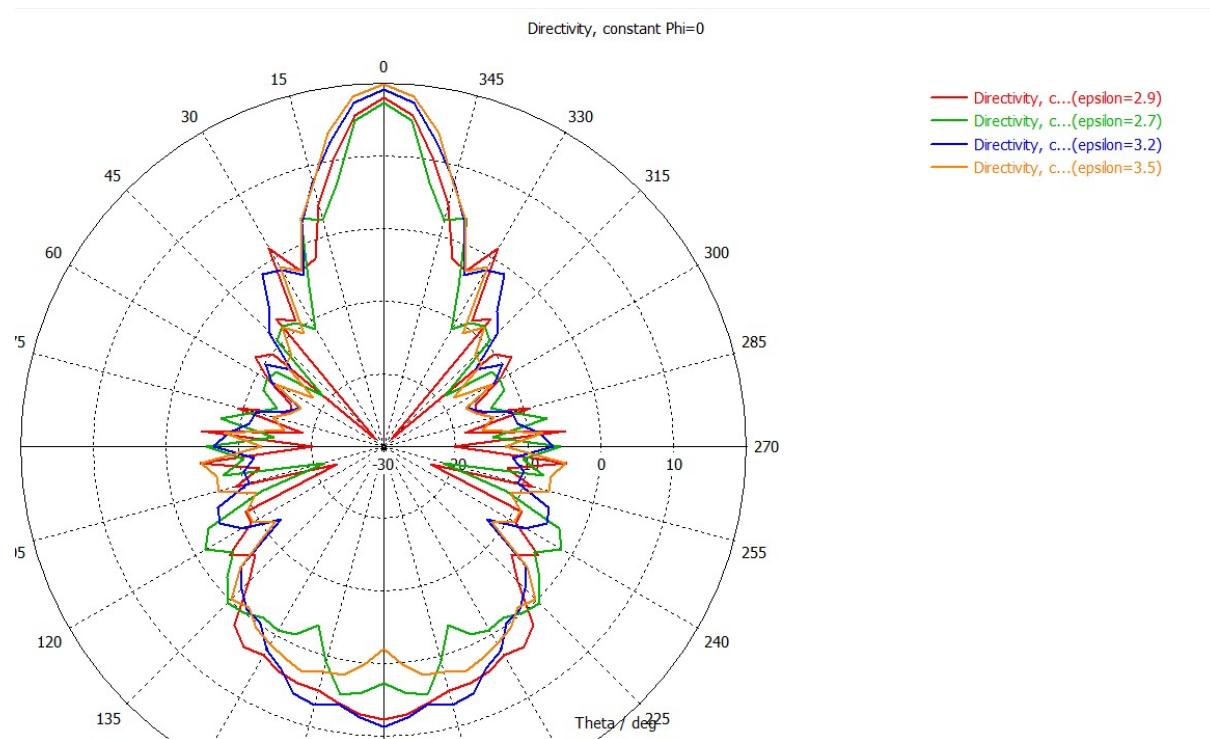
**CASO 2: Lente Lüneburg con antena horn****Farfields:**



Parámetro S1-1 de lente con Horn:



Farfields variando el epsilon relativo:

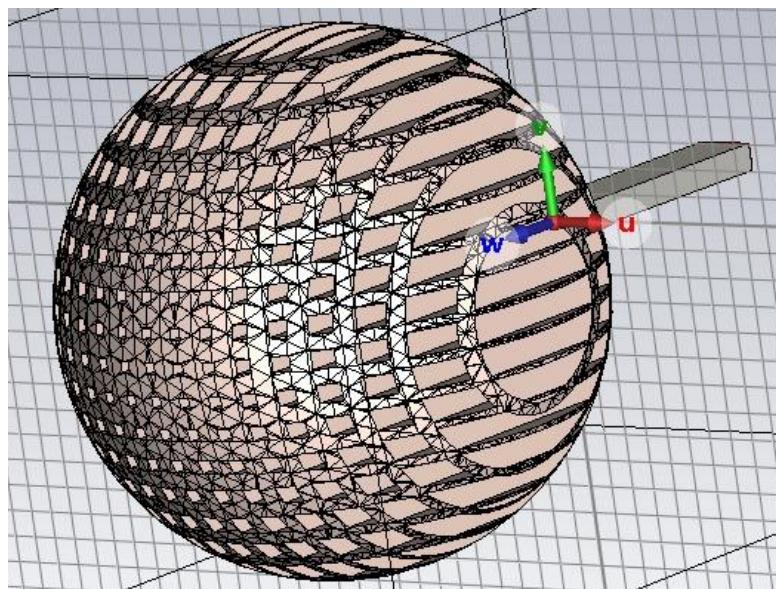


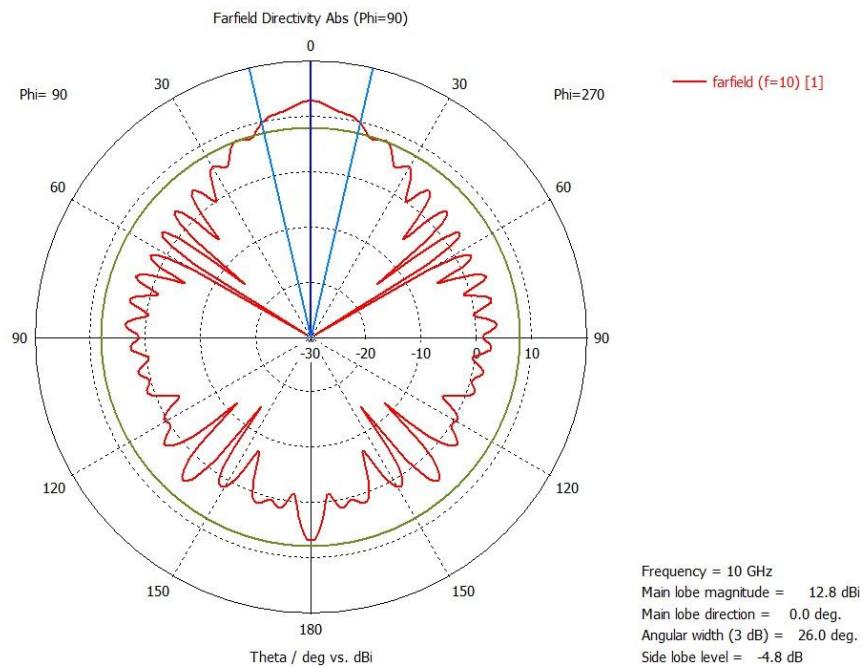
Se realizó una simulación variando el epsilon para saber de qué manera nos afectaría si el PET utilizado para la impresión tuviera alguna diferencia con el epsilon teórico que debería tener. Como se observa en la simulación, al variar epsilon +10% no se tienen variaciones significativas en el comportamiento de la lente.

Orientación de la lente:

Se realizaron simulaciones variando la orientación de la lente, en la cual notamos que esta afectaba mucho el resultado. La mejor orientación de la lente es la presentada anteriormente, que sería con las ranuras en orientación vertical.

Fairfield con las Ranuras horizontales:

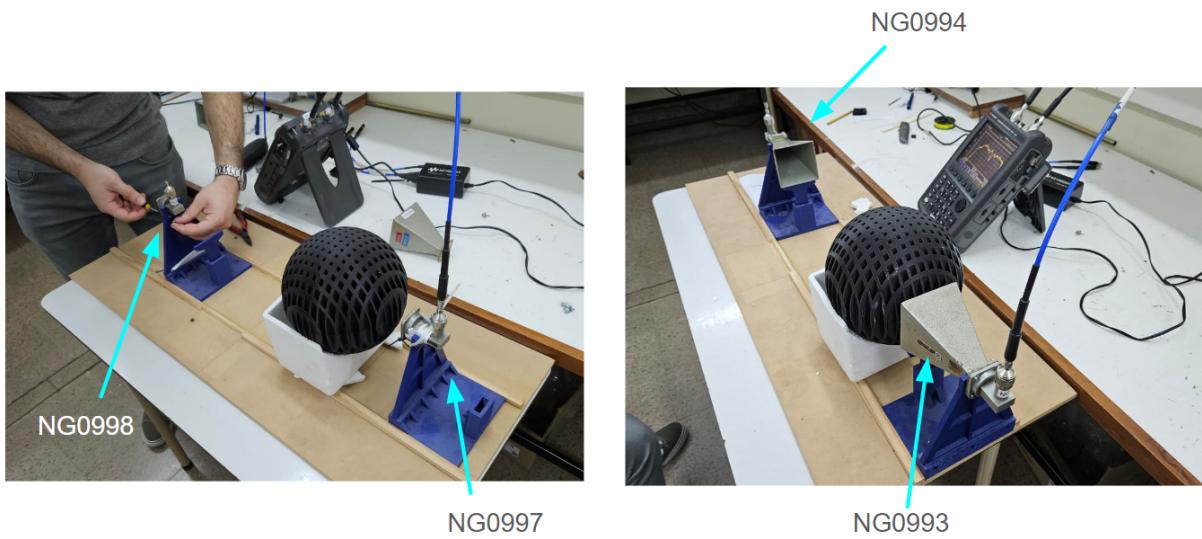




Medición:

Las mediciones de la lente se realizaron en el laboratorio abierto de la facultad, con la ayuda del profesor Matias Hampel.

Se realizaron dos setups de medición, el primero con la lente y guías de onda y luego un segundo setup agregando antenas Horn a las guías.

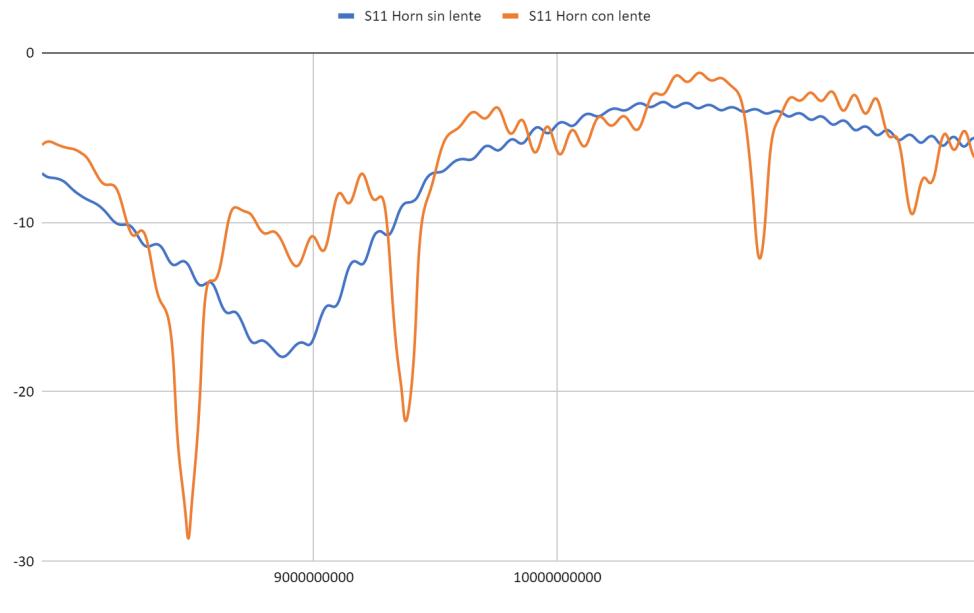


(Setup de medición con notas de los elementos utilizados)

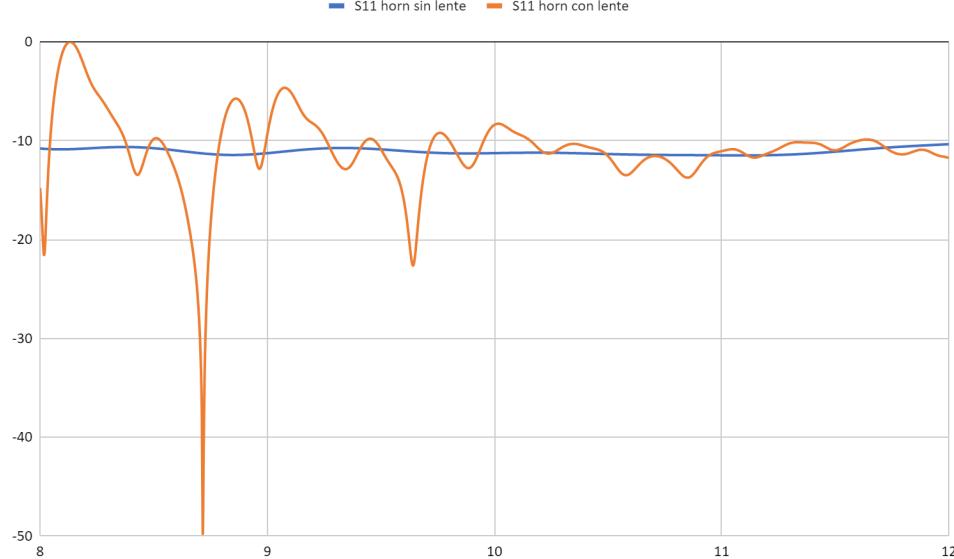
Comenzamos realizando mediciones con el setup de guías de onda, pero los resultados de las mismas no estaban siendo precisos y confiables. Se dificulta mucho alinear las guías de

onda y la lente para obtener buenos resultados, por lo que se decidió pasar al segundo setup, en el cual se obtuvieron buenos resultados.

Medición de S1-1:



(Medición S1-1 con y Horn)

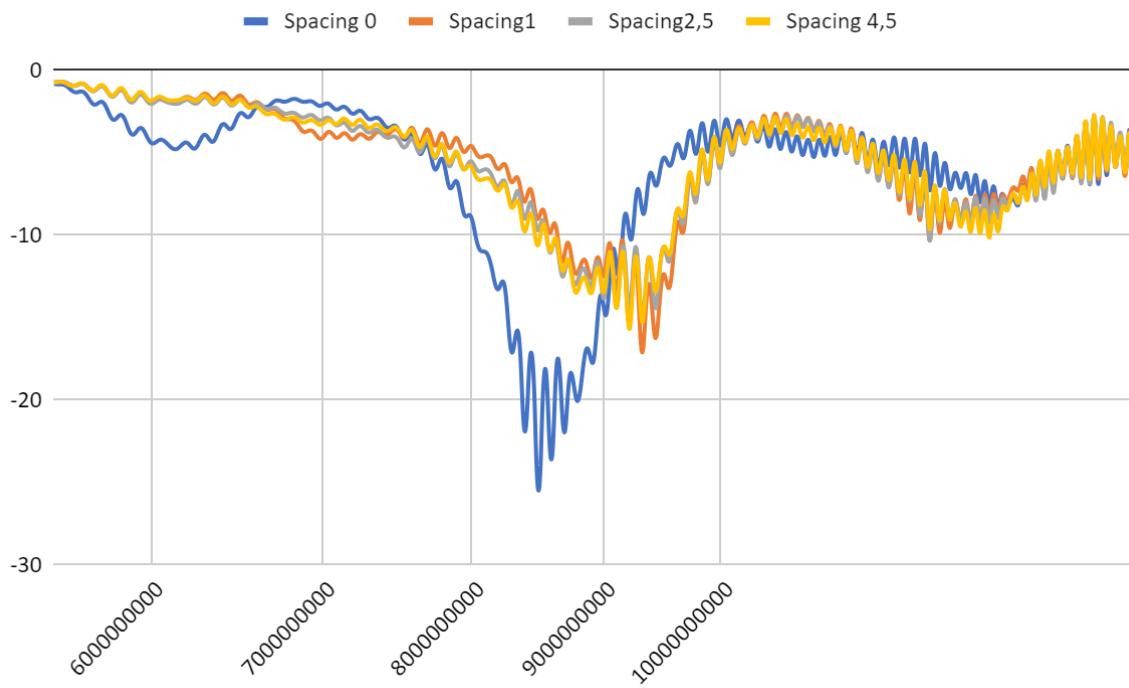


(Simulación S1-1 con y Horn)

Como se puede observar, comparando los resultados de las mediciones con la simulación realizada en el CST Studio, se pueden notar cambios similares en ambos casos cuando se agrega la lente en el sistema.

Medición de S1-2:

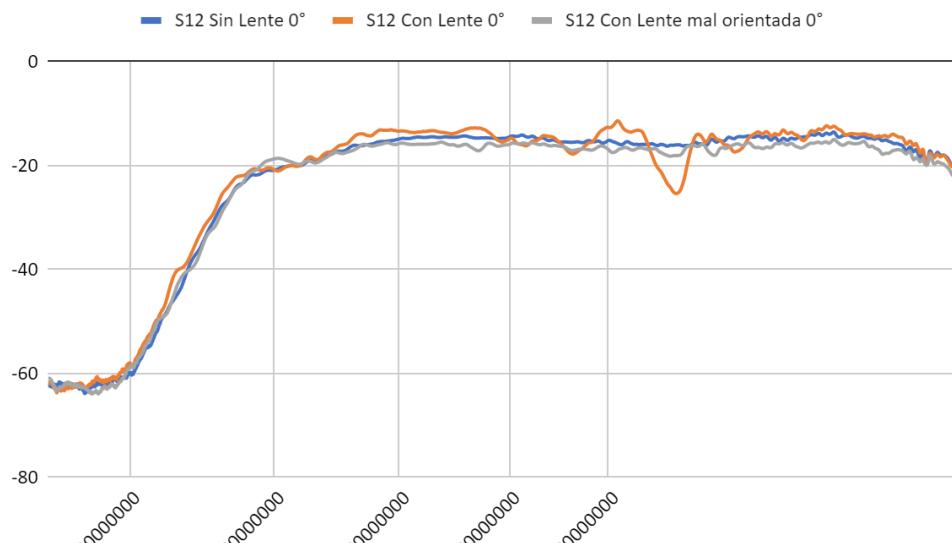
Luego se realizaron una serie de mediciones del parámetro S1-1 modificando el Spacing entre la lente y la antena Horn.



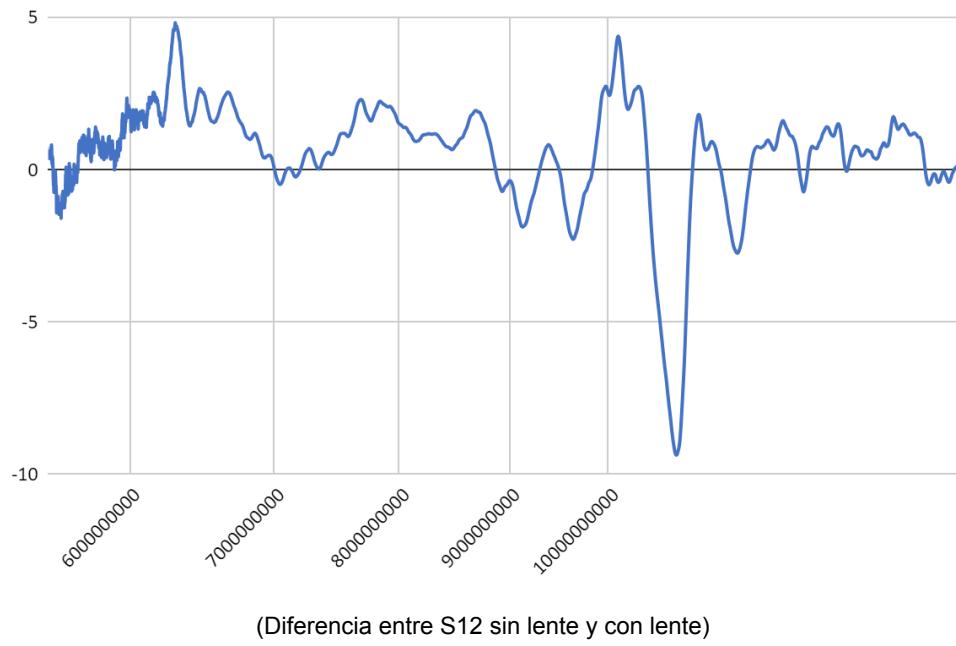
(Medición S1-1 con Horn, variando Spacing)

Se puede observar, que el mejor caso se obtiene cuando la lente se encuentra completamente pegada a la antena, conclusión a la cual también se había llegado en las simulaciones.

Luego pasamos a las mediciones del S1-2, donde también se pudieron observar cambios al momento de agregar nuestra lente al sistema.



(Medición S1-2)

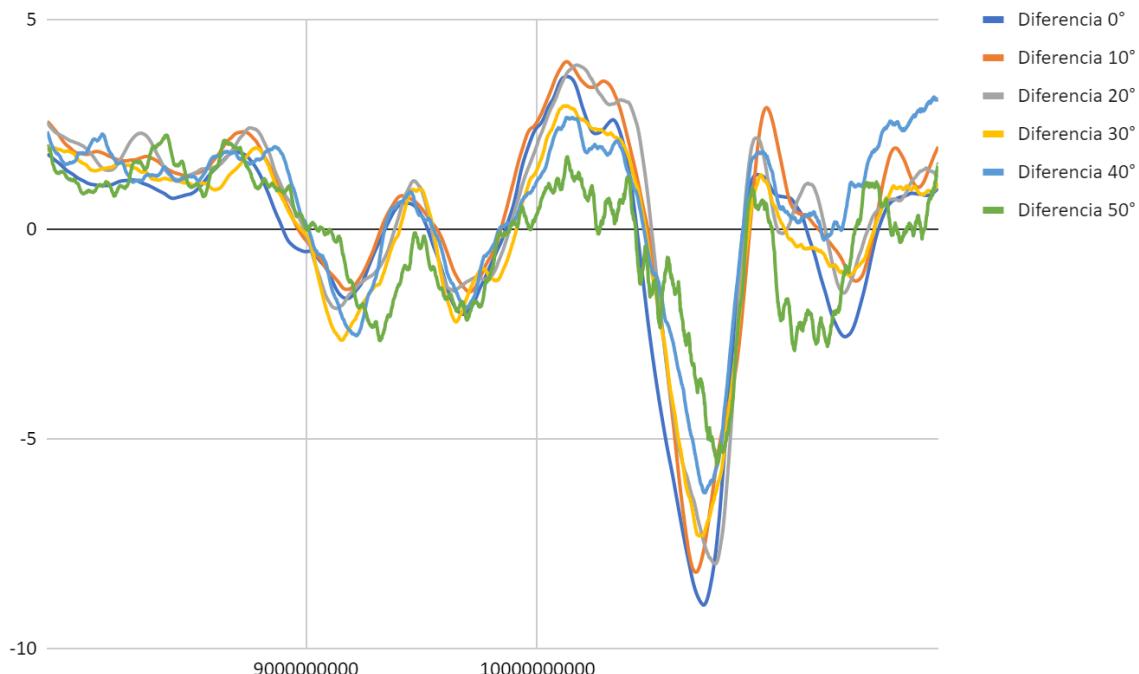


Además en las mediciones se pudo observar que efectivamente, cambiando la orientación de la lente, se perdía la funcionalidad de la misma y se obtiene una atenuación a lo largo de todo el rango de frecuencias de la banda X.

Medición de Directividad:

Para la medición de directividad, se fue variando el ángulo de la antena Horn en la cual no estaba la lente desde 0° hasta 50° con pasos de 10° para observar la ganancia que se obtenía para cada caso, obteniendo para cada caso la ganancia sin la lente y luego comparando la misma medición con la lente en su posición.

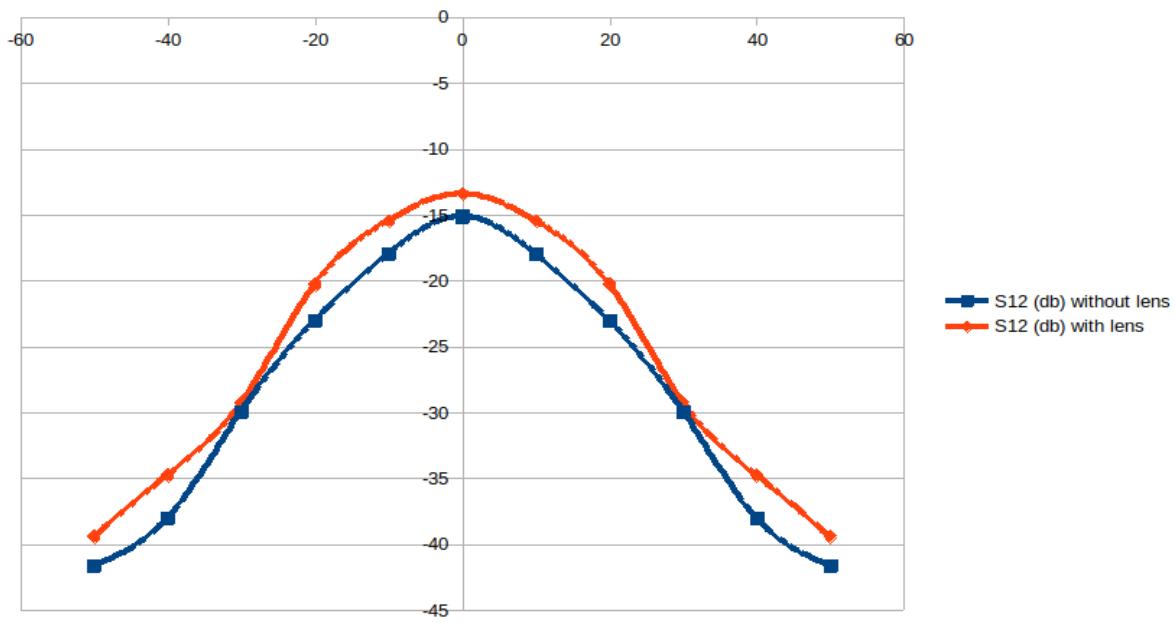
Se obtuvo el siguiente resultado:



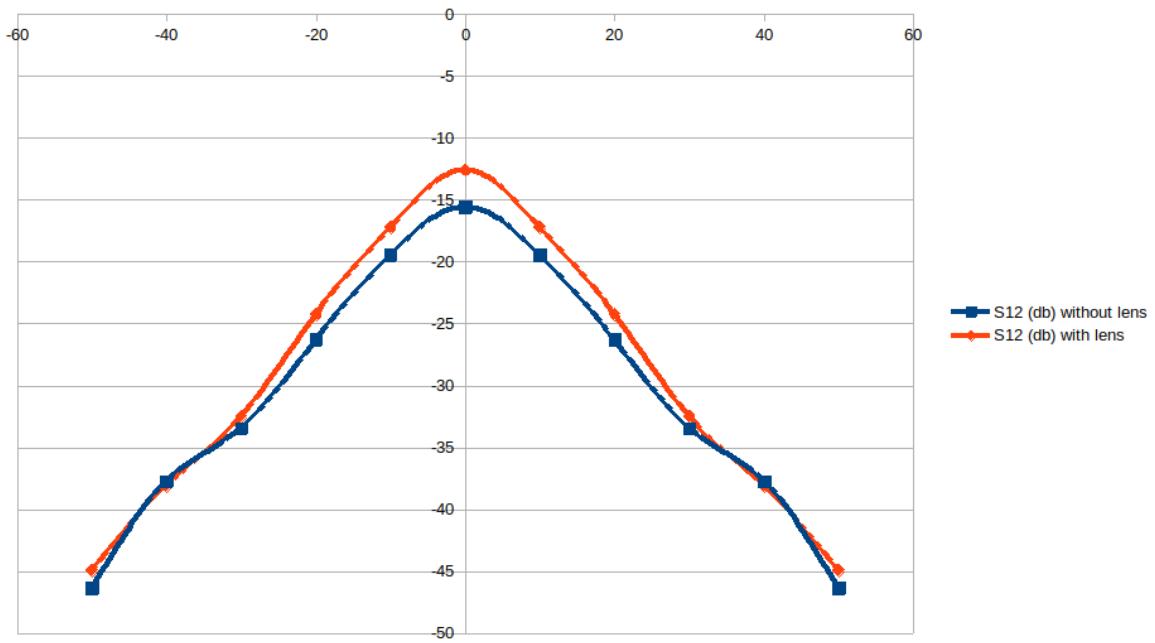
(Diferencia entre S12 sin lente y con lente variando el ángulo entre puertos)

Como se puede observar a medida que se aumenta el ángulo, la diferencia entre la medición con o sin lente va disminuyendo, teniendo el peor resultado para un ángulo de 50°, lo que nos indica que efectivamente el agregado de la lente mejora la directividad de la antena.

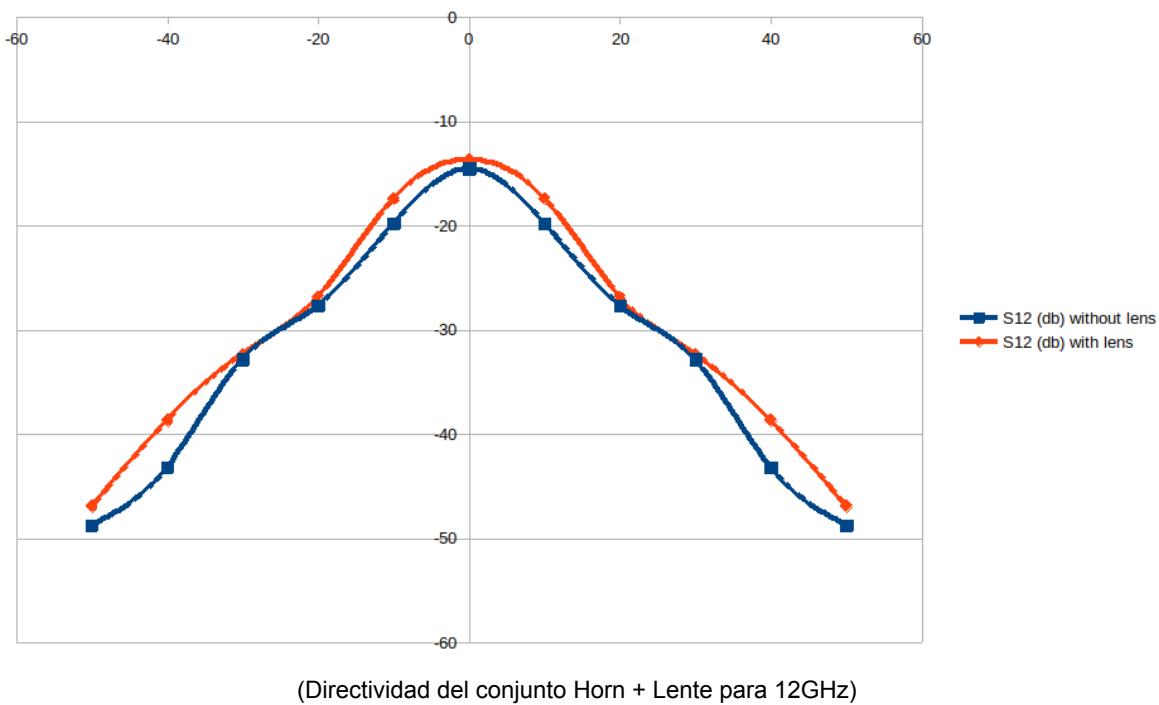
En los siguientes gráficos se observan las mismas mediciones pero en función del ángulo para las frecuencias de 8GHz, 10GHz y 12GHz.



(Directividad del conjunto Horn + Lente para 8GHz)



(Directividad del conjunto Horn + Lente para 10GHz)



(Directividad del conjunto Horn + Lente para 12GHz)

Medición Ganancia en Farfield:

Por último se realizó una medición aumentando la distancia entre las antenas para asegurarnos de estar dentro del rango de Fairfield y se realizó una última medición de ganancia.



(Setup de medición de ganancia en Farfield)

En esta medición se logró observar una ganancia de 6db @8GHz al agregar la lente , luego de ajustar y centrar la lente para obtener una ganancia óptima. En esta medición las antenas se encontraban a una distancia de 120cm

S12 sin lente: -25.7dB

S12 con lente: -19.8dB

Conclusiones :

Pudimos comprobar que es posible fabricar una lente Lüneburg y obtener resultados significativos utilizando materiales convencionales como el PLA utilizados en impresiones 3D.

Si bien algunos de los resultados de los parámetros S11 simulados no se condicen con la realidad , los resultados de los parámetros S12/S21 y directividad , se condicen con las simulaciones y los ensayos. Sospechamos que se debe a un setup inadecuado para la caracterización de la lente.

A modo de obtener mejores resultados hemos detectado las siguientes mejoras que se podrían hacer:

- Usar una impresora SLA : Utilizar una impresora de estas características , en vez de una FDM , nos daría mayor libertad en cuanto a materiales así como permitir realizar geometrías más complejas (irrealizables en una impresora 3D FDM)
- Usar materiales con baja tangente de pérdida: La utilización de materiales como PTFE o resinas con pérdidas , podría significativamente mejorar la performance de la lente , en especial en altas frecuencias.
- Probar distintos diseños: revisando múltiples publicaciones científicas , hemos visto que no existe un “golden sample” para el diseño de una lente de estas características. Cada diseño presenta ventajas y desventajas en cuanto a construcción y deben ser analizados cualitativamente y mediante ensayos para entender cual es el mejor para nuestro caso.
- Trabajar mediante un proceso continuo de diseño , simulación e iteración , para obtener resultados mejores.