

Medidas Electrónicas II

Informe Final

Diseño, simulación y construcción de antena en banda X



Docentes:

Ing. Alejandro M. Henze
Ing. Juan Manuel Geria
Ing. Patricio A. Greco

Estudiante:

Monteiro, Tiago

R5054 - 2021

Introducción

Al momento de diseñar una antena es frecuente el uso de simuladores para determinar sus parámetros, más teniendo en cuenta que se trate de una estructura compleja. Los programas para la simulación de campos electromagnéticos y estructuras radiantes son, muchas veces, de un alto costo económico y con licencias temporales que deben ser renovadas periódicamente.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la cátedra propuso realizar este proyecto que intenta utilizar el software OpenEMS, de licencia libre, para la simulación de antenas horn.

Los requisitos del proyecto eran básicamente 3:

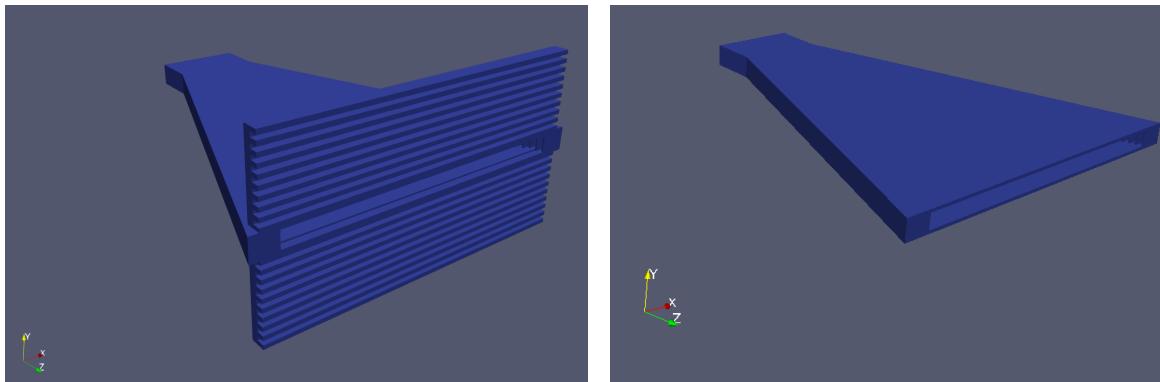
- Simular una antena horn con 30dB de supresión de lóbulos laterales y una ganancia de aproximadamente 20dBi en banda X.
- Simular el adaptador de conector tipo N a guía de onda para la banda antes mencionada.
- Construir realizar las mediciones pertinentes sobre estructuras obtenidas.

A continuación se detalla el camino seguido para el desarrollo del proyecto.

Primeras estructuras horn en OpenEMS

En OpenEMS [1] las estructuras son definidas por vectores o listas de valores que representan las secciones transversales de los volúmenes que luego deben ser extruidas para generar los objetos en un espacio tridimensional. Esto produce cierta dificultad al empezar a diseñar un volumen si no se lo desarrolla dando pequeños pasos. Por este motivo se decidió empezar con estas primeras estructuras de antenas tipo Horn que, si bien no eran lo pedido por la cátedra, nos permitieron entender la mecánica del modelado en OpenEMS. Dicho de otra forma, el objetivo en esta etapa era aprender a desarrollar y definir estructuras con las funciones de OpenEMS.

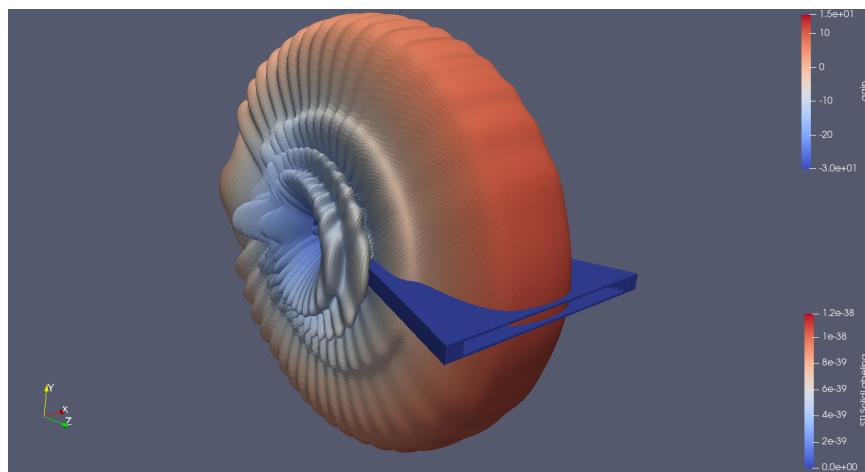
Se intentó replicar la antena estudiada en [2] que servía como punto de partida.



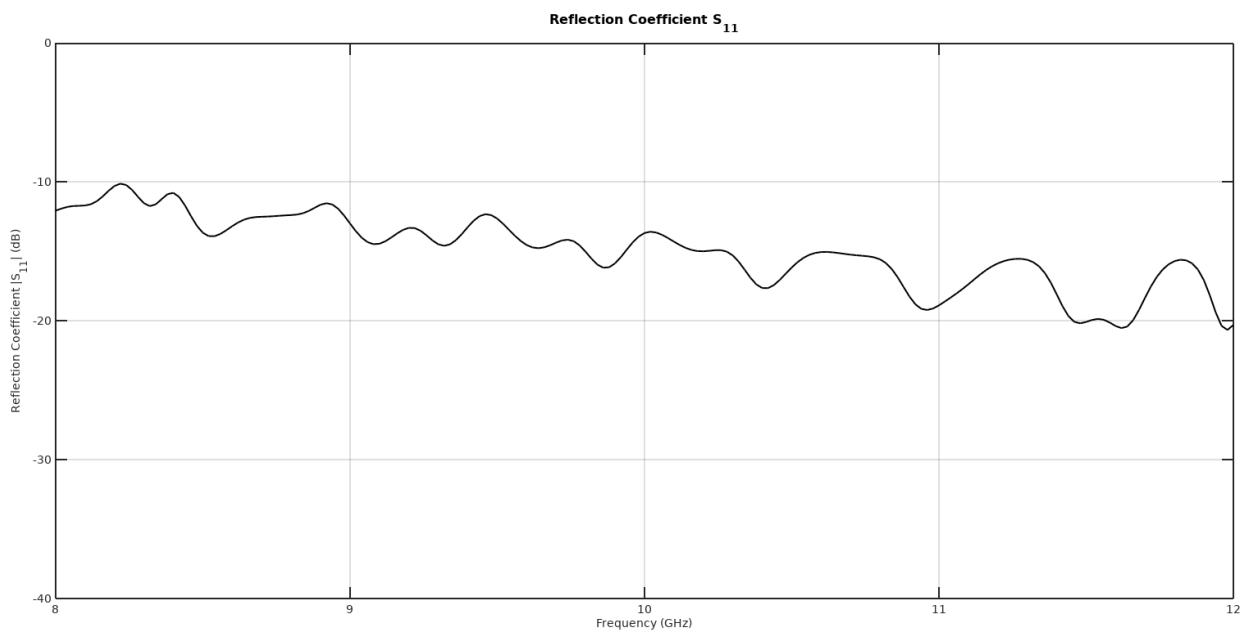
Se trata de dos antenas Horn corrugadas solo en las paredes paralelas al campo eléctrico que se propaga (teniendo en cuenta un modo de propagación TE10).

Simulaciones

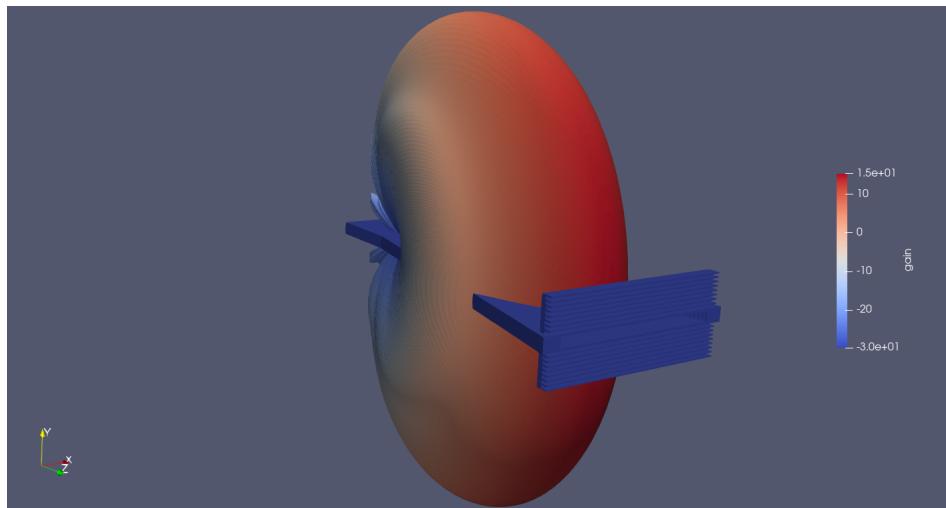
Partiendo de las estructuras antes mostradas, se realizaron las simulaciones de las mismas. Para el caso de la antena sin barreras, se puede ver una gran parte de la radiación hacia atrás. Es justamente por esto que en el trabajo de investigación [2] agregan las barreras que se ven en la segunda antena.



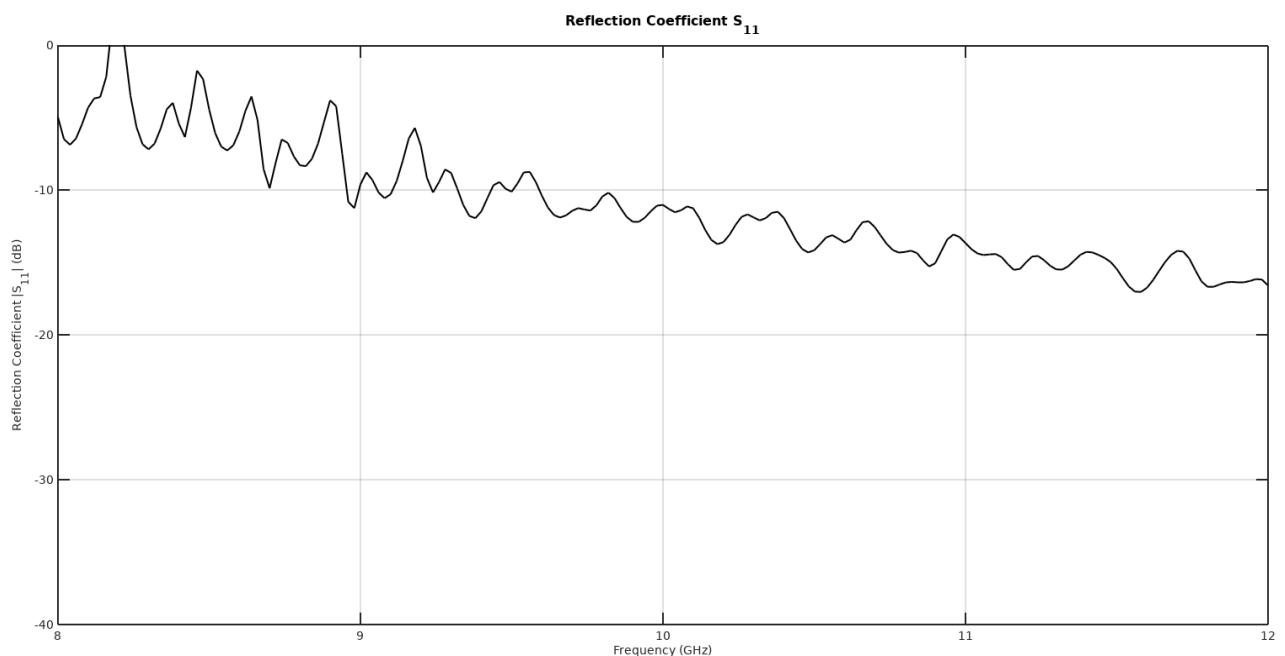
El S11 correspondiente a la antena sin barreras es el siguiente:



El siguiente paso fue intentar simular la antena con las barreras para entender cómo ésto mejoraba el diagrama de radiación. Se agregaron las barreras en la abertura de la antena, haciendo contacto con la misma y manteniendo la distancia de las solapas entre ellas y, para el caso de la primera solapa, entre ella y la boca de la antena.



El S11 correspondiente a la antena con barreras es el siguiente:



A pesar de que en el paper citado anteriormente no se encontraban las medidas de la antena, se pudo llegar a un resultado similar en los diagramas de radiación. Esto daba la pauta de que las simulaciones no estaban tan lejos de lo que se obtenía con otros simuladores que no tienen licencia libre. Nuevamente, sirvió como un punto de arranque, los siguientes pasos serían los que permitirían desarrollar la antena requerida por la cátedra.

Vale la pena mencionar que para una mejor simulación y para no tener que estar corrigiendo el código cada vez que se cambia un parámetro, cada simulación en el proyecto está totalmente parametrizada. Es decir, basta solo con cambiar el valor de la variable que se desea estudiar para que la estructura se vuelva a generar completamente de acuerdo a las medidas especificadas.

Por otra parte, también hay que mencionar que gran parte de este arranque fue gracias a los ejemplos que se consiguieron en internet. Principalmente se trata de un post encontrado en el blog de antenas “Antenna Designer’s Notebook” [3] que también se encuentra en el link con referencia [4] que se basa en el estudio de [5]. El otro ejemplo que fue de ayuda fue el que deriva del video con referencia [6]. Todos estos ejemplos tratan sobre antenas cilíndricas a diferencia de lo que la cátedra nos solicita, que las antenas diseñadas por nosotros sean rectangulares.

Programa de simulación

Luego de los resultados relativamente satisfactorios obtenidos en las simulaciones anteriores, se comenzó a desarrollar un programa en Octave [7] que haciendo uso de OpenEMS pudiera generar las estructuras de antenas Horn. Por la característica que debía tener la antena a presentar, se debió también contar con la capacidad de que las antenas sean corrugadas. Por otro lado, para mejorar la forma de simular y optimizar tiempos, fue recomendación de la cátedra que el programa cuente con la capacidad de barrer valores de parámetros a elección del usuario en forma automática. Es así que se llegó al programa publicado en [8].

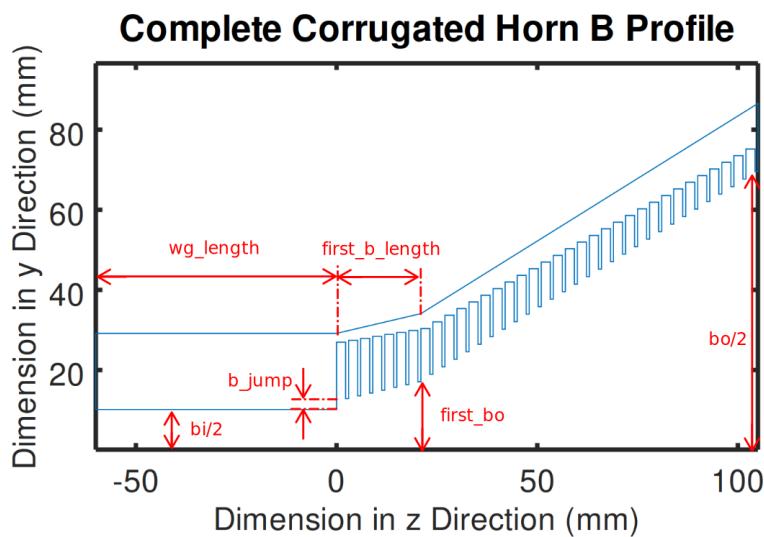
Modo de uso

Como se mencionó anteriormente, el programa se desarrolló en Octave que tiene un lenguaje con sintaxis similar a la de MATLAB. El script principal es “MagicScript.m” el cual define todas las variables que conforman la antena y el adaptador de coaxial a guía de onda.

El programa tiene la capacidad de simular:

1. **Antenas Horn con perfil lineal**, con o sin corrugaciones en paredes perpendiculares o paralelas de la apertura.
2. **Antenas Horn con perfil exponencial**, con o sin corrugaciones en paredes perpendiculares o paralelas de la apertura.
3. **Antenas Horn con perfil tangencial**, con o sin corrugaciones en paredes perpendiculares o paralelas de la apertura.
4. **Antenas Horn con perfil lineal en dos etapas**, con o sin corrugaciones en paredes perpendiculares o paralelas de la apertura.
5. **Adaptador coaxial a guía de onda**.

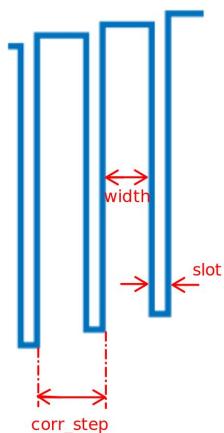
Algunas de las variables que se pueden definir para la antena Horn de perfil lineal en dos etapas son las que se muestran en la figura:



En este perfil se muestra el lado “B” de la antena (paredes perpendiculares al campo eléctrico teniendo en cuenta un modo de transmisión TE10). Estas mismas dimensiones se repiten para el perfil correspondiente al lado “A”, cambiando las letras “b” por “a”.

En el caso de un perfil exponencial o tangencial se usan los mismos parámetros de la guía de onda y apertura que los de la figura anterior con el agregado de algunos parámetros correspondientes a la ecuación para calcular cada perfil.

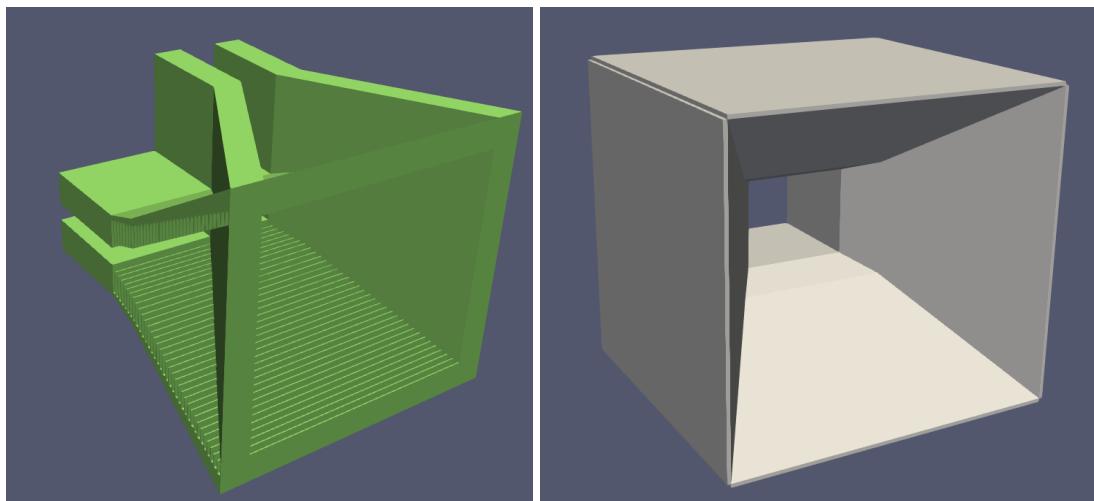
La profundidad de las corrugaciones también puede ser configurada con la variable “horn_depth_a” (o “horn_depth_b” según corresponda). En el caso que se configure en cero el programa variará la profundidad desde $\frac{\lambda_c}{2}$ hasta $\frac{\lambda_c}{4}$ siendo λ_c la longitud de onda de la variable “fcalc” (frecuencia a la cual se calcularán los diagramas de radiación y coeficiente de reflexión). En caso de querer diseñar una antena horn sin corrugaciones se deben configurar “HORN_USE_CORRUGATIONS_A” y “HORN_USE_CORRUGATIONS_B” en OFF.



La dimensión de las corrugaciones se calcula teniendo en cuenta el paso de las mismas, es decir, el período en el que se repiten expresado en milímetros y el porcentaje de éste que es ocupado por aire. El resto será ocupado por el material de la antena. De esta forma:

$$\begin{aligned} \text{width} &= \text{corr_step} * \text{delta} \\ \text{slot} &= \text{corr_step} * (1-\text{delta}) \end{aligned}$$

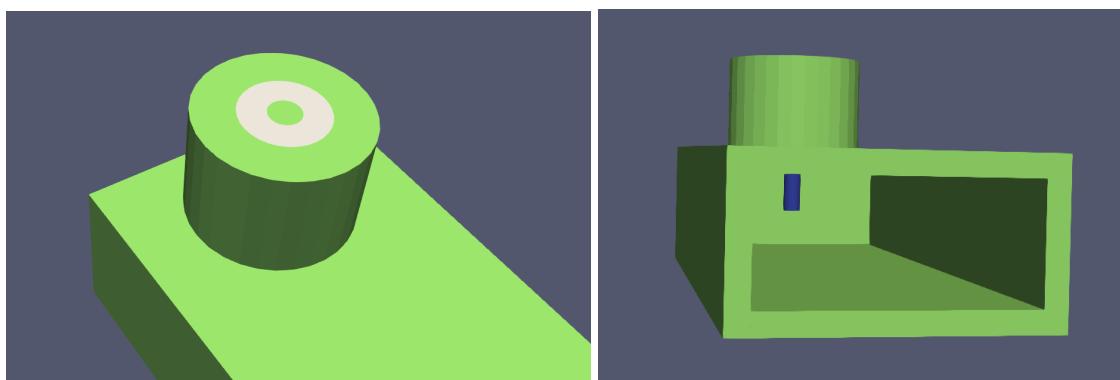
La lógica de las corrugaciones en las paredes de la antena se repite para cada tipo de perfil.



En las imágenes de arriba se puede observar una estructura en color beige que determina los límites exteriores de la antena. Es una estructura que se genera de forma automática por el programa y que tiene por objetivo extraer los sobrantes de la antena con un volumen de aire de mayor prioridad.

Para el caso del adaptador coaxial a guía de onda, la situación es similar. Los parámetros se configuran en la segunda parte de “MagicScript.m”.

Se puede configurar el tamaño de la guía de onda así como también la distancia desde el fondo de la misma al elemento radiante, la altura del elemento radiante, su diámetro y la intrusión del teflón a la guía de onda.



En este caso, el conector tiene un interior de aire que al llegar a la pared de la guía de onda se convierte en teflón. En el modelo real este aro de teflón es quien sostiene al elemento radiante.

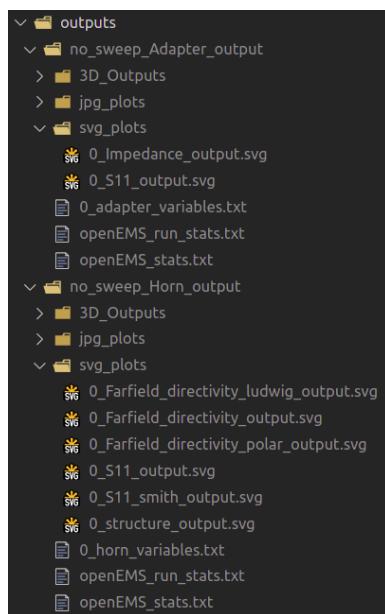
Una vez definidas las variables, llama a “simulation_core.m” y es éste quien se encarga de comenzar las simulaciones.

En el caso de querer hacer un barrido de algún parámetro sólo se debe definir el mismo como un vector con principio, fin e incremento, es decir:

PARÁMETRO = PRINCIPIO : INCREMENTO : FIN ;

Obtención de resultados

Los resultados se almacenan en la carpeta que por default se llama “outputs”. Dentro de ella se encuentran las imágenes, archivos 3D imprimibles y texto correspondiente a cada simulación del barrido.



Las imágenes se almacenan en .jpg para una rápida inspección y en .svg para una mayor resolución. Los archivos 3D de los volúmenes que determinan la antena se guardan en .stl mientras que el diagrama de radiación en 3D se almacena en .vtk (se recomienda abrir los mismos con Paraview).

La imagen de arriba muestra todos los archivos que se obtienen al terminar la simulación que viene por defecto en el script. El usuario debe asegurarse de que la simulación haya terminado correctamente, convergiendo al valor establecido, mirando los archivos .txt.

Modificaciones a funciones de OpenEMS

Para realizar el correcto barrido de parámetros y que este fuera totalmente automático, hubo que editar algunos archivos de OpenEMS. En particular se editaron “CSXGeomPlot.m”, “plotFFcocx.m”, “plotFFdB.m”, “plotRefl.m” y “PolarFF.m” los cuales se encuentran agregados en la carpeta “src/” del proyecto [8].

CSXGeomPlot.m es el que se encarga de llamar a CSXCad: programa que produce la primera visualización 3D y que genera los archivos .stl. A este archivo hubo que cambiarle la forma de llamar a la aplicación ya que lo hacía en el hilo de ejecución de la simulación y

esto bloqueaba el proceso hasta que el usuario cerrara CSXCad. Ahora el programa se ejecuta en un thread paralelo.

Por otro lado, a plotFFcocx.m hubo que hacerle cambios mínimos para que se pudieran guardar en archivos .svg los gráficos que él producía, lo mismo ocurrió con plotFFdB.m, plotRefl.m.

Con PolarFF.m hubo que modificar la forma de imprimir la salida para que pueda ser correctamente guardada con una escala aceptable.

El programa utilizará primero los archivos que se encuentran en “src/” y no los de la instalación de OpenEMS local. Esto quiere decir que no hace falta editar ningún archivo de OpenEMS, cosa que dañaría la instalación.

Para poder ejecutar el programa, OpenEMS debe estar instalados en “~/opt/openEMS” (como es recomendado por la página de OpenEMS por defecto).

Bibliografía consultada

Gracias a la recomendación de la cátedra se leyó el libro [9] particularmente en su capítulo “Guía de onda metálica con reentrante”. Allí se puede entender que, para disminuir la velocidad de propagación del campo en la superficie interior de la antena, el período de las solapas tiene que ser aproximadamente $0.1 * \lambda_c$. Siendo λ_c la longitud de onda de la señal en espacio libre.

También se consultó [10] que coincidía en los conceptos con lo mencionado anteriormente. Si bien los temas se pueden ver en la bibliografía, no tienen un tratamiento en profundidad para lo que se necesitó en el proyecto. Por ejemplo, en [9] se trata el tema para una guía de onda con caras paralelas.

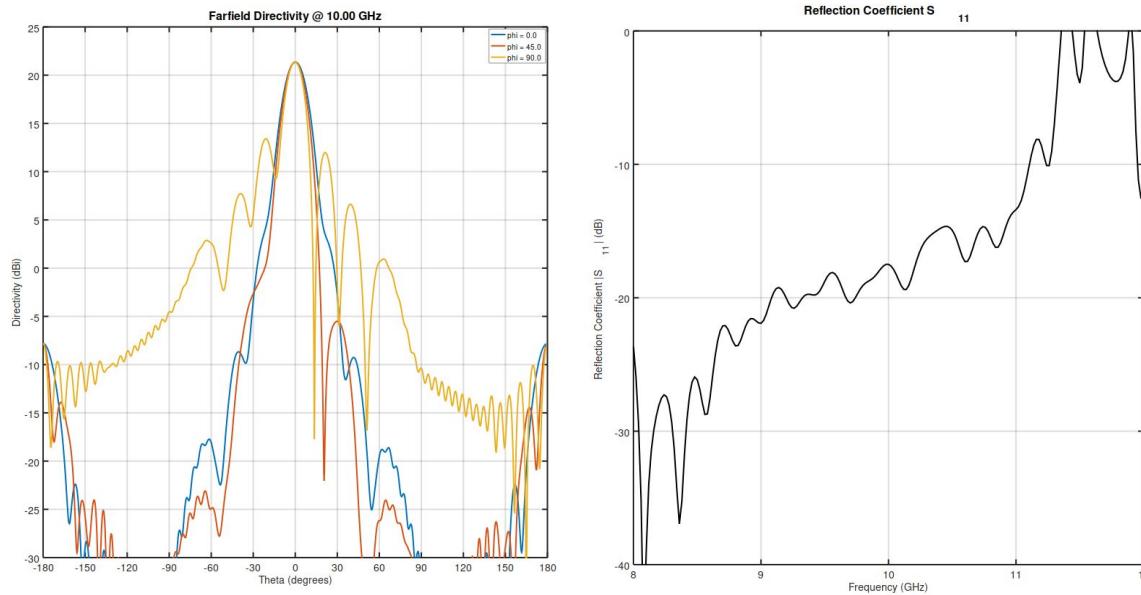
Barridos de parámetros realizados

A continuación se detallan algunos de los parámetros que se barrieron para obtener los resultados de la siguiente sección. Cabe mencionar que solo se muestran barridos con un perfil lineal en dos etapas con corrugaciones en las paredes perpendiculares al campo eléctrico (teniendo en cuenta un modo TE10) pero que la mecánica a seguir para los otros perfiles es similar.

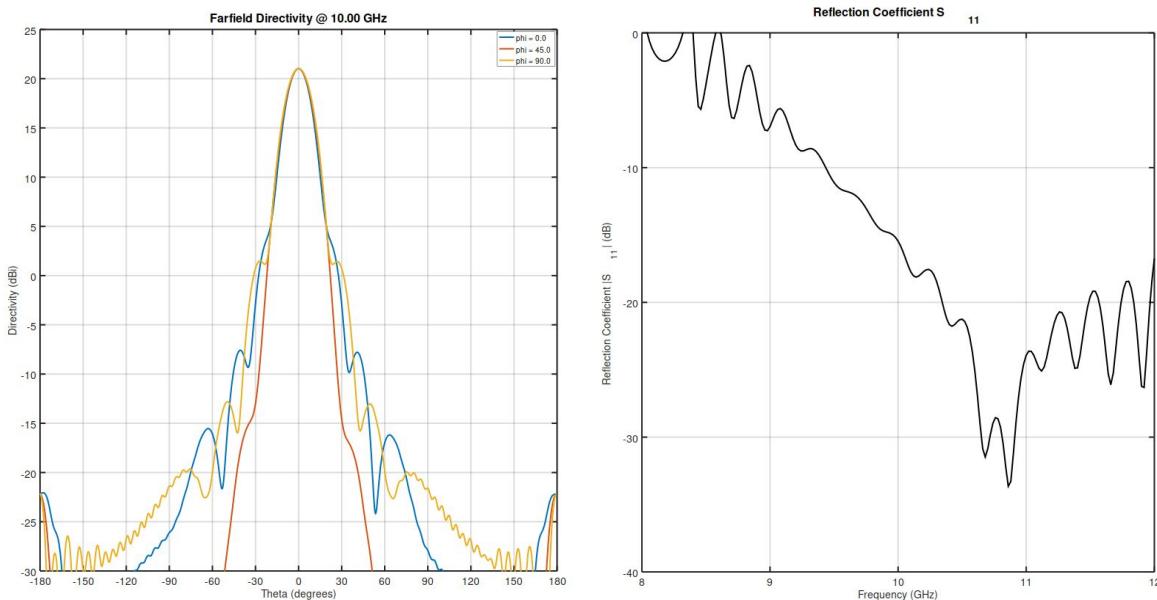
Barridos en antena horn

Barrido de la variable delta (horn_delta)

delta 10%



delta 80%



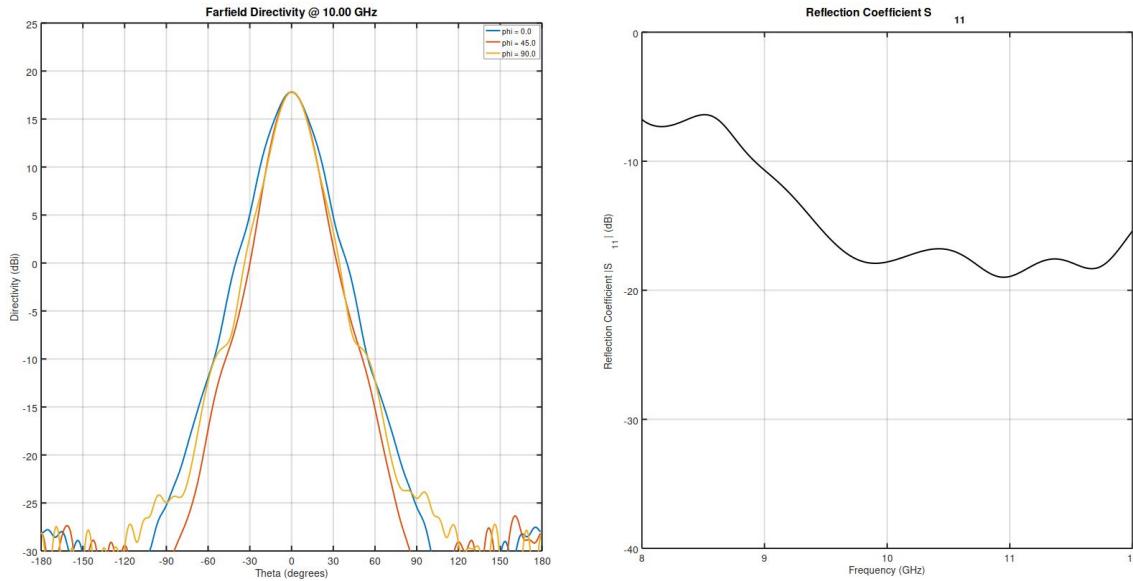
Conclusión del barrido

A medida que se aumenta el delta, es decir, que se hacen más angostas las corrugaciones, se observa que el diagrama de radiación mejora así como también varía el S₁₁ moviendo sus valores mínimos al centro de la banda.

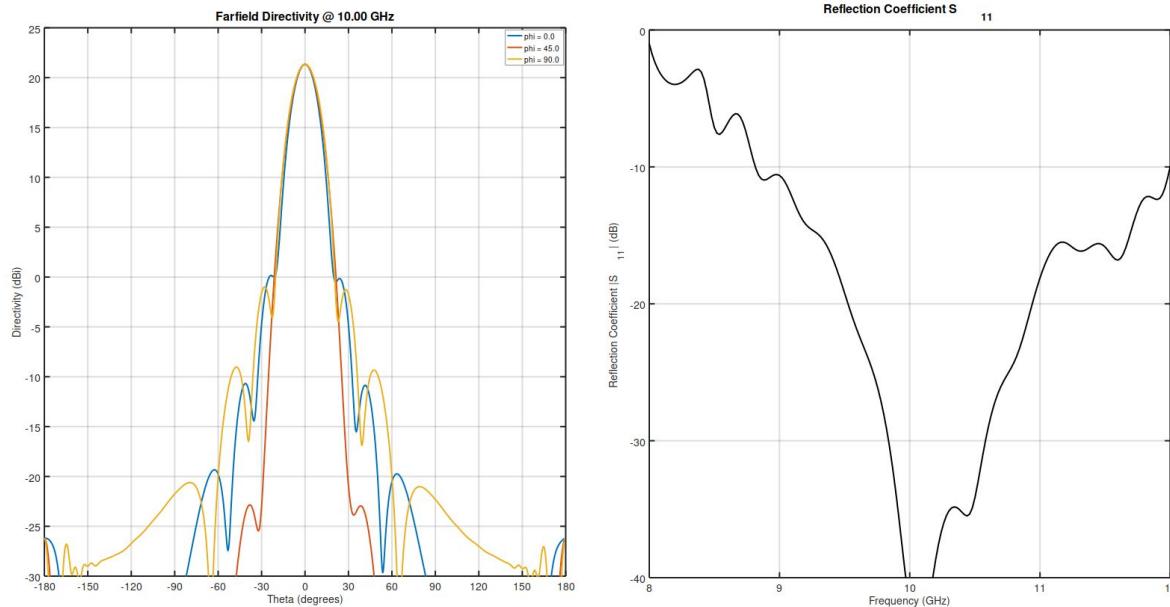
Se adopta el valor de 75% ya que presenta el mejor diagrama de radiación y el S11 más parejo en toda la banda.

Barrido de cantidad de corrugaciones (horn_num_of_corrugations)

10 corrugaciones



55 corrugaciones



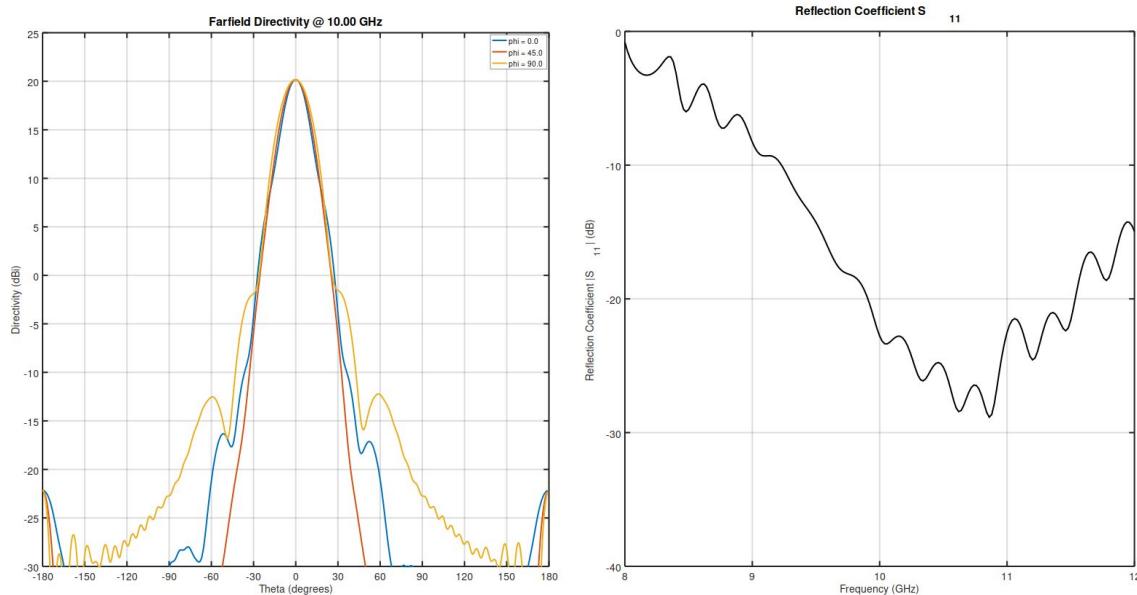
Conclusiones del barrido

Aumentar la cantidad de corrugaciones hace bajar drásticamente el S11 de la misma en ciertos puntos de la banda (indirectamente aumenta el largo de la antena ya que las corrugaciones tienen un paso fijo en este barrido) pero aumenta los lóbulos laterales.

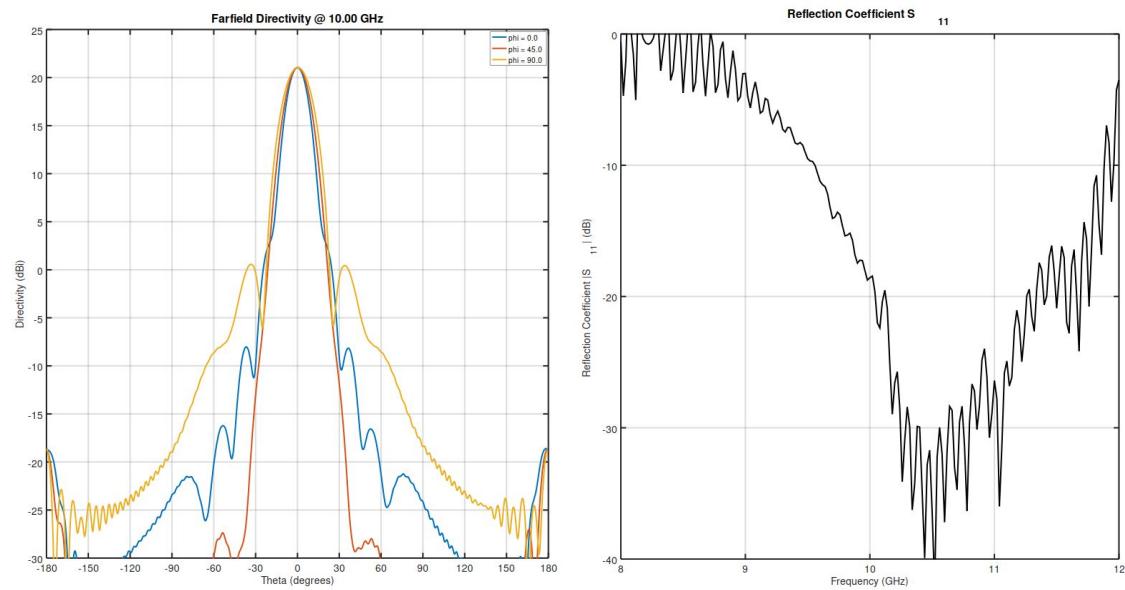
Se adopta un número de corrugaciones de 35 ya que proporciona un buen S11 en toda la banda sin sacrificar el diagrama de radiación.

Barrido de paso de corrugación (horn_corr_step)

Paso de 6mm



Paso de 12mm



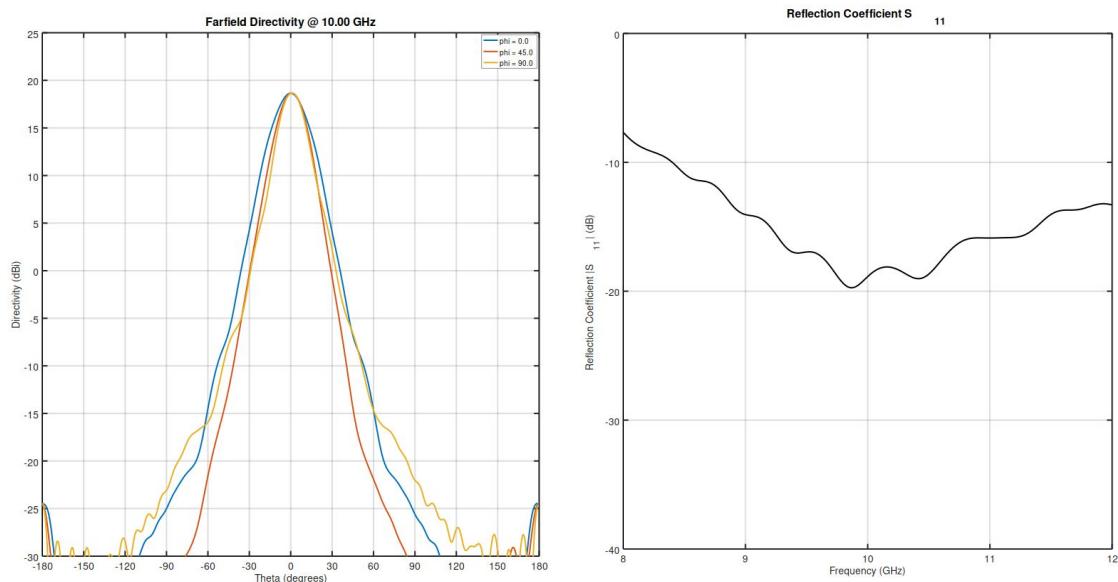
Conclusiones del barrido

El principal limitante de este parámetro es que, combinado con el delta, pueden dar como resultado un ancho de corrugación muy fino que sea difícil de imprimir. Teniendo en cuenta esto, aquí se barrió desde 6mm a 12mm observándose que el diagrama de radiación empeoraba conforme se llegaba a los valores más altos.

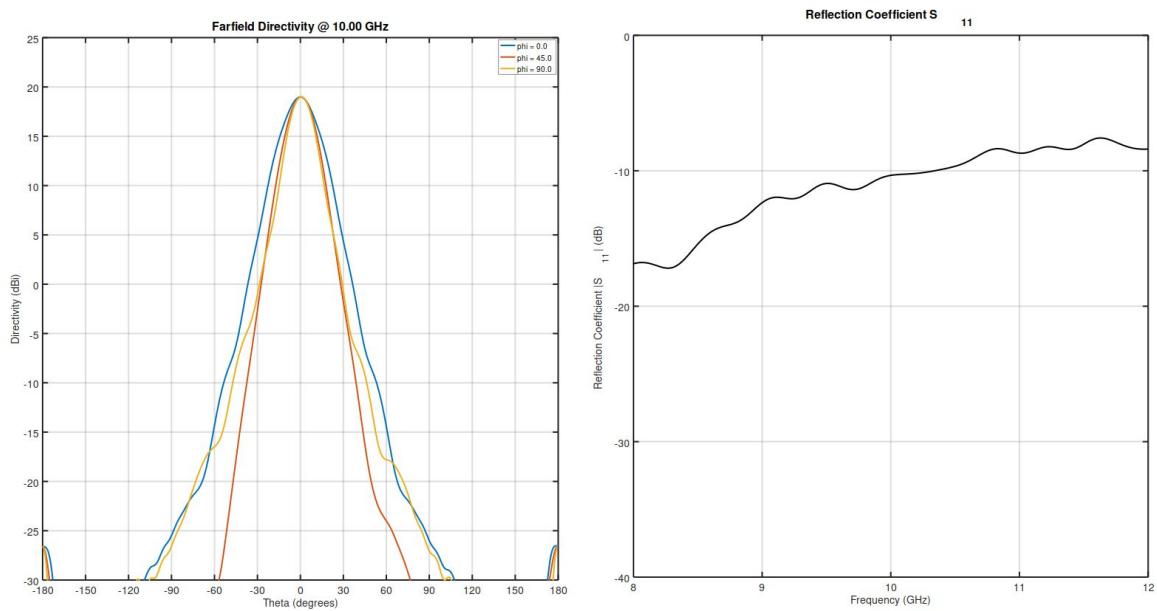
Sin embargo, luego de consultar [9] y [10], más allá que no se aplicaban directamente al modelo simulado, se vió que ambos coincidían en que el periodo de repetición de la estructura corrugada tiene que ser de $0.1 * \lambda_c$ y siendo $f_c = 10\text{GHz}$, **el parámetro en cuestión da como resultado 3mm que es lo que se adoptó ya que efectivamente presentaba los mejores resultados.**

Barrido de primer salto (horn_b_jump)

Salto de 1mm



Salto de 5mm



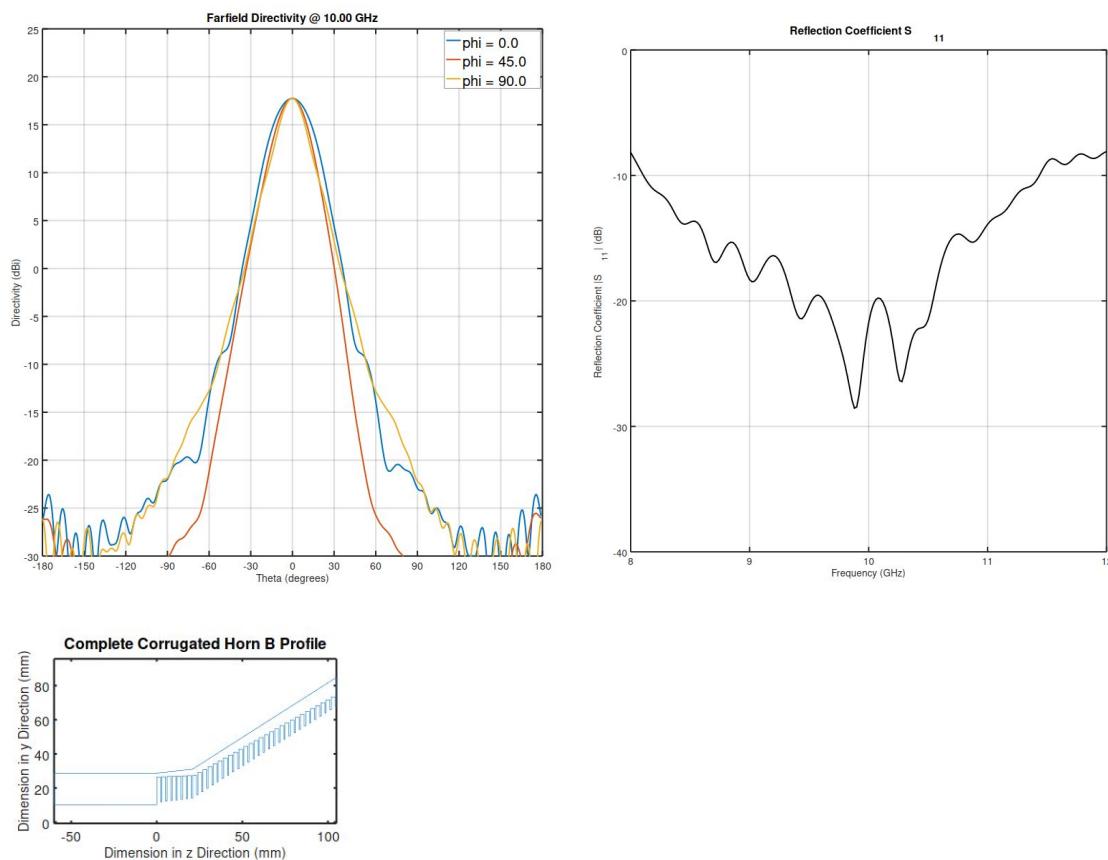
Conclusiones del barrido

Se observa que para un salto de 1mm los valores mínimos de S11 se encuentran en el centro de la banda y que a medida que se aumenta el valor del parámetro, los valores mínimos se mueven hacia las frecuencias más bajas.

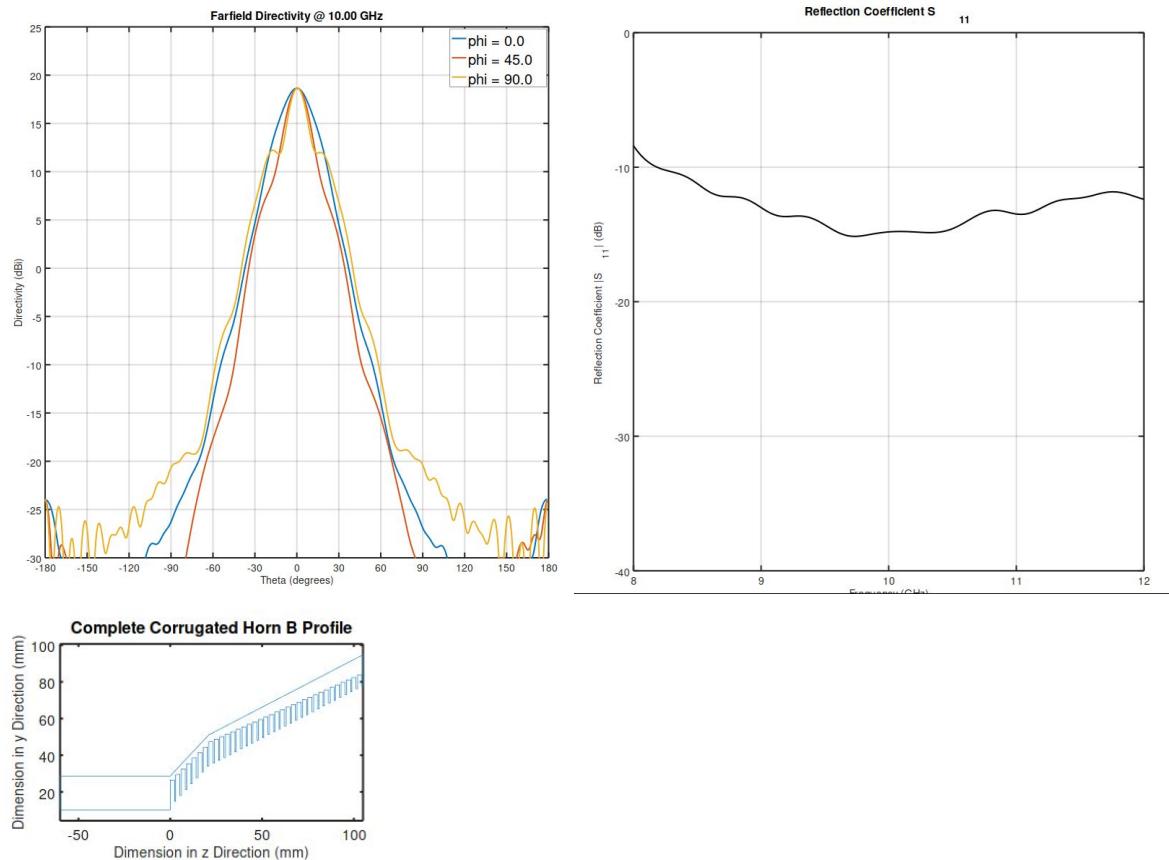
Se adopta el valor de 2mm ya que es el que mantiene la mayor uniformidad de S11 en toda la banda de frecuencias.

Barrido de primer b_o (horn_first_bo)

Primer b_o de 15mm



Primer b_o de 55mm



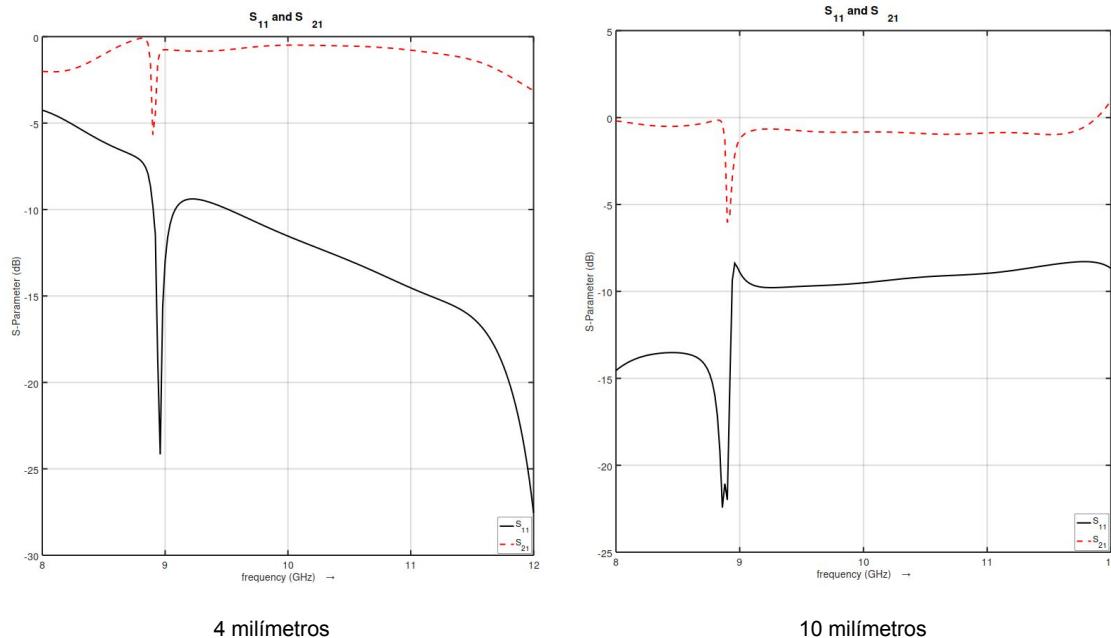
Conclusiones del barrido

Aquí se aprecia que a medida que aumenta el parámetro barrido los diagramas de interés muestran comportamientos inversos. Mientras que S11 mejora en cuanto a variabilidad al aumentar el parámetro, el diagrama de radiación empeora.

Se observa que con un **valor de 25mm** se obtiene el punto donde ambos gráficos, diagrama de radiación y coeficiente de reflexión, son aceptables.

Barridos en adaptador de conector N a guía de onda

Distancia con el fondo (adapt_BackShort)

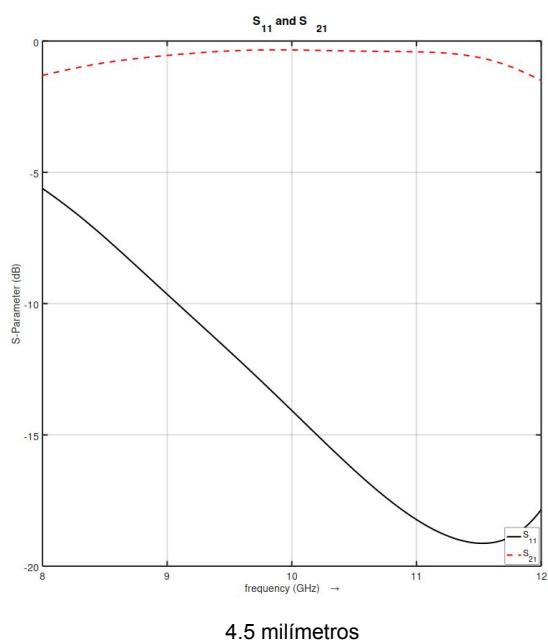


Conclusiones del barrido

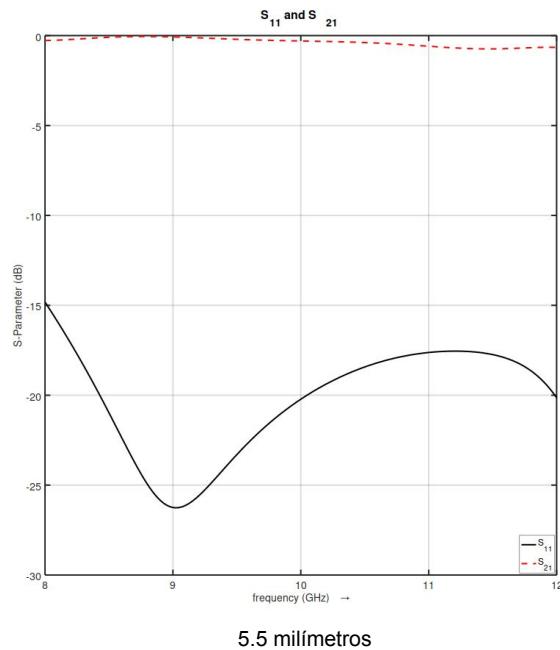
Mientras más cerca de la parte posterior de la guía de ondas se encuentra el elemento radiante, más variable es el parámetro S11. El mismo se estabiliza para un valor de 10mm pero con un S11 alto para este tipo de adaptadores.

Se adopta un valor de 8mm cuyo S11 es el más bajo sin aumentar tanto en módulo.

Profundidad del elemento radiante (adapt_ProbeDepth)



4.5 milímetros



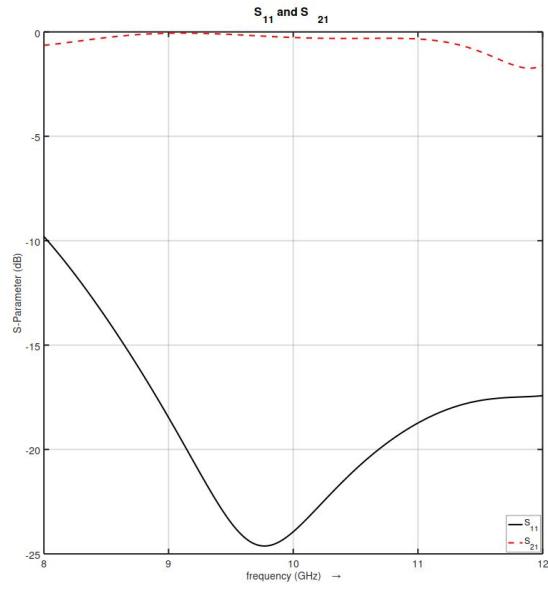
5.5 milímetros

Conclusiones del barrido

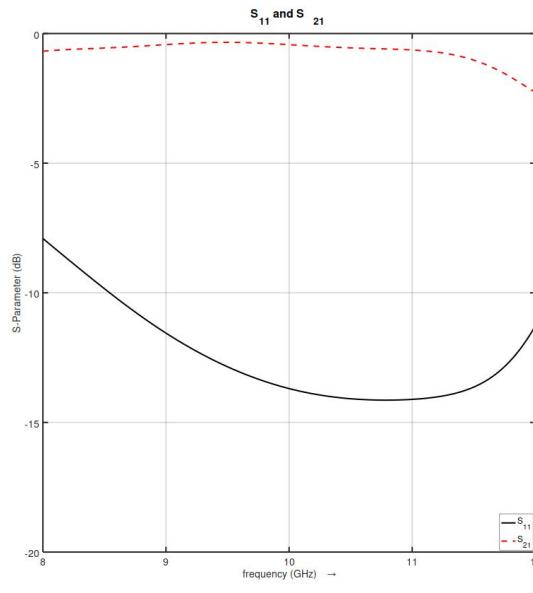
Se observa que para 5.5mm de intrusión del elemento radiante en la guía de onda se obtiene un mejor S11.

Se adopta el valor de 5.5 milímetros teniendo en cuenta que más allá de 6 milímetros el S11 deja de ser uniforme.

Profundidad del dieléctrico en la guía de onda (adapt_dielectric_intrusion)



1 milímetro



2.5 milímetros

Conclusiones del barrido

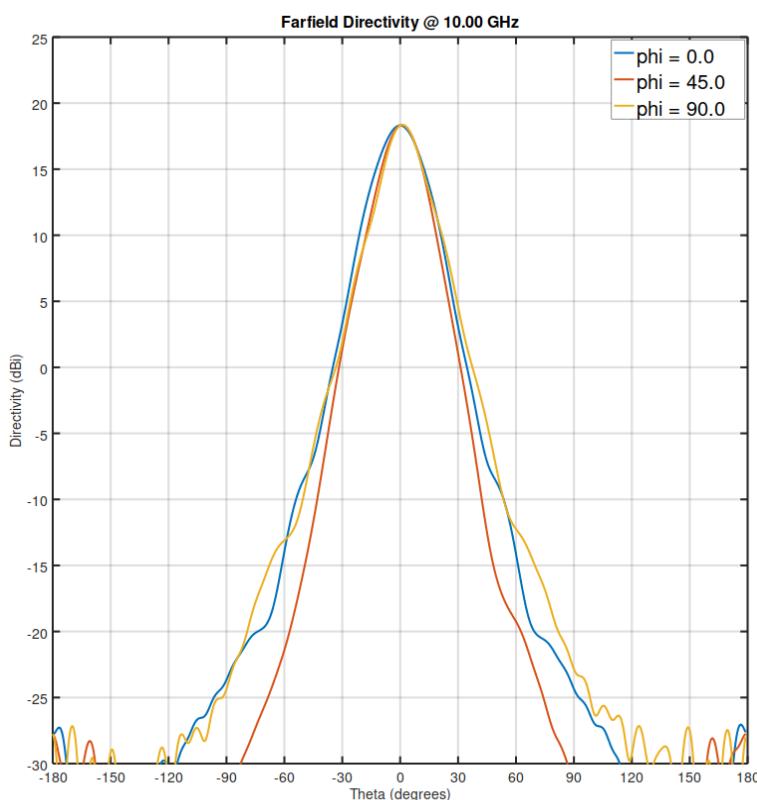
El S11 mostró valores menos variables en la banda de frecuencias a medida que se aumentaba el valor del parámetro. Como consecuencia, el S11 en módulo aumentaba. **Se adoptó un valor de 1.75 milímetros** para el modelo final.

Resultados

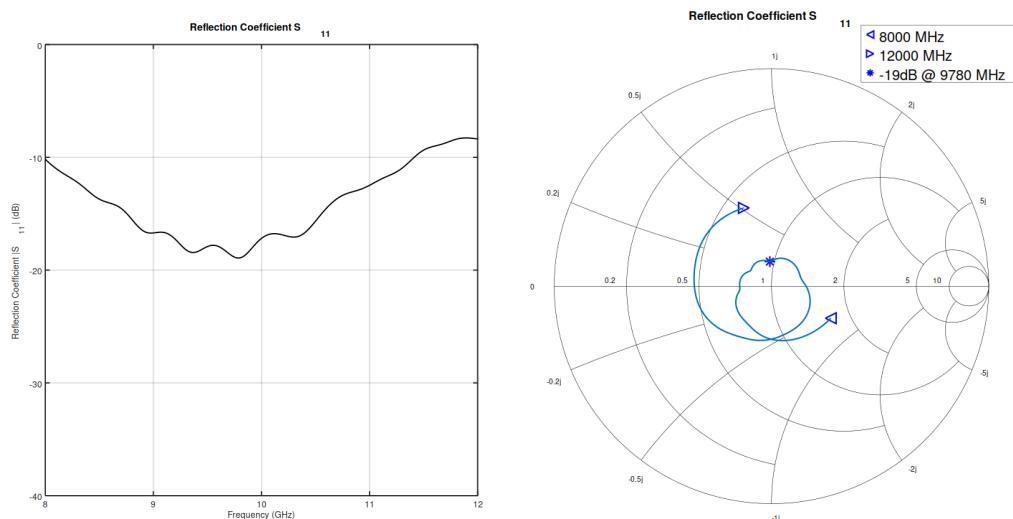
Los resultados que se obtienen por defecto con el programa se muestran a continuación:

Antena Horn

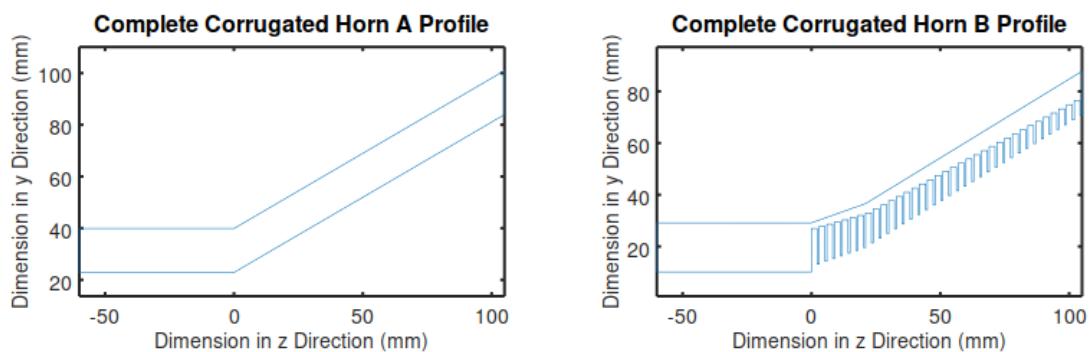
Diagrama de radiación:



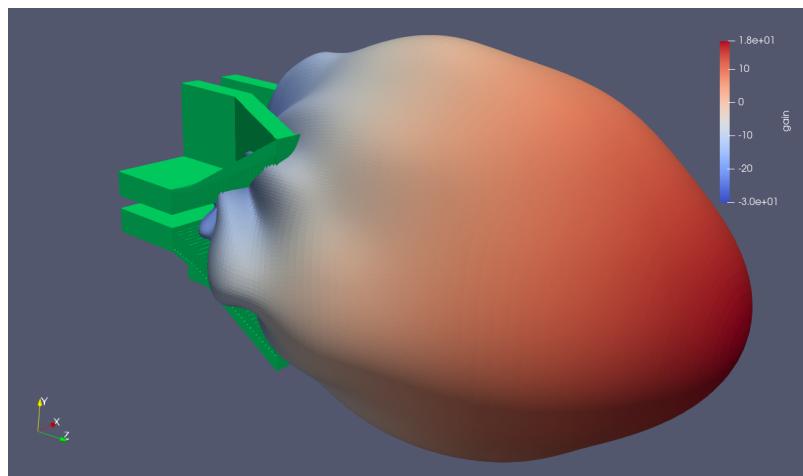
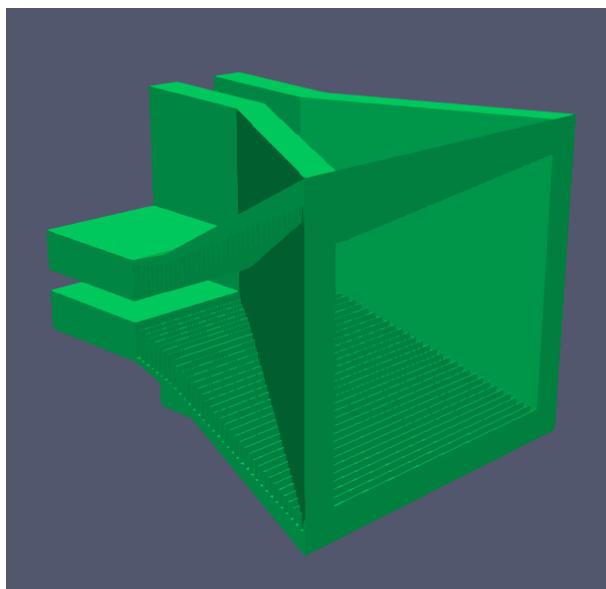
Coeficiente de reflexión:



Perfil Simulado

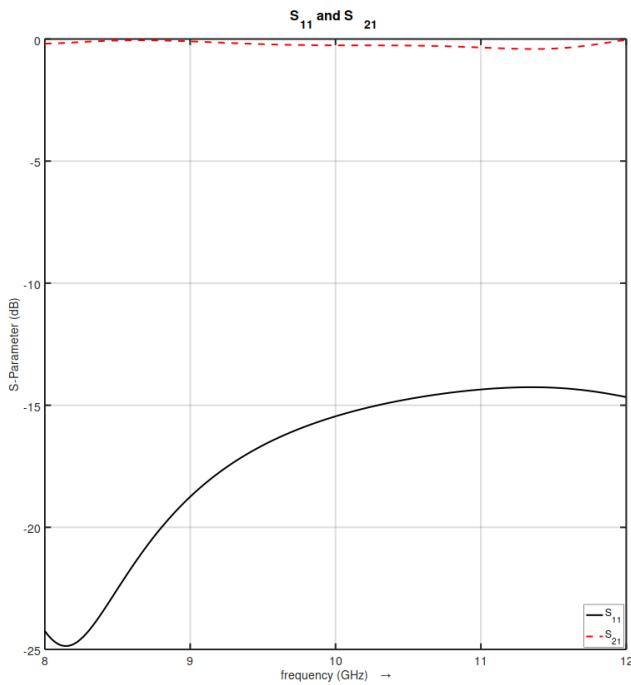


Estructura en 3 dimensiones

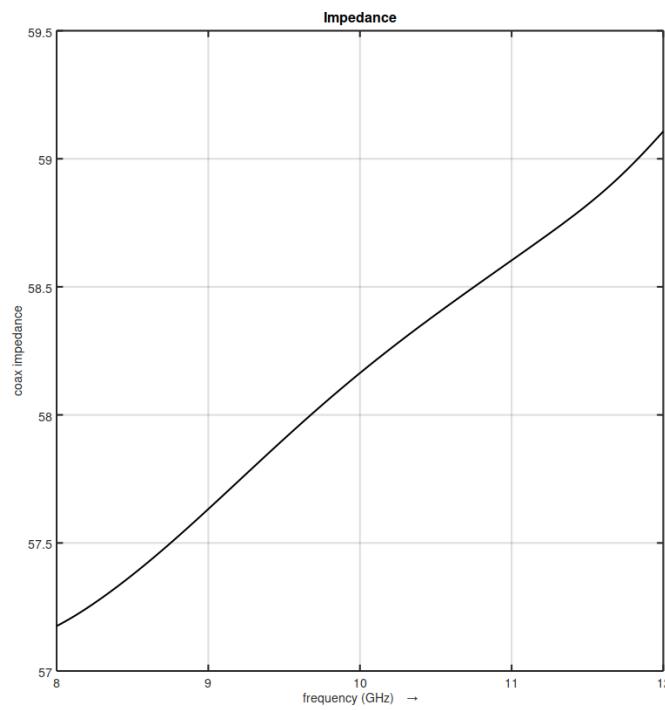


Adaptador Coaxial a Guía de onda

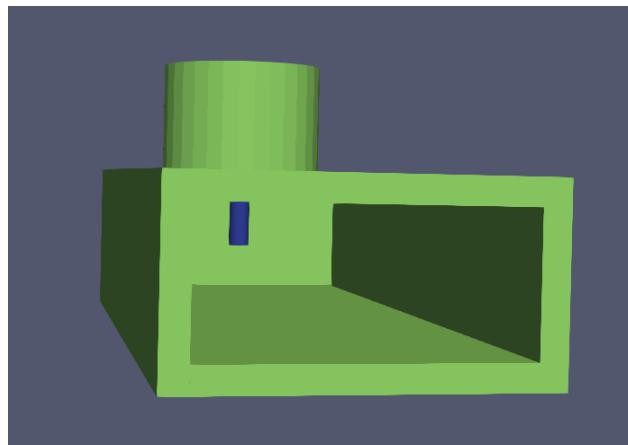
Coeficiente de reflexión



Impedancia



Estructura en 3 dimensiones



Conclusiones

Con respecto al software de simulación, OpenEMS es una herramienta de muy alto nivel con mucho refinamiento cuyo creador aún sigue dando soporte y contestando dudas en el foro. Sin embargo todavía tiene camino por recorrer en el campo de la optimización de recursos de hardware.

A lo largo de este proyecto, el principal impedimento fue la cantidad de memoria RAM necesaria para cada simulación. Si bien los parámetros de las simulaciones por defecto del programa tratado en este informe están pensados para obtener un resultado aceptable con un consumo de memoria razonable, es muy fácil cambiar parámetros que conlleven a un consumo de memoria altísimo. Lograr los parámetros presentados por defecto muchas veces implicaba transitar por simulaciones de alto consumo de recursos, lo que hacía el proyecto un tanto dificultoso.

Se observó que el parámetro crítico con respecto a la memoria RAM consumida es el tamaño de las celdas de simulación. Sin embargo, contrastando simulaciones con CST, se pudo notar que muchas veces no es necesario achicar las celdas a tamaños que conlleven un alto consumo de recursos para obtener una correcta simulación.

Otro parámetro que es desventajoso, por así decirlo, con respecto a otros softwares de simulación es la cantidad de tiempo que se necesita para las simulaciones. Se pudo notar que, de nuevo comparando con CST, estos pueden ser del doble o incluso más. Es común el uso de GPUs para mejorar este aspecto de la simulación, sin embargo, según menciona el creador de OpenEMS en [este](#) poste (si bien es un poste de 2014, no se observaron otros más nuevos que traten el tema), no es posible de implementar fácilmente en el programa.

El autor de este informe cree que, si bien los dos aspectos antes mencionados son importantes, el valor que entrega OpenEMS es mucho más alto que sus desventajas. Es muy importante tener un simulador de licencia libre que obtenga valores muy cercanos a uno con una licencia de un costo alto. Y si bien en principio es difícil de usar, una vez entendidos los problemas y cómo el programa los soluciona, las simulaciones son relativamente fáciles de realizar.

Referencias:

- [1]: OpenEMS (<https://openems.de/start/>)
- [2]: “[Dual-Polarization and Low-Sidelobe Corrugated Rectangular Horn Antennas for Outdoor RCS Measurement](#)” Changying Wu, Congxiang Li, Chufeng Hu and Yevhen Yashchyshyn.
- [3]: Antenna Designer’s Notebook (<http://antennadesigner.org/>)
- [4]: Corrugated Horn Antenna Tutorial for OpenEMS (<https://openems.de/forum/viewtopic.php?f=3&t=900>)
- [5]: Design of Corrugated Horns: A Primer Christophe Granet and Graeme L. James.
- [6]: Corrugated Horn Antenna Design in MATLAB and CST (<https://www.youtube.com/watch?v=Fh7Ri-CNEjs>)
- [7]: Octave (<https://www.gnu.org/software/octave/index>)
- [8]: Programa desarrollado (https://github.com/monteroman/medidas2_magicScript)
- [9]: “Fundamentos de Electrodinámica” Fiódorov N.N.
- [10]: “Antenna Theory Analysis and Design” C.A.Balanis.