REPÚBLICA DEL ECUADOR
Escuela Politécnica Nacional
"E SCIENTIA HOMINIS SALUS"

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.

- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.

- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DESARROLLO DE UNA INTERFAZ MATLAB PARA LA SIMULACIÓN, EN KEYSIGHT® ADS, DE ESTRUCTURAS DIELÉCTRICAS NATURALES UNIDIMENSIONALES Y BIDIMENSIONALES EMULADAS POR MEDIO DE REDES DE CELDAS DISCRETAS *LC* Y VERIFICACIÓN DE LAS MISMAS EN UNA APLICACIÓN RADIANTE CONVENCIONAL

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN "ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES"

CARLOS ALEJANDRO ROCHA ANDRADE

carlos.rocha@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR.-ING. HERNÁN VINICIO BARBA MOLINA

hernan.barba@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. RICARDO XAVIER LLUGSI CAÑAR, M.Sc.

ricardo.llugsi@epn.edu.ec

Quito, julio 2019

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Carlos Alejandro Rocha Andrade, bajo nuestra supervisión.

Dr.-Ing. Hernán Barba Molina
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Ing. Ricardo Llugsi Cañar, M.Sc.
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Carlos Alejandro Rocha Andrade, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Carlos Alejandro Rocha Andrade

DEDICATORIA

A mis padres, quienes han sido el soporte fundamental en todo este tiempo. A mi padre, quien desde temprana edad, por su gran corazón y sentido de responsabilidad tuvo que inmiscuirse en un mundo totalmente desconocido para él, pero del cual salió adelante superando todos los obstáculos y miedos, convirtiéndose en el pilar de un hogar que ha sabido superar buenos y malos momentos. El mismo que con sus noches de desvelo y esfuerzo ha sabido velar para que nada nos falte en nuestro hogar, dejando muchas veces de lado su placer personal por darle lo mejor a sus hijos, quien nunca me dejó solo a pesar que muchas veces le fallé con mis acciones irresponsables y siempre tuvo una palabra de aliento para no darme por vencido. A mi madre, quien dejó de lado muchas cosas para criar a este terremoto, a su Carlitos, el mismo que muchas veces ha abusado de su paciencia, pero nunca lo dejó solo y siempre ha estado acompañándole cuando más ha necesitado de ella. A todas las personas que de una u otra manera han hecho que esto sea posible y también que se haya demorado un poco más de lo normal, pero que siempre han tenido una palabra de aliento en momentos difíciles.

AGRADECIMIENTO

A mi Madre Dolorosa, que me ha cubierto con su manto desde los tiempos del colegio cuando me consagré a su infinito amor. A todos los profesores que han sido parte de mi formación profesional y de manera muy particular al Dr. Hernán Barba, por su amistad desde el colegio y su apertura para tomar un proyecto que era bastante complicado por tema de tiempos, pero de quien recibí el primer SI ALCANZAMOS cuando parecía que era imposible terminar a tiempo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO V
RESUMEN VII
ABSTRACT VIII
1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.1.1 OBJETIVO GENERAL 2
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
1.2 ALCANCE 2
1.3 MARCO TEÓRICO 3
1.3.1 EMULACIÓN DE MEDIOS DIELÉCTRICOS MEDIANTE REDES REACTIVAS 3
1.3.2 ESTADO DEL ARTE 5
2 METODOLOGÍA 10
2.1 KEYSIGHT® ADS [14] 10
2.1.1 INDUCCIÓN A LA HERRAMIENTA KEYSIGHT® ADS 10
2.1.2 JERARQUÍAS Y CREACIÓN DE SUBREDES PARAMÉTRICAS 12
2.1.3 CREACIÓN DE SUBREDES PARAMÉTRICAS MEDIANTE ARCHIVOS *NETLIST* 12
2.1.4 FORMATO GENERAL DE UN ARCHIVO *NETLIST* 14
2.1.5 ANÁLISIS DE PARÁMETROS *S* MEDIANTE SIMULACIÓN 15
2.1.6 OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE FASE DE PARÁMETROS *S* 17
2.1.7 COMPONENTE DE INCLUSIÓN DE ARCHIVO NETLIST (*NetlistInclude*) 20
2.2 MATLAB 23
2.2.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB 23
2.2.2 SCRIPT EJECUTADO DESDE GUI 24
2.3 IMPLEMENTACIÓN DE UNA MALLA UNIDIMENSIONAL 26
2.3.1 CREACIÓN DE SUBREDES UNIDIMENSIONALES 26
2.3.2 GENERACIÓN DE NETLIST EN MATLAB 30

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE MALLA BIDIMENSIONAL 30
2.4.1 CREACIÓN DE SUBREDES BIDIMENSIONALES 32
2.4.2 GENERACIÓN DE NETLIST EN MATLAB 32
3 RESULTADOS 34
3.1 INTERFAZ DE USUARIO PARA CREAR UNA MALLA CON CIRCUITOS *LC* UNIDIMENSIONALES 34
3.2 SIMULACIÓN DE ADS..... 39
3.2.1 SIMULACIÓN DE MALLA UNIDIMENSIONAL DE 9 CELDAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 2,1 (TEFLÓN) 39
3.2.2 SIMULACIÓN DE MALLA UNIDIMENSIONAL DE 9 CELDAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 9,9 (ALÚMINA) 43
3.2.3 COMPROBACIÓN TEÓRICA DE LA RELACIÓN DE FASES ENTRE MATERIALES 46
3.2.4 RELACIÓN DE FASES ENTRE MALLAS UNIDIMENSIONALES DE 100 CELDAS DE ALÚMINA Y TEFLÓN 47
3.2.5 SIMULACIÓN DE MALLA BIDIMENSIONAL DE 9 FILAS Y 7 COLUMNAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 2.1 (TEFLÓN) 48
3.2.6 SIMULACIÓN DE MALLA BIDIMENSIONAL DE 9 FILAS Y 7 COLUMNAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 9.9 (ALÚMINA).....52
3.3 APLICACIÓN RADIANTE CONVENCIONAL..... 54
3.3.1 DISEÑO DE LENTE DE SUPERFICIE REFRACTIVA 54
3.3.2 RESULTADO DE SIMULACIÓN DEL LENTE DISEÑADO 60
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 62
4.1 CONCLUSIONES..... 62
4.2 RECOMENDACIONES 63
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 64
ANEXOS 65

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza la simulación, con la ayuda de Keysight® ADS, de la propagación de una onda electromagnética en bloques de materiales dieléctricos. La característica dieléctrica de los materiales utilizados es emulada por medio de redes reactivas *LC* planares naturales unidimensionales y bidimensionales. La generación de las estructuras se realiza con la ayuda de MATLAB por medio de una interfaz gráfica de usuario para la definición de las dimensiones de dicha estructura y del coeficiente dieléctrico relativo (permitividad relativa). Se muestran resultados de simulaciones para estructuras homogéneas de Teflón y alúmina corroboradas teóricamente presentando un error relativo porcentual menor al 2%.

Un aspecto importante del proyecto es la creación de mallas en Keysight® ADS por medio de un archivo *Netlist* el cual genera elementos pasivos, subcircuitos, puertos para análisis de parámetros *S* e interconexión de mallas.

Adicionalmente, se detalla el diseño de un lente de superficie refractiva en el cual se comprueba, por medio de simulación, el efecto colimante del lente.

PALABRAS CLAVE: Keysight® ADS, MATLAB, emulación dieléctrica, *Netlist*, colimación, redes reactivas *LC.*

ABSTRACT

In the present project, the simulation aided by Keysight® ADS, of the propagation of an electromagnetic wave in blocks of dielectric materials is carried out. The dielectric characteristic of the utilized materials is emulated by means of one-dimensional and two-dimensional natural planar *LC* reactive networks. The generation of the structures is made aided by MATLAB through a graphical user interface for the definition of the dimensions of the structure and the relative dielectric coefficient (relative permittivity). Simulation results are shown for homogeneous structures of Teflon and alumina theoretically corroborated showing a percentage relative error of less than 2%.

An important aspect of this project is the creation of meshes in Keysight® ADS by means of a Netlist file which generates passive elements, subcircuits, ports for analysis of S-parameters and interconnection of meshes.

Furthermore, the design of a one-surface refracting lens is detailed in which the collimating effect of the lens is verified by means of simulation.

KEYWORDS: Keysight® ADS, MATLAB, dielectric emulation, *Netlist*, colimation, *LC* reactive networks

1 INTRODUCCIÓN

La utilización de lentes en sistemas radiantes ha ganado aceptación en realizaciones que involucran aplicaciones de onda milimétrica y submilimétrica debido a la factibilidad de manejo de sus dimensiones físicas. Sin embargo, estas estructuras dieléctricas presentan un tamaño eléctrico considerable, de algunas longitudes de onda, mismo que se traduce en enormes dominios de simulación. Esta problemática conlleva a tener tiempos de simulación considerables mismos que limitan la capacidad de ingeniería y optimización de los sistemas.

Desde el punto de vista electromagnético, una estructura dieléctrica no es más que un medio en el cual, una onda electromagnética se propaga a una determinada velocidad relacionada con la permitividad relativa de dicho medio. Esta característica de variación de la velocidad de propagación es aprovechada por antenas de baja directividad, a través de una estructura dieléctrica de forma geométrica determinada (lente), para incrementar su directividad colimando los diferentes “rayos” de propagación en una sola dirección. El análisis teórico de este escenario está dado por la óptica geométrica.

Entonces, si bien de una estructura dieléctrica se aprovecha su capacidad para variar la velocidad de propagación de una onda, esta característica podría ser modelada por estructuras periódicas realizadas por sencillas redes de elementos pasivos. Este tipo de redes han sido ya utilizadas no solo para dar solución a problemas electromagnéticos comunes con características de propagación arbitrarias sino también para la creación de materiales inexistentes en la naturaleza (metamateriales) pero de características de propagación atractivas en diversas aplicaciones.

En este trabajo de titulación se propone la generación de redes de celdas *LC*, en Keysight® ADS, mismas que emularán el comportamiento electromagnético de estructuras dieléctricas unidimensionales y bidimensionales. Para automatizar la generación de estas redes se propone el desarrollo de una interfaz en MATLAB. Así mismo, se analizará una aplicación tipo antena lente en donde se simulará en Keysight® ADS el efecto de un lente dieléctrico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una interfaz MATLAB para la simulación, en Keysight® ADS, de estructuras dieléctricas naturales unidimensionales y bidimensionales por medio de redes de celdas discretas *LC* y verificación de las mismas en una aplicación radiante convencional.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este estudio técnico son:

- Describir el estado del arte en estructuras dieléctricas para aplicaciones radiantes.
- Describir teóricamente la emulación de las características dieléctricas de una estructura por medio de líneas de transmisión.
- Analizar la implementación de estructuras unidimensionales y bidimensionales en Keysight® ADS para la obtención de archivos *Netlist.*
- Implementar la interfaz MATLAB para la automatización de la realización de estructuras dieléctricas en Keysight® ADS.
- Evaluar los resultados mediante la simulación de un lente en una aplicación radiante.

1.2 ALCANCE

En este trabajo de titulación se generará una simulación consistente de redes circuitales *LC* en Keysight® ADS mismas que emulen las características dieléctricas de estructuras unidimensionales y bidimensionales. Además, se analizará mediante simulación el efecto de colimación de un lente dieléctrico emulado con las redes circuitales *LC* antes mencionadas.

Las estructuras en Keysight® ADS serán celdas de redes *LC* generadas por medio de archivos tipo *Netlist*. Esto es posible ya que Keysight® ADS trabaja bajo generadores circuitales similares a SPICE. Para la conformación de las celdas, se hará un breve estudio de las propiedades de las líneas de transmisión en términos de impedancia característica y

velocidad de propagación para la emulación de la permitividad relativa de las estructuras dieléctricas.

La declaración de los generadores *Netlist* se lo realizará con una interfaz en MATLAB en la cual el usuario pueda determinar dimensión y propiedad dieléctrica de la estructura a ser simulada en Keysight® ADS.

Para la verificación de las redes *LC*, se optimizará por medio de simulaciones una emulación de lente dieléctrico hiperbólico en un ambiente homogéneo (similar al aire) en el cual el efecto colimador del lente pueda ser comprobado al ser este iluminado por una onda.

En este trabajo la interfaz de MATLAB, conjuntamente con la estructura generada en Keysight® ADS constituyen el producto final demostrable.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 EMULACIÓN DE MEDIOS DIELÉCTRICOS MEDIANTE REDES REACTIVAS

La propagación de una onda electromagnética en un medio dieléctrico, a una frecuencia y un modo determinado, está caracterizada por la velocidad de propagación de la onda en el medio, determinada por las propiedades intrínsecas del mismo [1]. Por ejemplo, la velocidad con la que una onda se propaga en una línea coaxial dependerá de la permitividad del dieléctrico constitutivo de la línea coaxial. La Figura 1.1 compara a través de un ejemplo la propagación de una onda en el aire ($\varepsilon_r \approx 1$) con la propagación de la misma onda en el coaxial cuyo material dieléctrico presenta una permitividad de $\varepsilon_r = 2$.

Se observa que, si se produce una excitación simultánea en aire y en el cable coaxial de una misma señal, al cabo de una misma longitud física de los elementos, la fase de la señal podría ser diferente en ambos medios dependiendo del valor de la permitividad relativa del material que conforma el cable coaxial.

Este comportamiento de “frenado” de la fase de una señal puede ser emulado por medio de una línea de transmisión [1]. La Figura 1.2 muestra un diferencial de una línea de transmisión real y su circuito equivalente. Se puede apreciar que esta línea de transmisión

presenta componentes inductivos en serie y capacitivos en paralelo, ambos por unidad de longitud. Adicionalmente, la resistencia y conductancia, en serie y paralelo respectivamente representan las pérdidas presentes en una línea de transmisión real.

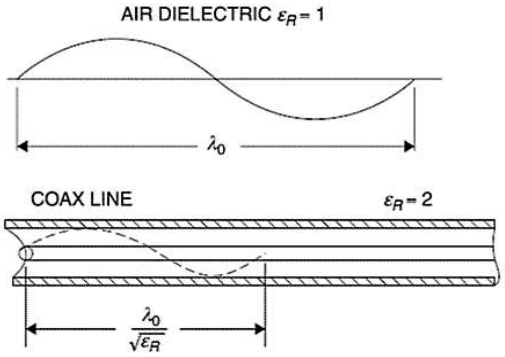

Figura 1.1. Efecto del material dieléctrico que produce retardo en la onda electromagnética [2]

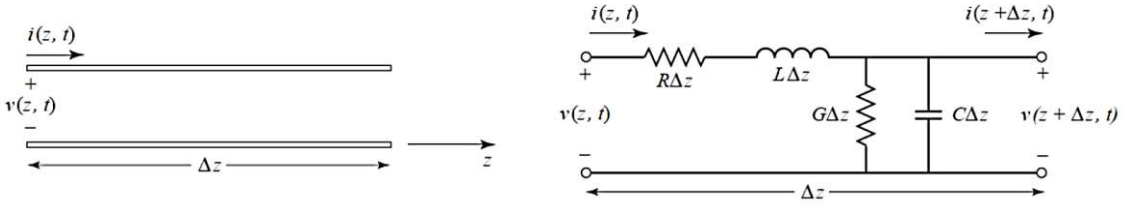

Figura 1.2. Línea de transmisión con definición de voltajes y corrientes. (Izq.) Implementación real. (Der.) Circuito equivalente [3]

Asumiendo el caso ideal, en el cual se deprecie el valor de las pérdidas, la línea de transmisión estará únicamente conformada por elementos reactivos (*LC*). De la teoría de sistemas de transmisión se conoce que la impedancia característica de una línea de transmisión sin pérdidas está dada por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1.1}$$

y la velocidad de fase de la onda en un tramo unitario (Δz=1)

$$v_{\mathrm{p}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1.2}$$

Relacionando la velocidad de fase de la onda propagándose en una línea de transmisión sin pérdidas con la velocidad con la que la onda se propagaría en el vacío ($C_0 \approx 3\times10^8$ m/s) se obtiene el coeficiente de refracción definido como

$$n = \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r}}} = \mathrm{c}_0 \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{1.3}$$

Es decir, con una adecuada selección de *L* y *C* se puede obtener redes de impedancia característica invariable pero que emulen el comportamiento dieléctrico de un material determinado.

El limitante en este tipo de emulaciones será la frecuencia de resonancia propia presente en el modelo de línea de transmisión dada por

$$f_{\mathrm{R}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1.4}$$

1.3.2 ESTADO DEL ARTE

La representación de la propagación de una onda en un medio dieléctrico es emulada por medio de redes circuitales *RLC* que caracterizan las ecuaciones de campo electromagnético [4]. En [4], se induce a la representación tridimensional de estructuras basadas en inductancias, capacitancias y resistencias distribuidas. La Figura 1.3 muestra un ejemplo de la concepción de una red bidimensional realizada con elementos concentrados (resistencias, capacitores e inductores) configurada para caracterizar el modo de propagación TE (*Transverse Electric*) de una onda en un medio determinado.

Con la ayuda de esta configuración, se ha podido implementar estructuras dependientes del modo de propagación, incluso en medios que no se encuentran en la naturaleza [1], [5] o cuyo comportamiento dieléctrico depende de una geometría arbitraria, v.g. el lente de Luneburg [6], cuyo coeficiente de refracción es dependiente del radio de la esfera que constituye el lente. La Figura 1.4 muestra una aplicación radiante del lente de Luneburg en donde la alimentación ocurre en un punto cualquiera del lente (primer foco) y el segundo foco (a donde se propagan las ondas) ocurre en el infinito (propagación de la onda plana).

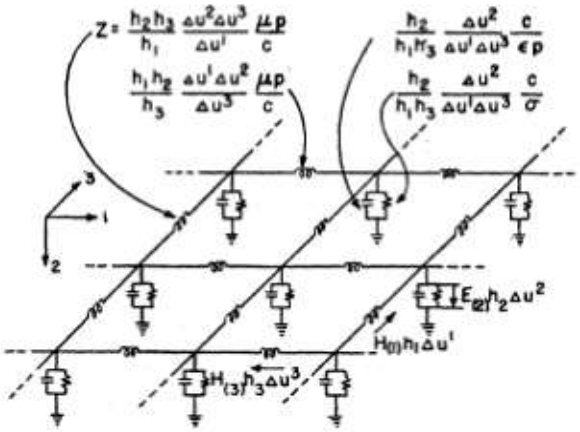

Figura 1.3. Red RLC bidimensional para la caracterización de un medio planar con propagación TE [4]

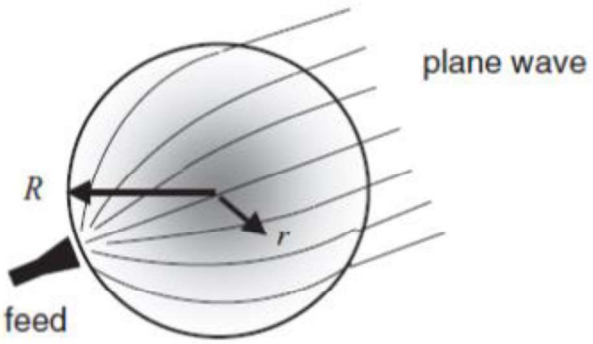

Figura 1.4. Caminos de propagación en un lente Luneburg [7]

En un intento por lograr la distribución radial del coeficiente de refracción dada por Luneburg, se han desarrollado novedosas implementaciones simplificadas que, de alguna manera, han conseguido localizar el segundo foco del lente de Luneburg en el infinito. Estas implementaciones han considerado la propagación de ondas en platos paralelos (Figura 1.5) en donde la variación de la distancia entre platos modifica la velocidad de propagación de las ondas y por ende el coeficiente de refracción [8].

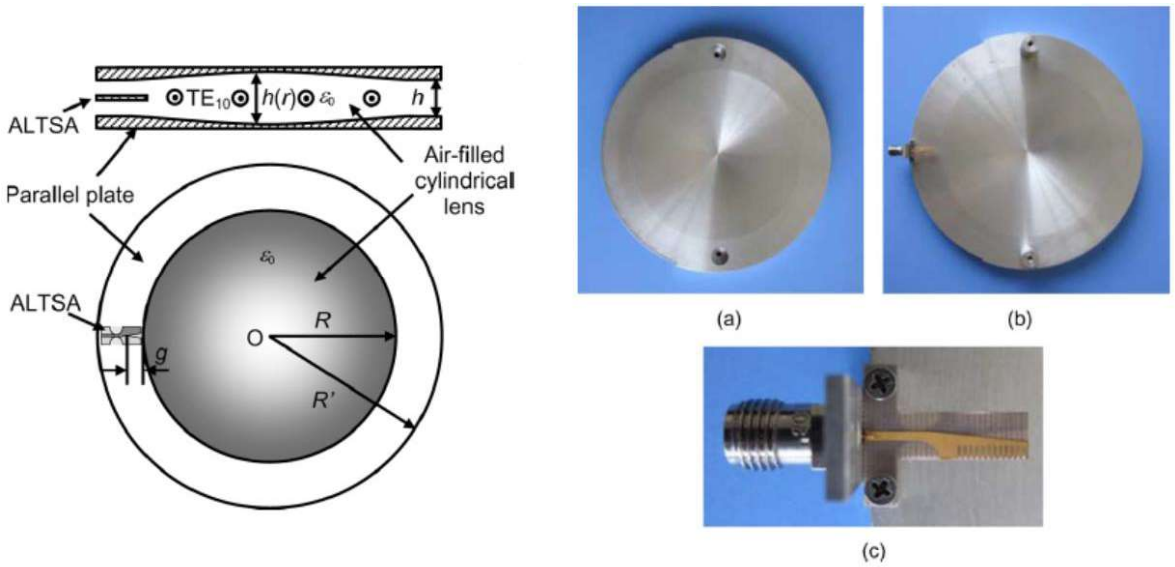

Figura 1.5. Realización de un lente planar de Luneburg. (Izq.) Esquema de propagación de una onda TE_{10} en una guía de onda de platos paralelos. (Der.) Fotografías de implementación del lente. [8]

Así mismo, se ha intentado discretizar la variación del coeficiente de refracción en implementaciones que involucran la utilización de diferentes tipos de materiales (con diferente permitividad relativa) de manera concéntrica en una estructura planar (Figura 1.6) obteniéndose así, a nivel macroscópico, una buena aproximación al lente de Luneburg [9].

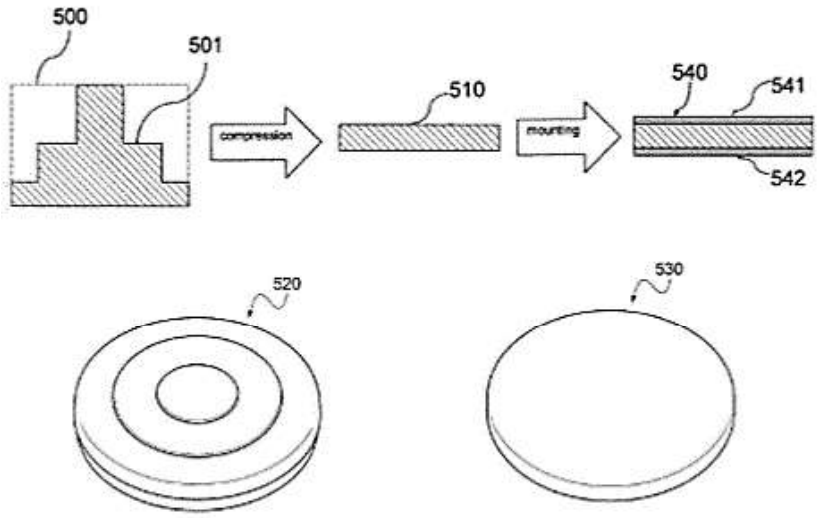

Figura 1.6. Fabricación de lente de Luneburg discreto [9]

Si bien desde el punto de vista de fabricación se ha experimentado con la conformación de estructuras complejas, el análisis, simulación y optimización de este tipo de implementaciones de gran tamaño eléctrico, ha llevado a un gasto enorme en tiempo de simulación y recursos computacionales [10]. Una alternativa para la etapa de diseño de este tipo de estructuras ha sido más bien aprovechada en el análisis y simulación de estructuras no naturales tales como los metamateriales [1] y su aplicación en sistemas radiantes [11], [12]. La Figura 1.7 (Der.) muestra la implementación de una antena lente "tradicional" realizada únicamente con líneas de transmisión debidamente configuradas para cumplir con un perfil dieléctrico colimante dado (Figura 1.7 (Izq.)).

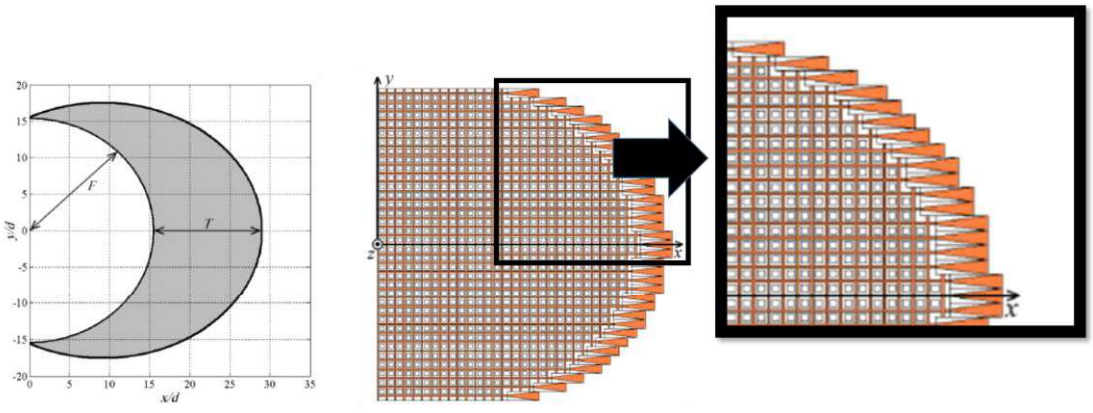

Figura 1.7. Antena lente implementada con líneas de transmisión. (Izq.) Perfil del lente. (Der.) Modelo tridimensional de la implementación [12]

Así mismo, la generación de materiales inexistentes en la naturaleza en aplicaciones radiantes "no tradicionales" ha sido posible con líneas de transmisión que emulen un comportamiento matemático arbitrario. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones es el *cloaking* [13], método basado en la generación de materiales con índices de refracción negativos. La Figura 1.8 muestra la implementación de una estructura encubridora (*cloaking*) realizada con un material no natural (índice de refracción negativo) basado en estructuras de redes circuitales *LC*.

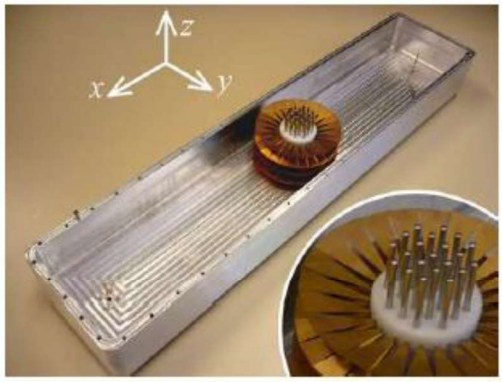

Figura 1.8. Guía de onda con objeto oculto dentro de estructura encubridora (*cloaking*) realizada con líneas de transmisión [13]

Las estructuras de redes circuitales basadas en inductores y capacitores permiten también el estudio de la dispersión de la onda en diversas direcciones. En [10], se implementa un lente semicircular con un índice de refracción dependiente del radio y con estructuras *LC* con tres direcciones de propagación. Así mismo, el lente es alimentado con una estructura rectangular que presenta dos direcciones de propagación. La Figura 1.9 muestra el esquema de implementación del lente semicircular.

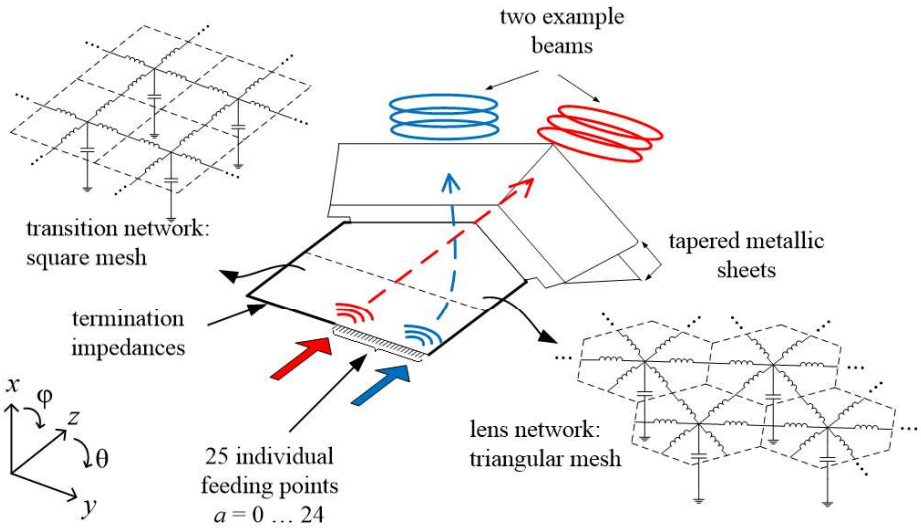

Figura 1.9. Lente planar semicircular con tres direcciones de propagación alimentado con estructura rectangular (dos direcciones de propagación). Cada dirección de propagación está conformada por estructuras circuitales *LC* [10]

2 METODOLOGÍA

En el presente proyecto se diseñará estructuras de redes circuitales *LC* en Keysight® ADS las mismas que emulan las características dieléctricas de estructuras unidimensionales y bidimensionales. Dichas redes circuitales serán generadas mediante archivos tipo *Netlist*. Para esto, se utilizará una interfaz en MATLAB mediante la cual el usuario podrá determinar la dimensión y propiedad dieléctrica de la estructura a ser simulada en Keysight® ADS.

2.1 KEYSIGHT® ADS [14]

2.1.1 INDUCCIÓN A LA HERRAMIENTA KEYSIGHT® ADS

Advanced Design System (ADS) es un programa de simulación para el diseño de una gran variedad de componentes típicos en sistemas de telecomunicaciones, entre otros. El uso de este software posibilita la ejecución de simulaciones relacionadas a amplificadores, redes de banda ancha, osciladores, etc. ADS es propiedad de Keysight Technologies y la versión disponible en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Escuela Politécnica Nacional es la 2016 misma que será utilizada para la realización del presente proyecto.

La ventaja de ADS es la realización de simulaciones avanzadas con elevada precisión sobre redes circuitales que se pueden implementar con elementos de extensas librerías de componentes. Mediante simulaciones sucesivas y con la ayuda de diversas herramientas de análisis de circuitos es posible refinar un determinado circuito de acuerdo a los requerimientos planteados.

El programa implementa además algoritmos de simulación y rutinas de convergencia avanzadas que reducen considerablemente los tiempos de simulación. En conclusión, ADS es el software de automatización de diseño electrónico líder en el mundo para radiofrecuencia (RF), microondas y aplicaciones digitales de alta velocidad, el cual posee una interfaz poderosa y fácil de usar.

ADS continúa liderando la industria de RF EDA (*Radio Frequency Electronic Design Automation*) con las tecnologías más innovadoras y comercialmente exitosas.

Con las bibliotecas de componentes inalámbricos y la tecnología de co-simulación electromagnética circuitos-sistema, ADS proporciona un completo diseño y verificación basados en estándares dentro de una plataforma única e integrada. Sus principales características se enlistan a continuación:

- Completo entorno de captura y diseño esquemático.
- Simuladores de circuitos y sistemas innovadores líderes en la industria.
- Acceso directo, nativo a 3D planar y solucionadores de campo en 3D completos.
- La mayor cantidad de kits de diseño de procesos (PDK – *Process Design Kits*) desarrollados y mantenidos por socios líderes de la industria.
- EDA y la integración del flujo de diseño con empresas como Cadence, Mentor y Zuken.
- Cabina de optimización para retroalimentación y control en tiempo real cuando se utiliza cualquiera de los 12 potentes optimizadores.
- Generación de modelos de parámetros X a partir del esquema del circuito y NVNA de Keysight para diseño de alta frecuencia no lineal.
- Las bibliotecas inalámbricas actualizadas permiten el diseño y la verificación de los últimos estándares inalámbricos emergentes.

En particular, para este proyecto se utilizará la ventana de modo esquemático en donde se conectan los componentes de la manera deseada y sobre la cual se podrá realizar análisis y simulaciones. En la Figura 2.1 se muestra una vista general del software además de la identificación de las principales partes de la ventana de modo esquemático.

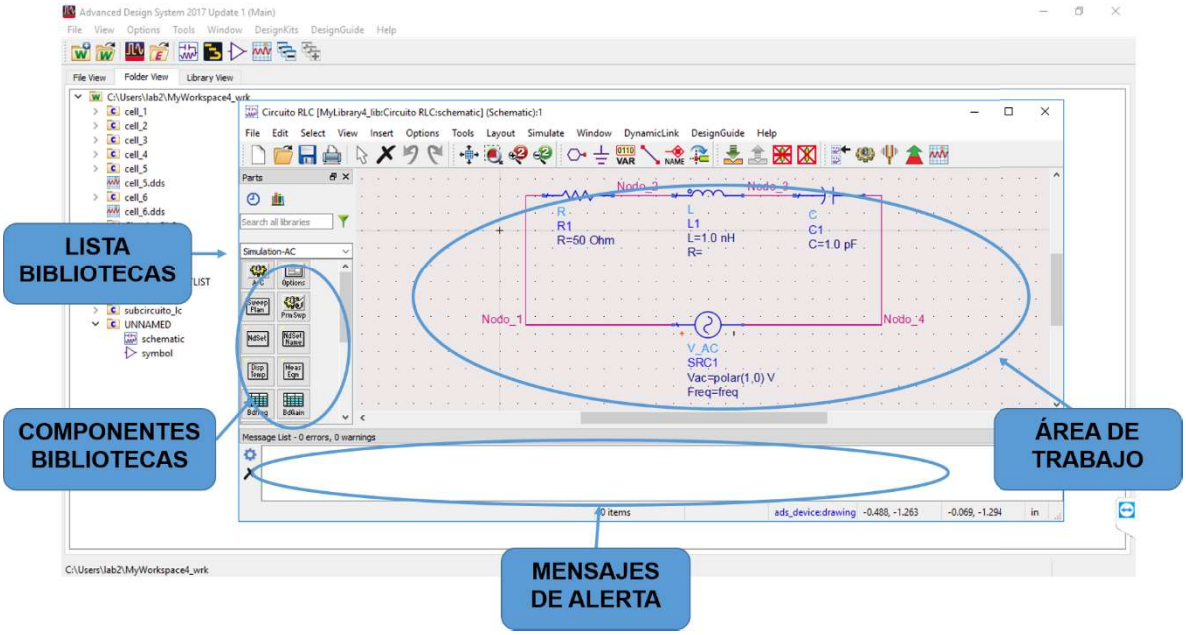

Figura 2.1. Entorno de simulación de ADS – Ventana *Schematic*

2.1.2 JERARQUÍAS Y CREACIÓN DE SUBREDES PARAMÉTRICAS

Se puede usar cualquier red como una subred dentro de otra para crear un diseño jerárquico. Hay dos formas de crear una subred:

- Usando el comando "Crear jerarquía" (Edición > Componente > Crear jerarquía) y especificando una parte de un diseño existente para copiarlo al propio archivo de diseño para usarlo como una subred.
- Creando un nuevo diseño que consista en una red que se desea utilizar como una subred.

2.1.3 CREACIÓN DE SUBREDES PARAMÉTRICAS MEDIANTE ARCHIVOS *NETLIST*

Cualquier red puede servir como una subred paramétrica. Una subred paramétrica es cualquier red para la cual se define los parámetros de control que pasan a través de la red en la que se coloca la subred. Una vez que se haya definido los parámetros, la subred puede servir como una plantilla que permita asignar valores de parámetros cada vez que son colocados en un diseño. Se puede construir bibliotecas enteras de subredes reutilizables de esta manera.

Un *Netlist* es una descripción de la conectividad de un circuito electrónico. En su forma más simple, un *Netlist* consiste en una lista de los componentes electrónicos de un circuito y una lista de los nodos a los que estos están conectados. Una red es una colección de dos o más componentes interconectados. La estructura, la complejidad y la representación de los *Netlist* pueden variar considerablemente, pero el propósito fundamental de cada uno es transmitir información de conectividad. Los *Netlist* generalmente no proporcionan nada más que instancias, nodos y quizás algunos atributos de los componentes involucrados.

En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de tipo esquemático de un circuito *RLC* implementado en Keysight® ADS de manera manual, es decir, arrastrando los elementos desde las diferentes bibliotecas, ubicándolos e interconectándolos entre sí.

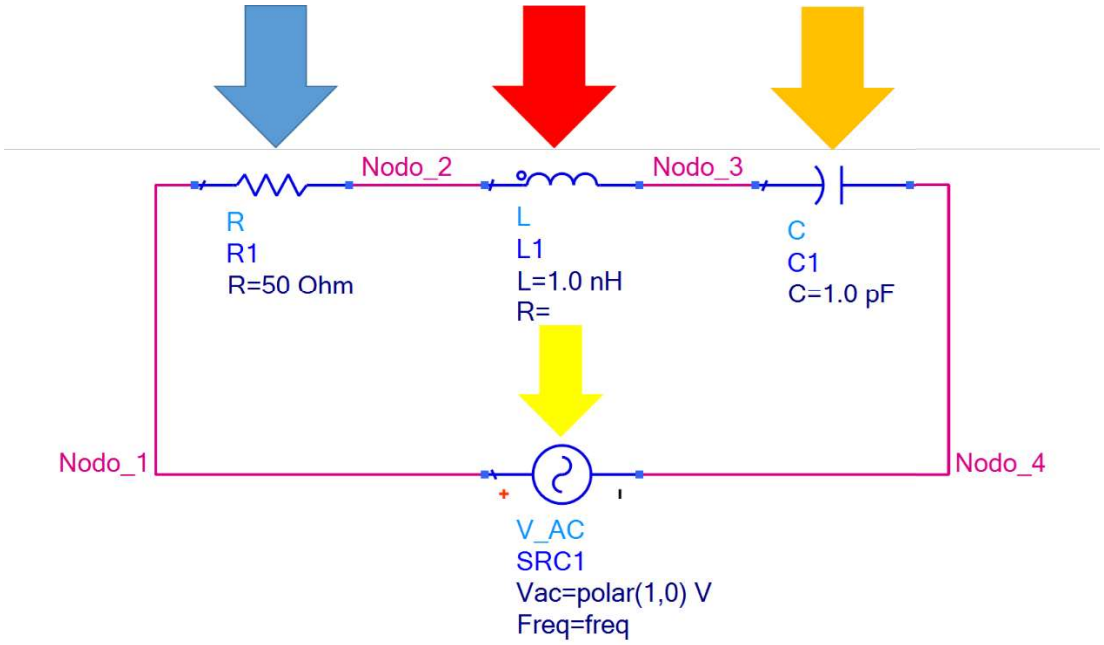

Figura 2.2. Circuito *RLC* ejemplo implementado de manera esquemática en Keysight® ADS

En la Figura 2.3 se observa el *Netlist* generado por Keysight® ADS del circuito ejemplo de tipo esquemático *RLC* mostrado en la Figura 2.2. Se indica la relación entre el elemento del circuito *RLC* y la línea de comando del *Netlist* mediante flechas identificativas de distintos colores.

```
; Top Design: "MyLibrary4_lib:UNNAMED:schematic"
; Netlisted using Hierarchy Policy: "Standard"

Options ResourceUsage=yes UseNutmegFormat=no EnableOptim=no
TopDesignName="MyLibrary4_lib:UNNAMED:schematic"
DcopOutputNodeVoltages=yes DcopOutputPinCurrents=yes
DcopOutputAllSweepPoints=no DcopOutputDcopType=0

R:R1  Nodo_1 Nodo_2 R=50 Ohm Noise=yes

L:L1  Nodo_2 Nodo_3 L=1.0 nH Noise=yes

C:C1  Nodo_3 Nodo_4 C=1.0 pF

V_Source:SRC1  Nodo_1 Nodo_4 Type="V_AC" Vdc=0.0 V
Vac=polar(1,0) V Freq=freq V_Noise=0 uV SaveCurrent=1
```

Figura 2.3. *Netlist* generado para el circuito *RLC* ejemplo

2.1.4 FORMATO GENERAL DE UN ARCHIVO *NETLIST*

En la Figura 2.4 se indica la estructura general del encabezado del archivo *Netlist* y la línea de comando que se usará para la descripción de un elemento pasivo en el mismo.

1. Letra que representa al elemento
2. Nombre
3. Puntos de conexión
4. Valor
5. Unidades
6. Propiedades adicionales

Para la mayoría de los elementos pasivos que se usará en el presente proyecto no es necesario especificar de manera personalizada las propiedades adicionales, se usarán las proporcionadas por omisión de cada elemento. De la misma manera, para el encabezado del archivo *Netlist*, en el cual consta información como: nombre de la librería utilizada, nombre del esquema, entre los más significativos.

```
; Top Design: "MyLibrary4_lib:UNNAMED:schematic"
; Netlisted using Hierarchy Policy: "Standard"

Options ResourceUsage=yes UseNutmegFormat=no EnableOptim=no
TopDesignName="MyLibrary4_lib:UNNAMED:schematic"
DcopOutputNodeVoltages=yes DcopOutputPinCurrents=yes
DcopOutputAllSweepPoints=no DcopOutputDcopType=0

1 → R:R1  Nodo_1 Nodo_2 R=50 Ohm Noise=yes
```

2 3 4 5 6

Encabezado

Figura 2.4. Encabezado y estructura de líneas de comando de un archivo *Netlist*

2.1.5 ANÁLISIS DE PARÁMETROS *S* MEDIANTE SIMULACIÓN

ADS dispone de varios controles de simulación para realizar análisis dependiendo del estudio a ser realizado. Para el presente proyecto se realizará la simulación para analizar el comportamiento de los parámetros *S*.

Los parámetros *S* sirven para el análisis de cualquier circuito de RF evitando los minuciosos análisis que se desarrollarían con la resolución de las ecuaciones de Maxwell, en concreto, son esencialmente los parámetros de reflexión o transmisión que ayudan a caracterizar el comportamiento de los dispositivos. Son bastante utilizados en la caracterización de componentes de RF, es decir, a alta frecuencia o microondas. Básicamente realiza un análisis de pequeña señal en unas condiciones determinadas de temperatura y polarización. Además de la obtención de los parámetros *S*, el software permite obtener la impedancia (o admitancia), retraso de grupo, figura de ruido y permite simular los efectos de la conversión de frecuencia en circuitos con mezcladores.

Para realizar una simulación con parámetros *S* se elige la biblioteca *Simulation-S_Param.* Dentro de ésta, se encuentra el control de simulación *S P*, en el cual se puede modificar los parámetros, es decir, el control de simulación nos servirá para que la red circuital pueda ser simulada bajo ciertos parámetros según los requerimientos, tal como se observa en la Figura 2.5.

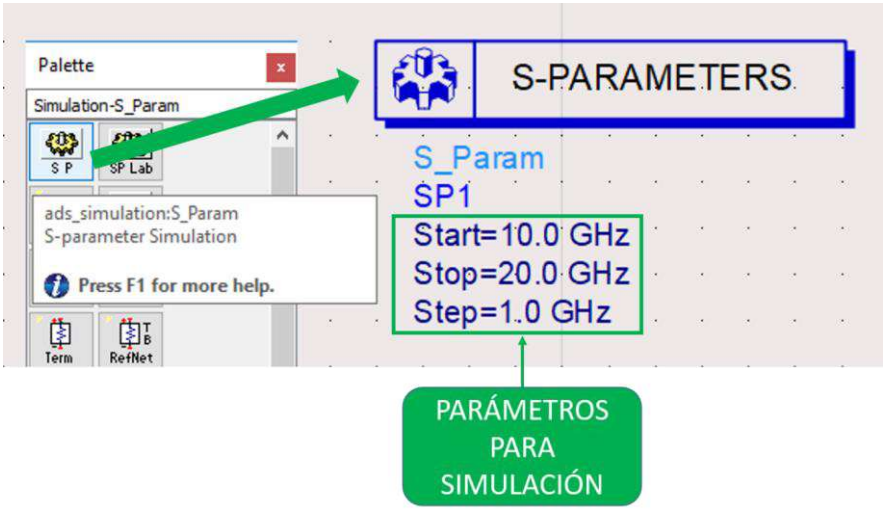

Figura 2.5. Control de simulación para parámetros *S* en Keysight® ADS

Luego de configurar los parámetros mostrados en la Figura 2.5, se puede simular de varias maneras tal como se indica a continuación y en la Figura 2.6.

1. Ingresando en el menú *Simulate* y escogiendo la opción *Simulate*.

2. Escogiendo el símbolo de la barra de herramientas.

3. Presionando *F7*.

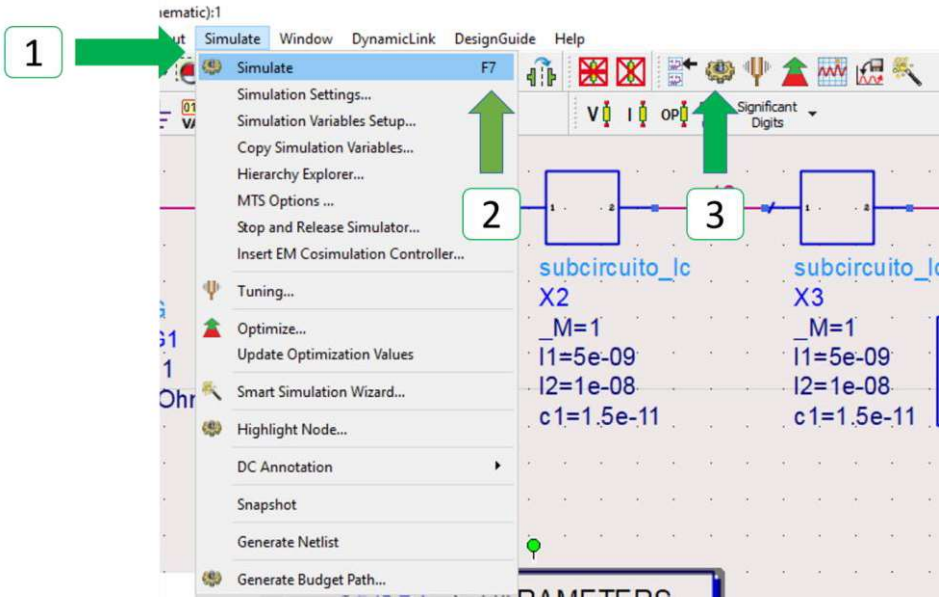

Figura 2.6. Formas de simular

2.1.6 OBTENCIÓN DE RESULTADOS DE FASE DE LOS PARÁMETROS *S*

Una vez puesta en marcha la simulación se despliega la ventana que se observa en la Figura 2.7. Para visualizar los resultados relacionados con la fase de la red circuital implementada se realiza el siguiente procedimiento, expuesto en la Figura 2.7:

1. Ingresando en el menú *INSERT*.
2. Se elige la opción *PLOT*.
3. Omitiendo el paso 1 y 2, se puede seleccionar directamente el ícono *Rectangular Plot.*

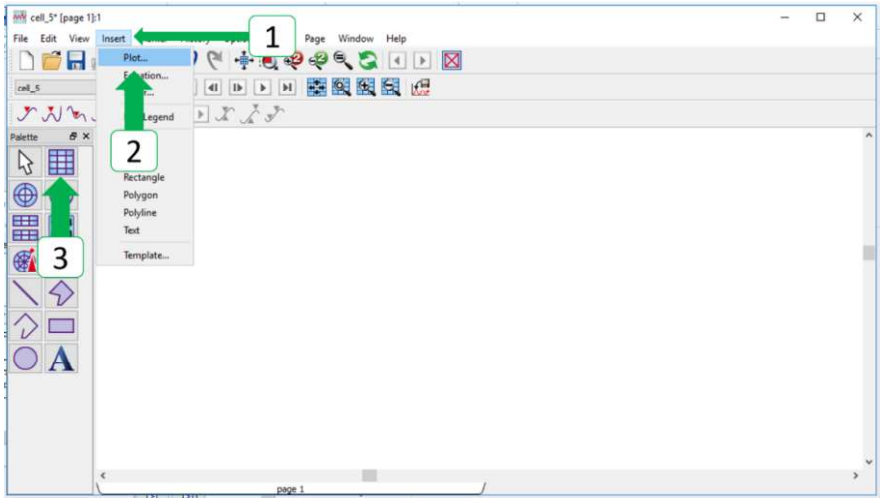

Figura 2.7. Ventana para cargar resultados simulados en Keysight® ADS

4. Click en cualquier parte del área de trabajo, posteriormente se despliega la ventana *Plot Traces & Attributes* mostrada en la Figura 2.8.

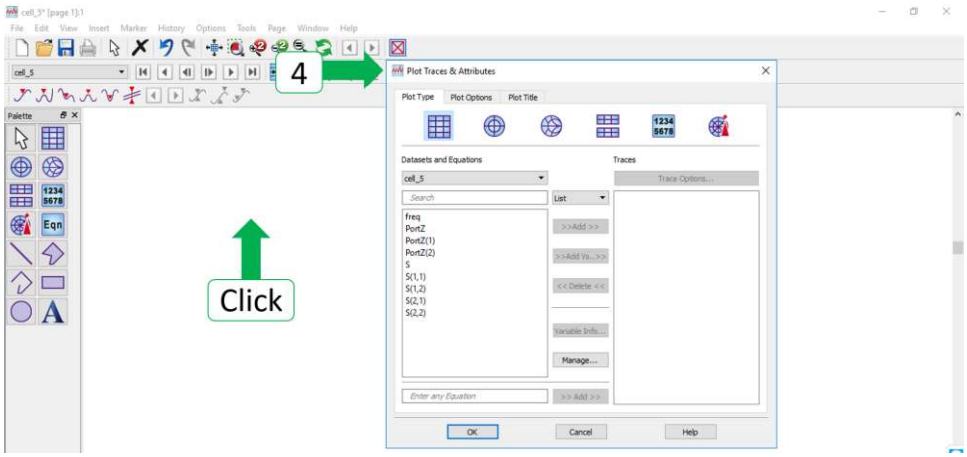

Figura 2.8. Ventana *Plot Traces & Attributes*

5. Se eligen los parámetros que se desean graficar.

6. Se presiona el botón ADD.

Los pasos 6 y 7 se exponen en la Figura 2.9.

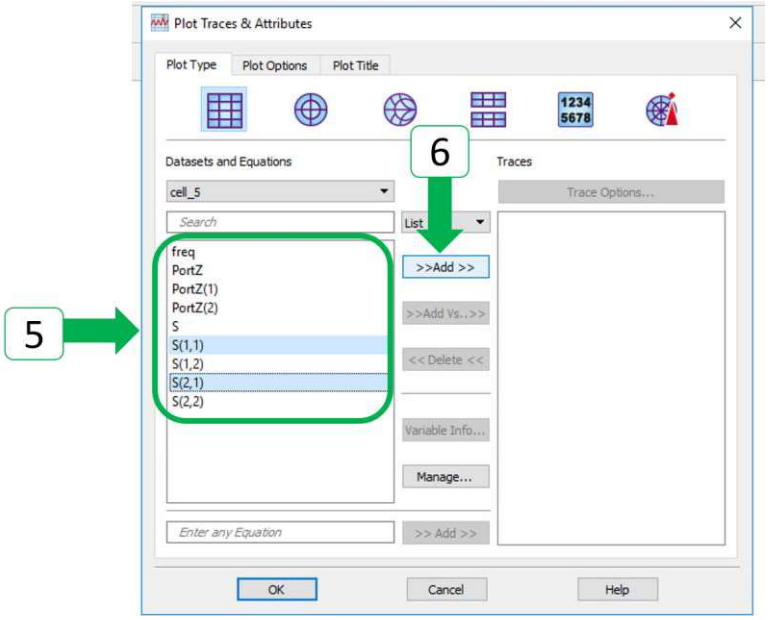

Figura 2.9. Selección de parámetros a graficar en Keysight® ADS

7. Se debe escoger la opción PHASE para poder graficar los resultados de fase del circuito analizado.

8. OK.

Los pasos 7 y 8 se exponen en la Figura 2.10.

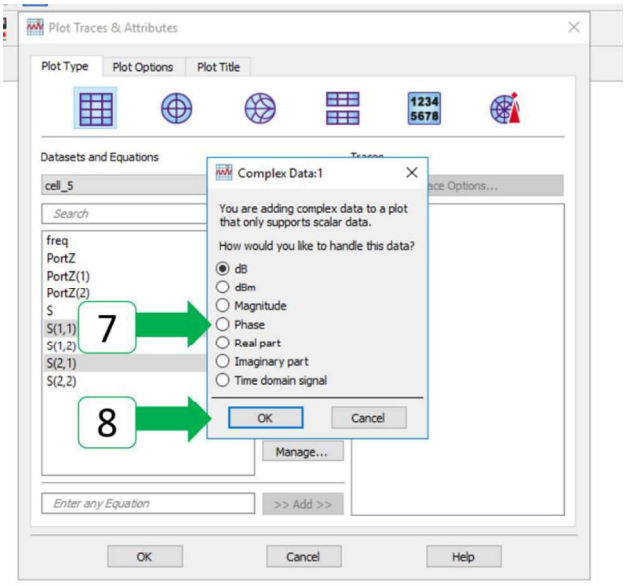

Figura 2.10. Opción gráfica de fase

9. En la parte derecha de la ventana *Plot Traces & Attributes* se despliega los puertos que serán graficados. Se acepta la selección realizada presionando OK tal como se muestra en la Figura 2.11.

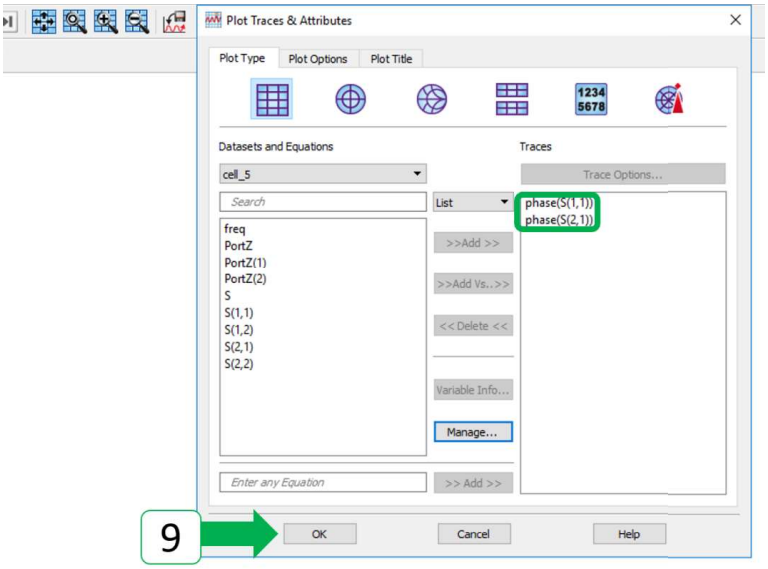

Figura 2.11. Lista de puertos a ser graficados

En la Figura 2.12 se muestra el resultado de la gráfica fase vs. frecuencia, mediante la cual se puede realizar el análisis del circuito dependiendo de las necesidades planteadas.

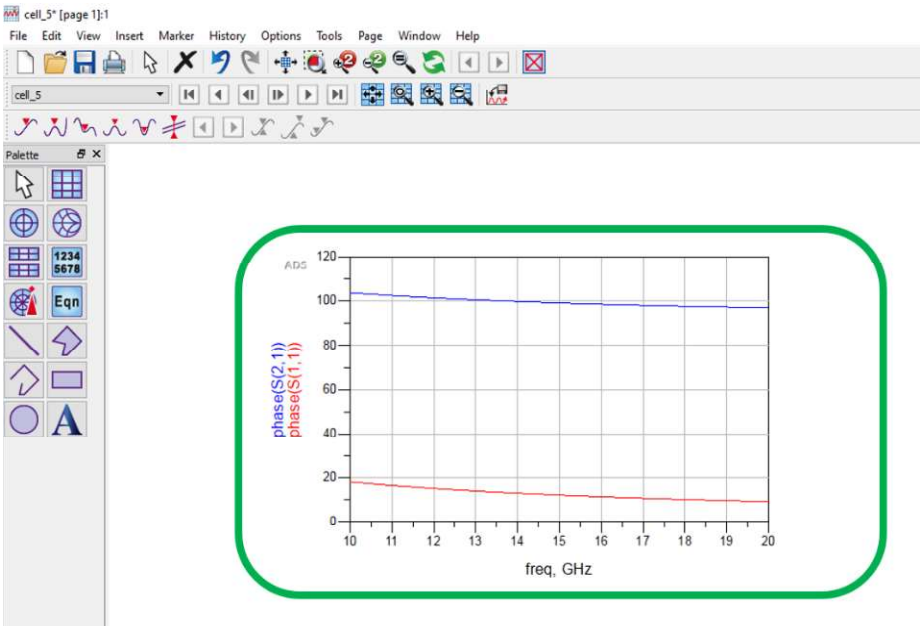

Figura 2.12. Ejemplo de gráfica de la fase vs. frecuencia

2.1.7 COMPONENTE DE INCLUSIÓN DE ARCHIVO NETLIST (*NetlistInclude*)

El componente *NetlistInclude* proporciona un mecanismo para que el simulador ADS use un archivo externo. *NetlistInclude* es el mecanismo recomendado para incluir archivos externos, aunque los componentes en desuso pueden continuar funcionando.

El parámetro *IncludeFiles* le permite crear una lista de archivos de *Netlist* que desea incluir en la simulación. Se utiliza el botón ADD para incluir más de un archivo con un solo componente *NetlistInclude*.

Se deben seguir los siguientes pasos para poder incorporar, en el área de trabajo, el componente *NetlisIncludeList*.

1. Se ingresa a la biblioteca *Simulation-Batch*
2. Se elige el componente *NetlisIncludeList.*
3. Se presiona click en el área de trabajo para ubicar el componente en el lugar deseado.

En la Figura 2.13 se describen los pasos 1, 2 y 3 para colocar el componente *NetlisIncludeList* en el área de trabajo.

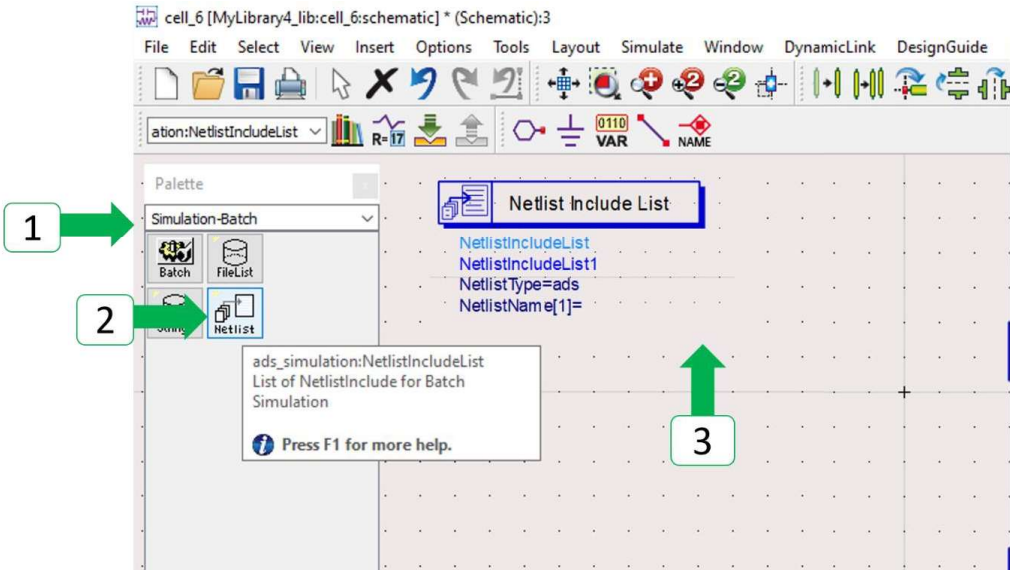

Figura 2.13. Pasos para escoger el componente *NetlistIncludeList*

Se realiza la configuración del componente para enlazarlo al archivo *Netlist* que se desea simular. Con doble click sobre el elemento se despliega la ventana *Edit Instance Parameters*, en la parte *Select Parameters* se elige la opción *NetlistName[1],* finalmente para escoger la carpeta donde se encuentra el archivo *Netlist* se presiona click en el botón *Browse,* tal como se muestra en la Figura 2.14.

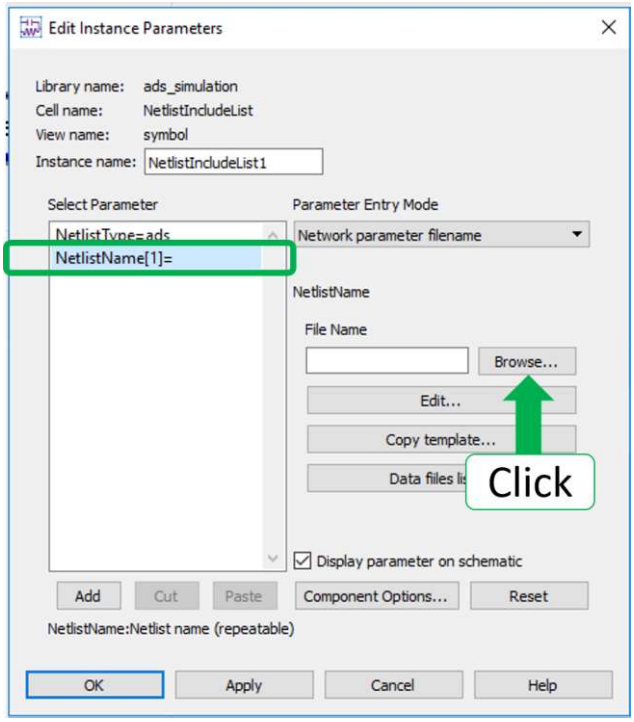

Figura 2.14. Configuración *NetlistIncludeList*

A continuación, nos dirigimos a la carpeta donde se encuentra el archivo *Netlist* que deseamos cargar en el ADS, se lo escoge y selecciona usando el botón ABRIR, como se observa en la Figura 2.15.

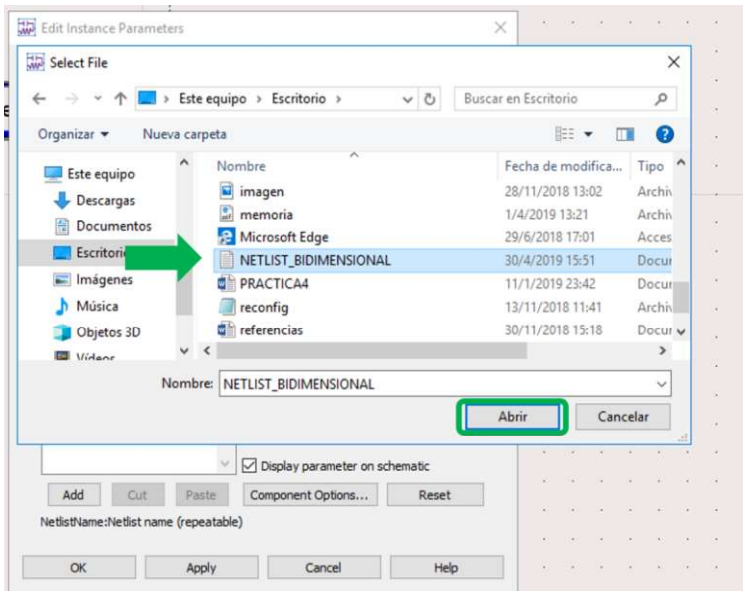

Figura 2.15. Selección de archivo *Netlist*

En la Figura 2.16, en primera instancia se selecciona PASTE para que la ruta del archivo *Netlist* que se desea cargar en ADS se muestre en *Select Parameters*, tal como se muestra en verde. Seguidamente se presiona APPLY para que la misma ruta se muestre en el componente NetlistIncludeList, como se muestra en azul, con lo cual el archivo *Netlist* seleccionado queda cargado y listo para poder ser utilizado en una simulación en el software.

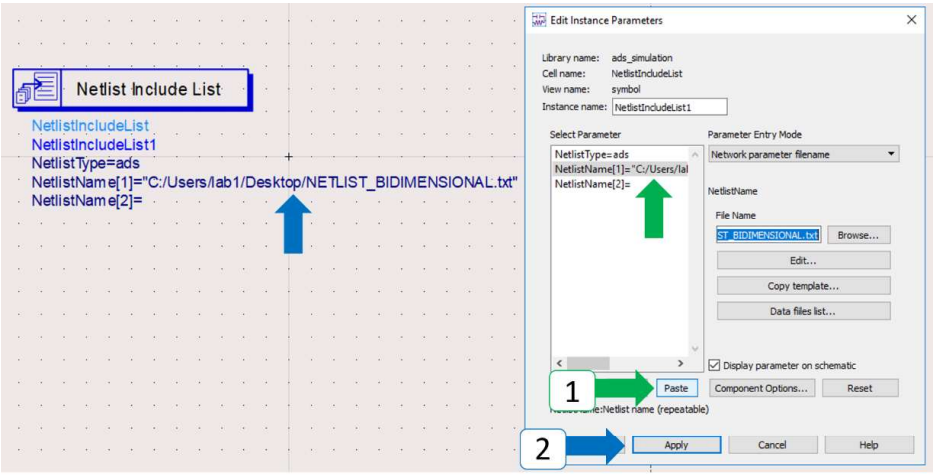

Figura 2.16. Aplicación de archivo Netlist en ADS

2.2 MATLAB

2.2.1 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO EN MATLAB

Las GUI o interfaces gráficas de usuario son un entorno de programación visual disponible en MATLAB que permiten un control sencillo de las aplicaciones de software, es decir, sirven para realizar y ejecutar programas que necesiten ingreso continuo de datos. Tiene las características básicas de todos los programas visuales como Visual Basic o Visual C++.

GUIDE (entorno de desarrollo de GUI) proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para Apps personalizadas. Mediante el editor de diseño de GUIDE, es posible diseñar gráficamente la interfaz de usuario. GUIDE genera entonces de manera automática el código de MATLAB para construir la interfaz, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la app.

Una forma de acceder al entorno de desarrollo de GUI es ejecutando la instrucción *guide* en la ventana de comandos de MATLAB.

Como se observa en la Figura 2.17, para crear un GUI en blanco se elige la opción *Blank GUI* la cual viene dada por omisión (1), además se puede introducir la ruta donde se deseamos que se guarde el archivo .fig(2), finalmente se presiona OK (3) para completar la creación del nuevo GUI.

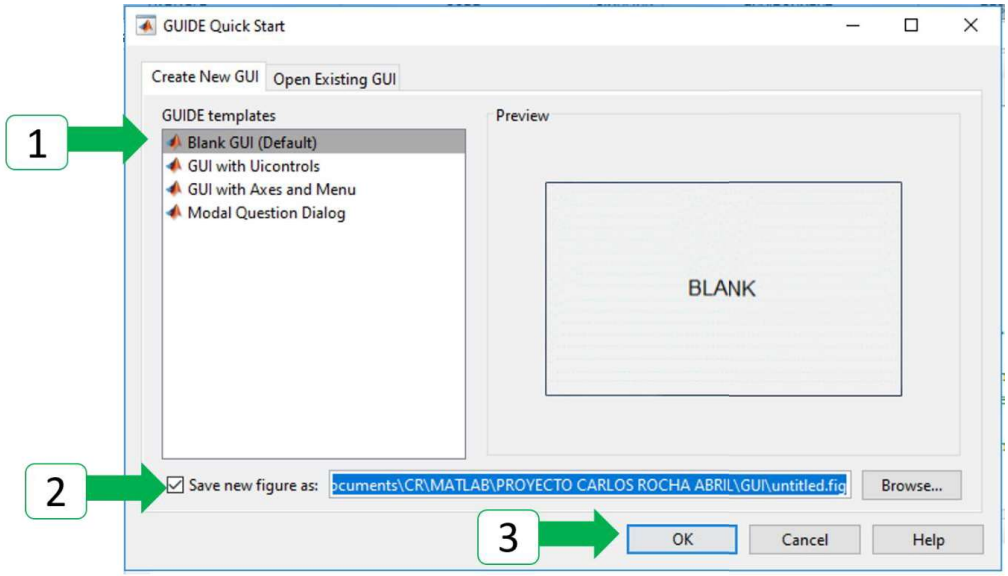

Figura 2.17. Ventana de inicio de GUIDE

Como se muestra en la Figura 2.18, en el entorno de GUI contamos con la *Paleta de Componentes* en que se incluye controles tales como menús, barra de herramientas, botones, controles deslizantes, entre otros, los mismos que son usados en el *Área de Diseño* con el fin de desarrollar la interfaz gráfica dependiendo los requerimientos del usuario.

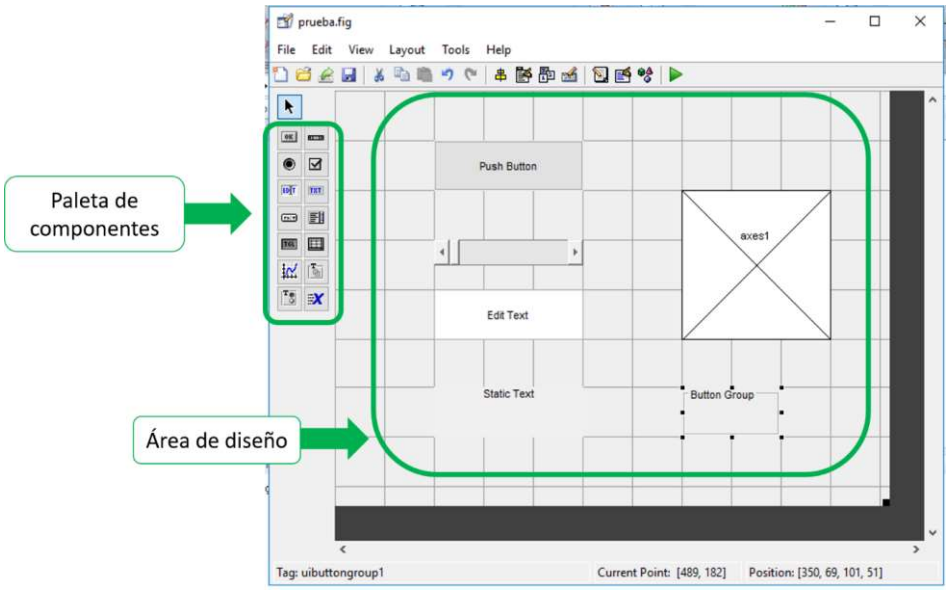

Figura 2.18. Entorno de diseño de GUI

Una aplicación GUIDE consta de dos archivos: *.m* y *.fig*. El archivo *.m* es el que contiene el código con las correspondencias de los botones de control de la interfaz y el archivo *.fig* contiene los elementos gráficos. Cada vez que se adicione un nuevo elemento en la interfaz gráfica, se genera automáticamente el código en el archivo *.m*.

2.2.2 SCRIPT EJECUTADO DESDE GUI

Para ejecutar un *script* de MATLAB o archivo *.m* se utiliza el componente *PUSH BUTTON* de la paleta del entorno GUI. Para configurar el componente se presiona click derecho y se elige la opción *View Callbacks*, seguido de *Callbacks,* tal como se muestra en la Figura 2.19.

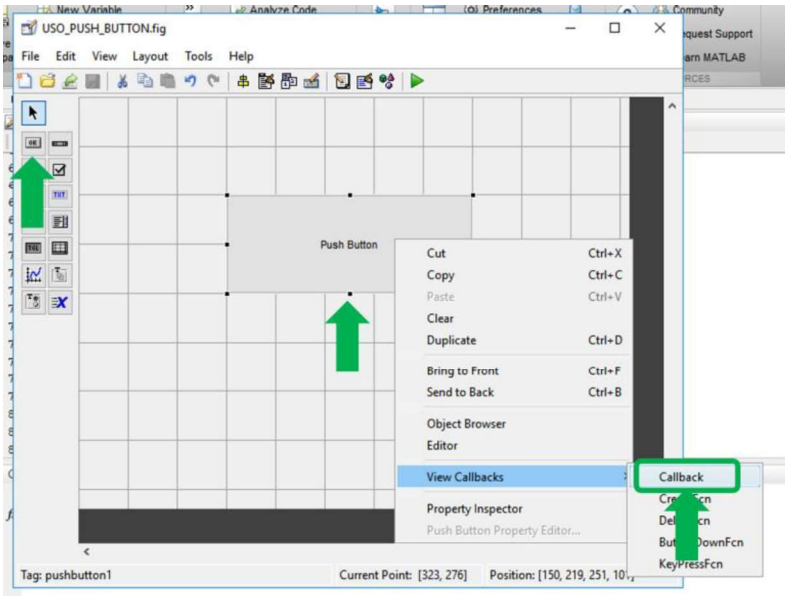

Figura 2.19. Callback Push Button

La opción elegida *Callback* abre el archivo *.m* del *Push Button* donde se puede configurar el componente dependiendo de los requerimientos (Figura 2.20).

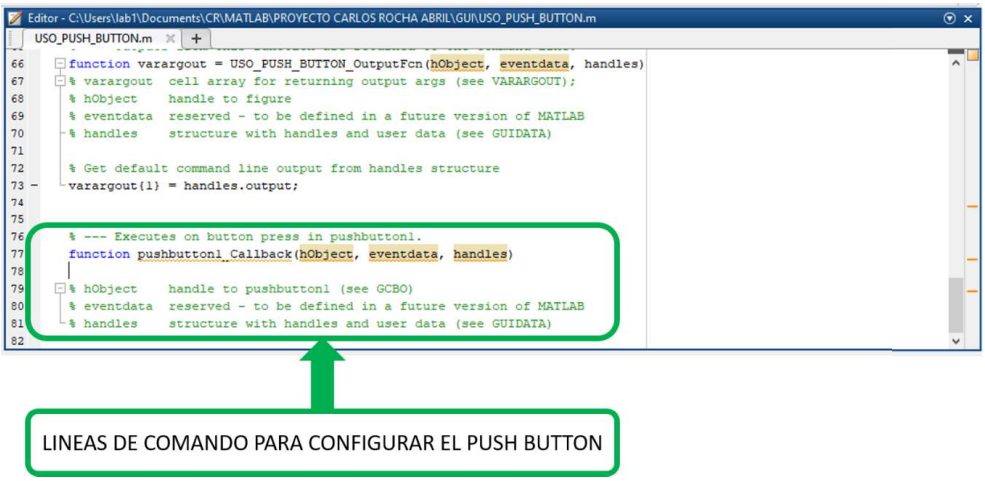

Figura 2.20. Archivo *.m* del elemento *Push Button*

Tal como se muestra en la Figura 2.21, para ejecutar un *script*, en este caso de nombre *EJEMPLO.m*, se escribe el nombre del *script* sin su extensión en la función *callback* del *Push Button*.

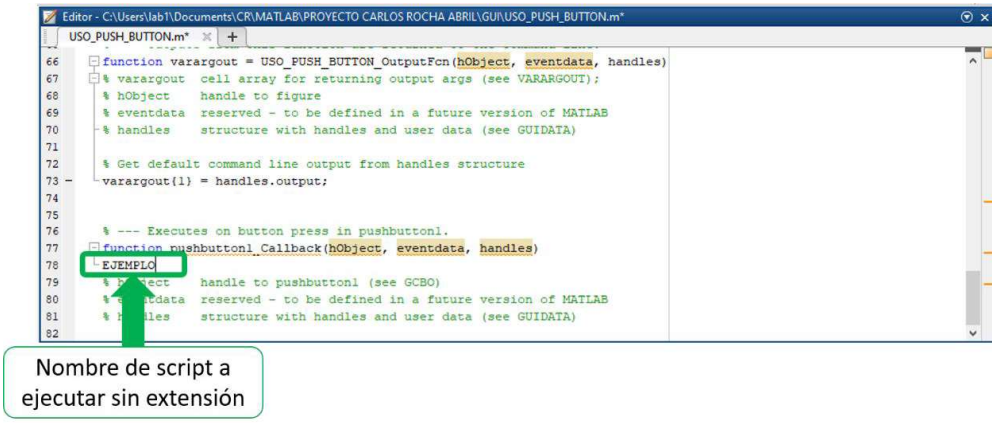

Figura 2.21. Ejecución de *script* mediante un *Push Button*

De esta forma al presionar el *Push Button* en la interfaz se ejecutará el *script EJEMPLO.m.*

2.3 IMPLEMENTACIÓN DE UNA MALLA UNIDIMENSIONAL

Un circuito unidimensional *LC* se compone por dos inductores en serie y, en su punto común, un capacitor conectado a tierra, como se observa en la Figura 2.22.

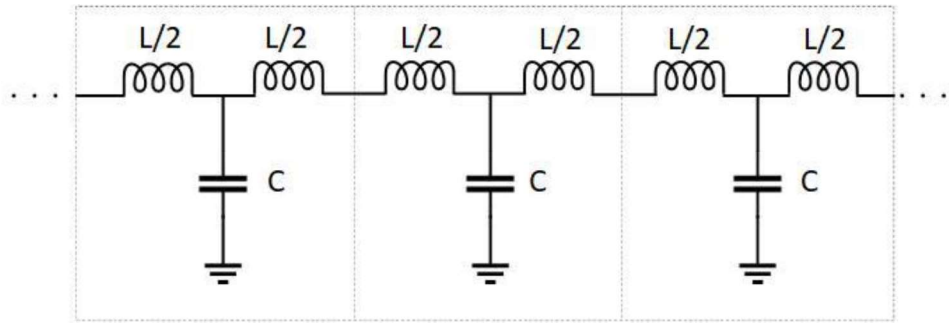

Figura 2.22. Circuito *LC* unidimensional

2.3.1 CREACIÓN DE SUBREDES UNIDIMENSIONALES

Para implementar un circuito unidimensional *LC*, en ADS, se usan los elementos disponibles para diseñar el circuito de manera manual, es decir, arrastrando los elementos

de la paleta de componentes de la biblioteca al área de trabajo e interconectándolos según nuestros requerimientos.

Los componentes para estructurar el circuito unidimensional *LC* se encuentran en la biblioteca *Lumped Components*, de la misma, se seleccionan dos inductores (*L*) y un capacitor (*C*). Para ubicar un componente en el área de trabajo se selecciona el elemento en la paleta de la biblioteca y se lo ubica en el lugar donde se desea ubicarlo, tal como se observa en la Figura 2.23.

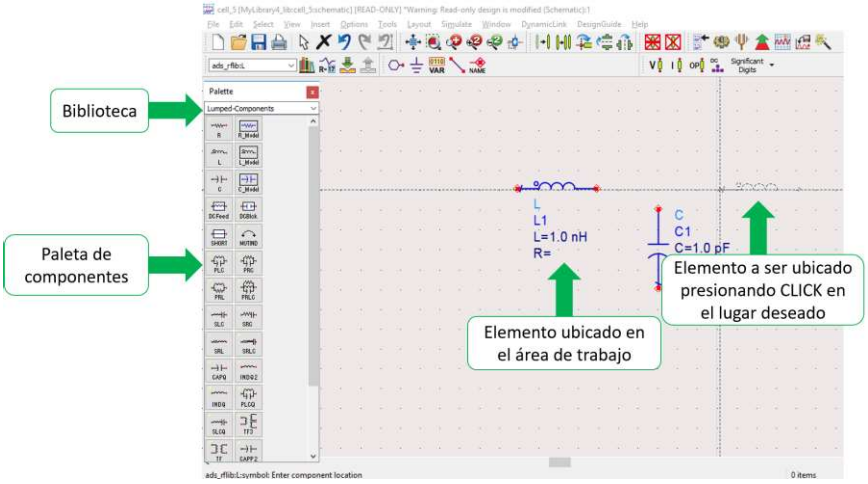

Figura 2.23. Elementos ubicados en el área de trabajo de ADS

Para conectar los elementos entre sí se utiliza la herramienta *Insert Wire,* con la que se unen los nodos de los elementos mostrado en Figura 2.24.

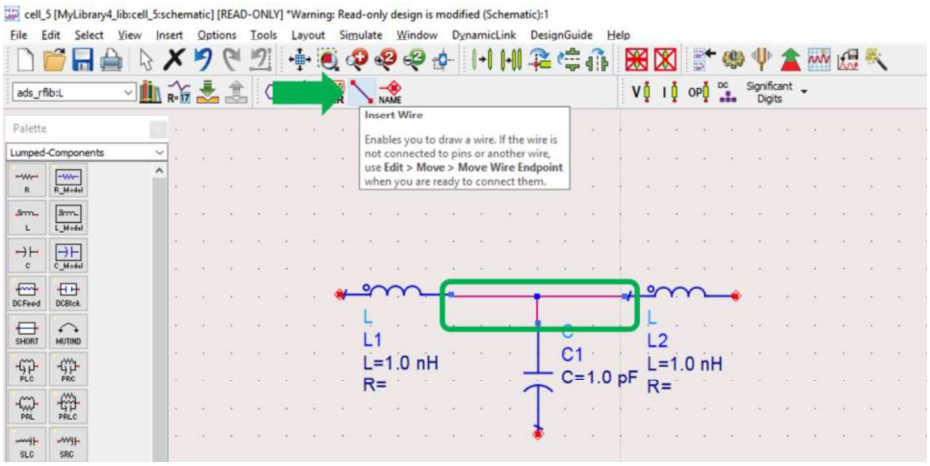

Figura 2.24. Interconexión de elementos en ADS

Para realizar la conexión a tierra o GND del capacitor se usa la herramienta *Insert Ground*, la ubicación de la herramienta se muestra en la Figura 2.25.

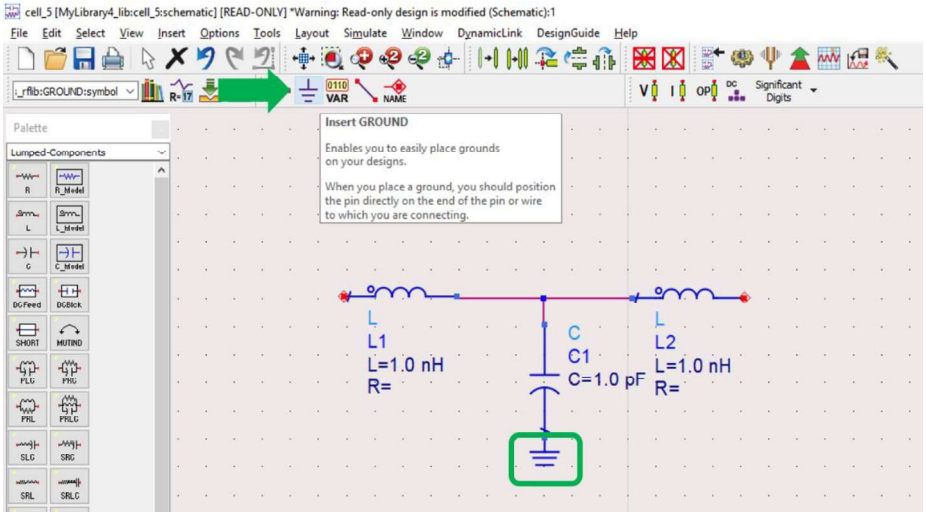

Figura 2.25. Conexión a GND en ADS

En la Figura 2.26 podemos ver la herramienta con la que podemos dar nombre a los nodos de conexión de los elementos.

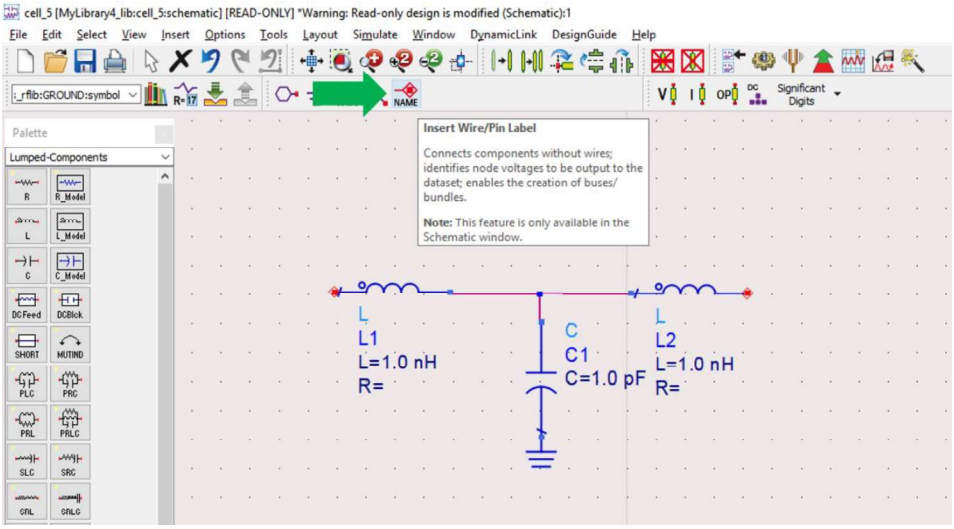

Figura 2.26. Herramienta para etiquetar nodos de conexión

Una vez seleccionada la herramienta se presiona click en el lugar donde queremos ubicar la etiqueta y se escribe el nombre de preferencia. El resultado de etiquetar los nodos del circuito unidimensional *LC* se muestra en la Figura 2.27.

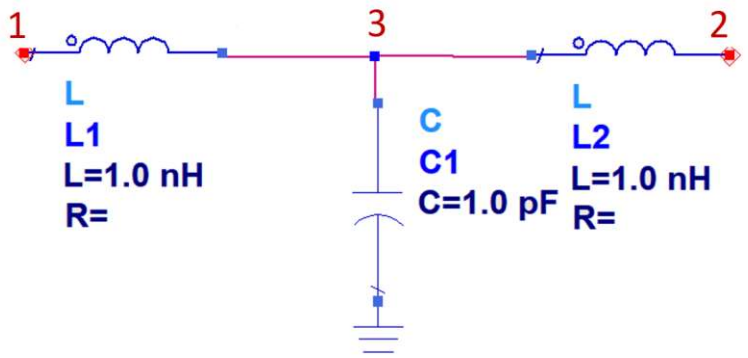

Figura 2.27. Etiquetado de nodos en ADS

En la Figura 2.28 se muestra los elementos del circuito unidimensional expresado en formato de archivo *Netlist*, en el cual se identifica los elementos y nodos de conexión entre otros parámetros.

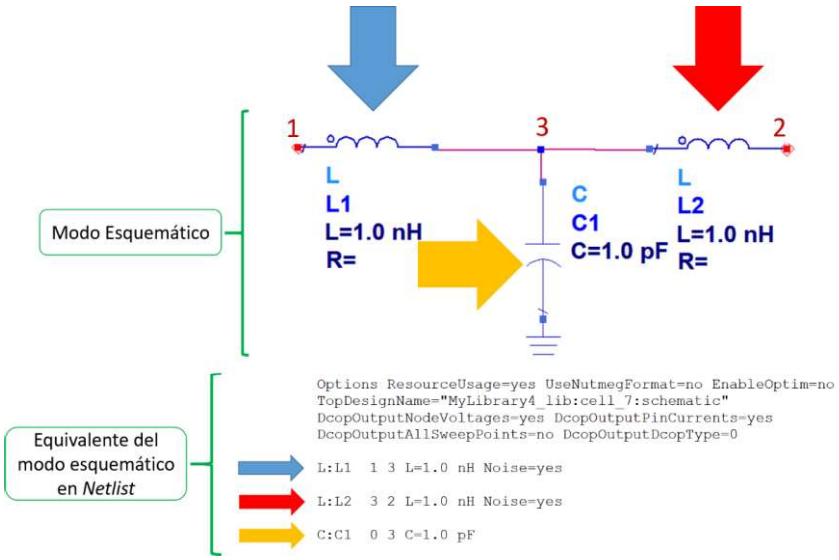

Figura 2.28. Equivalente de modo esquemático a *Netlist*

2.3.2 GENERACIÓN DE NETLIST EN MATLAB

Para la generación automática de un archivo *Netlist* en el presente proyecto se utilizará el *script* llamado *NETLIST_SUBRED_UNIDIMENSIONAL.m* creado en MATLAB. El código de dicho *script* se muestra en el ANEXO A.

Su funcionamiento se describe por medio del diagrama de flujo de la Figura 2.29.

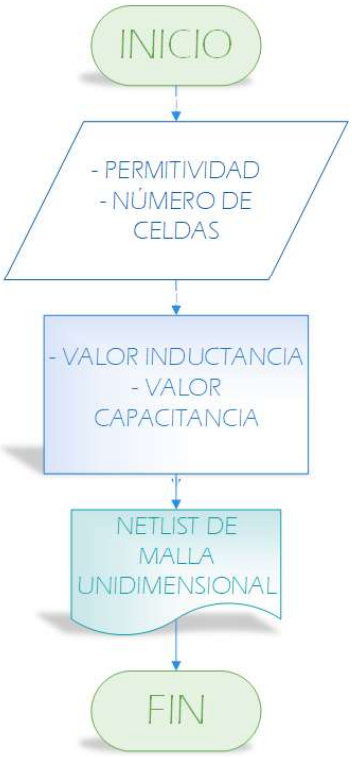

Figura 2.29. Funcionamiento del *Script* *NETLIST_SUBRED_UNIDIMENSIONAL.m* de MATLAB

2.4 IMPLEMENTACIÓN DE UNA MALLA BIDIMENSIONAL

Un circuito *LC* bidimensional se encuentra conformado por cuatro inductores y un capacitor interconectados tal como se muestra en la Figura 2.30.

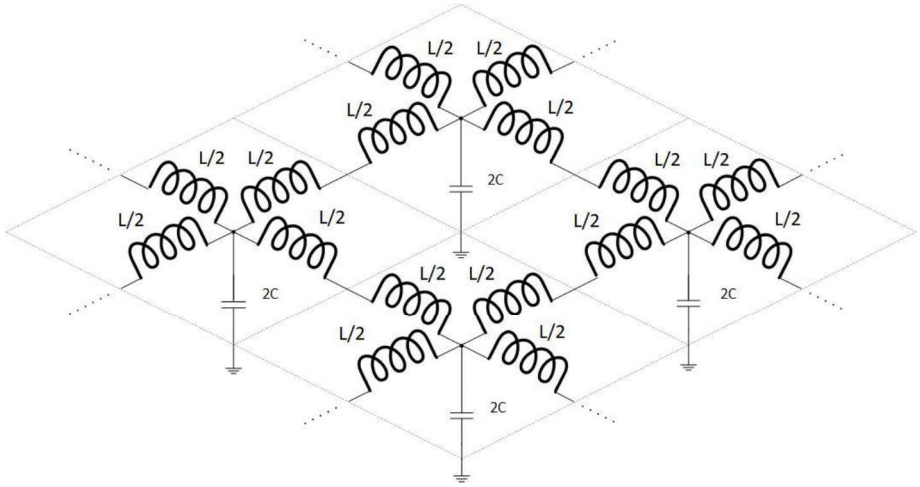

Figura 2.30. Circuito *LC* bidimensional

Para el objetivo del presente trabajo, se realizarán simulaciones de la malla bidimensional tomando en cuenta un puerto de alimentación centrado en la primera columna de la malla y puertos de salida tal como se muestra en el esquema de la Figura 2.31.

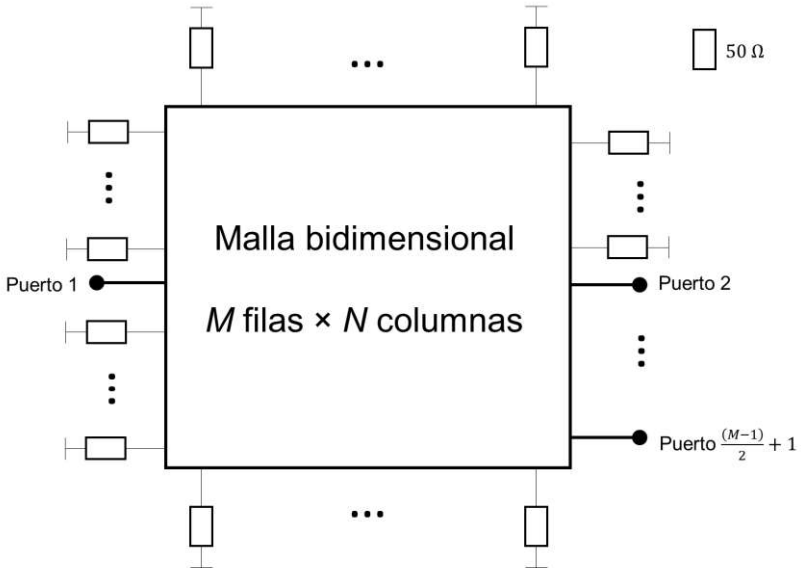

Figura 2.31. Conformación de la malla bidimensional en ADS

Nótese que los puntos que no tienen conexión a un puerto están dotados de resistencias de 50 Ω.

Un ejemplo de lo que un archivo *Netlist* crearía como malla bidimensional de 3 × 5 se muestra en la Figura 2.32.

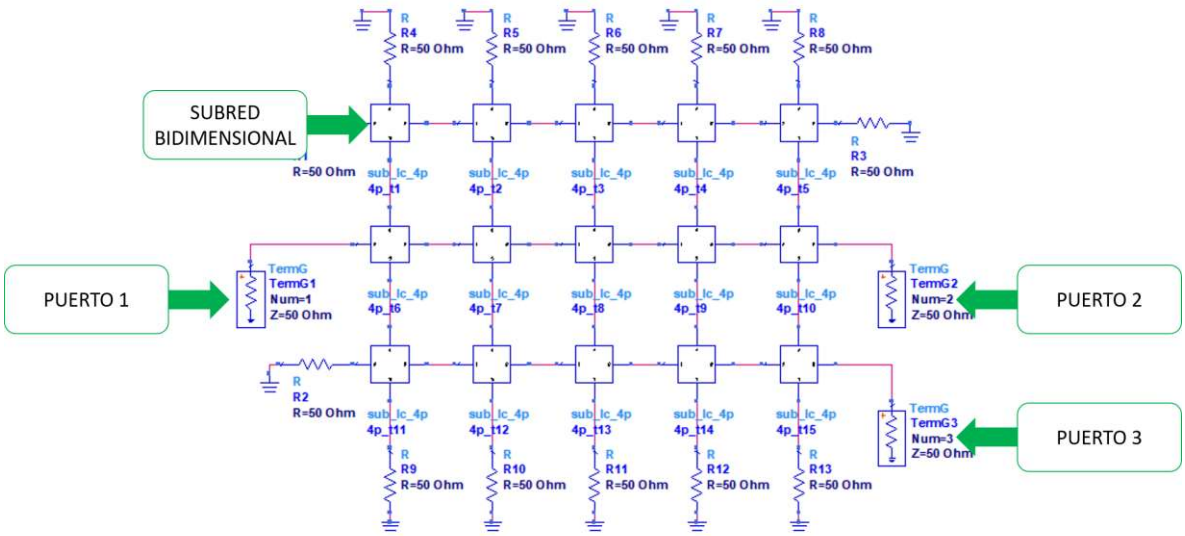

Figura 2.32. Ejemplo de malla bidimensional concebida por un archivo *Netlist*

2.4.1 CREACIÓN DE SUBREDES BIDIMENSIONALES

Para la creación de una subred *LC* bidimensional en ADS se procede como se describe en la sección 2.3.1 del presente proyecto utilizando en este caso el diseño que se muestra en la Figura 2.30.

2.4.2 GENERACIÓN DE NETLIST EN MATLAB

Para la generación automática de un archivo *Netlist*, se utilizará el *script* llamado *NETLIST_SUBRED_BIDIMENSIONAL.m* creado en MATLAB. El código de dicho *script* se muestra en el ANEXO B.

Su funcionamiento se describe por medio del diagrama de flujo de la Figura 2.33.

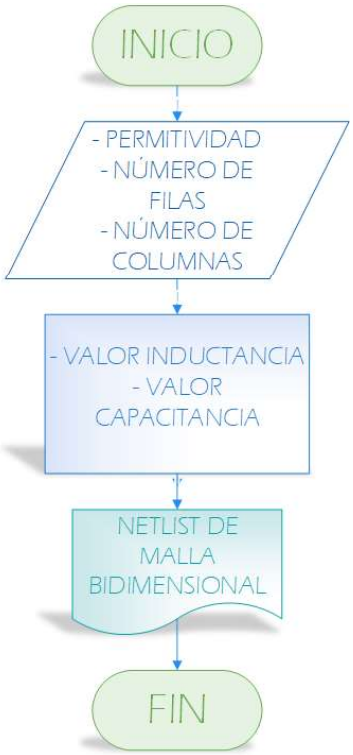

Figura 2.33 Funcionamiento del *Script* *NETLIST_SUBRED_BIDIMENSIONAL.m* de MATLAB

3 RESULTADOS

Para el correcto funcionamiento de las interfaces de usuario, tanto para mallas de circuitos *LC* unidimensionales y bidimensionales, se requiere de lo siguiente:

- En el caso de mallas unidimensionales se requiere del ingreso de dos datos por parte del usuario, número de celdas y valor de permitividad.
- En el caso de mallas bidimensionales se requiere el ingreso de tres datos por parte del usuario, número de filas de la malla, número de columnas de la malla y valor de permitividad.

3.1 INTERFAZ DE USUARIO PARA CREAR UNA MALLA CON CIRCUITOS *LC* UNIDIMENSIONALES

Como se muestra en la Figura 3.1, se presiona click sobre el botón *COMENZAR*, de esta manera se sale de la carátula principal del proyecto y se despliega la ventana mostrada en la Figura 3.2, donde se elige la opción *MALLA UNIDIMENSIONAL* para continuar.

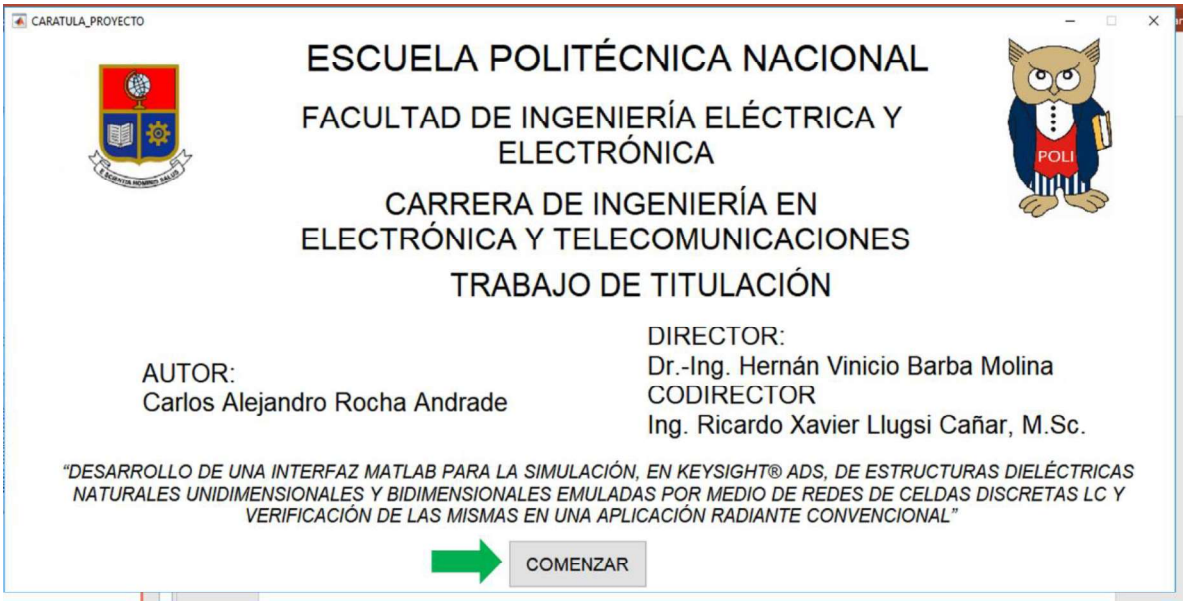

Figura 3.1. Carátula de la interfaz de usuario

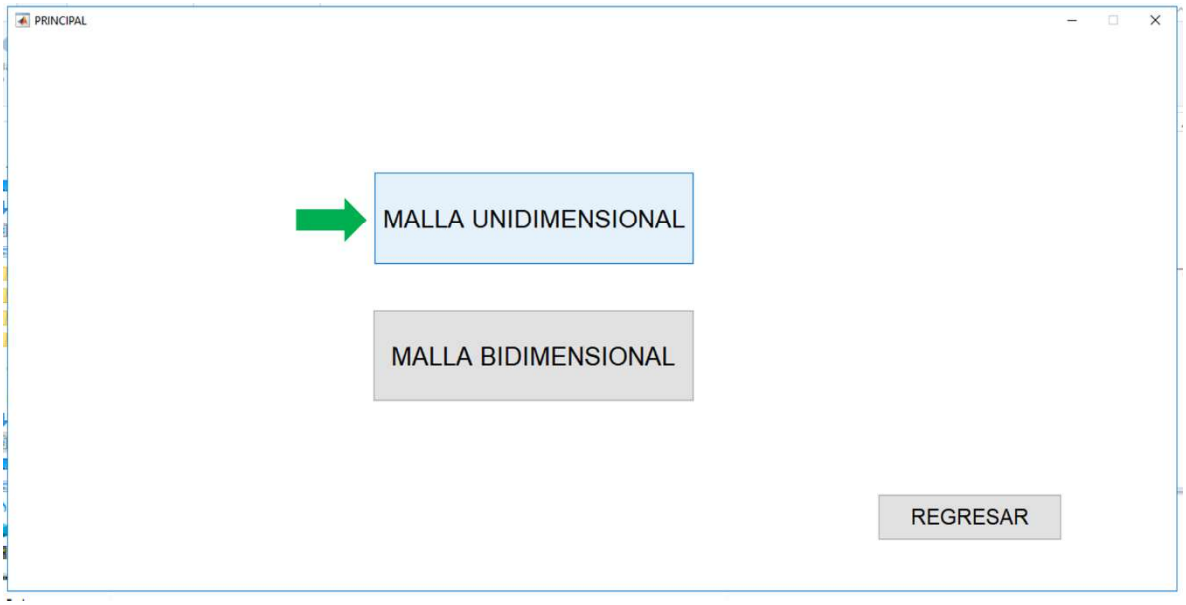

Figura 3.2. Ventana Principal de la interfaz

Una vez escogido el tipo de malla que deseamos diseñar, se introducen los datos: número de celdas y permitividad en los cuadros de texto respectivos, seguido de la opción *GENERAR NETLIST*.

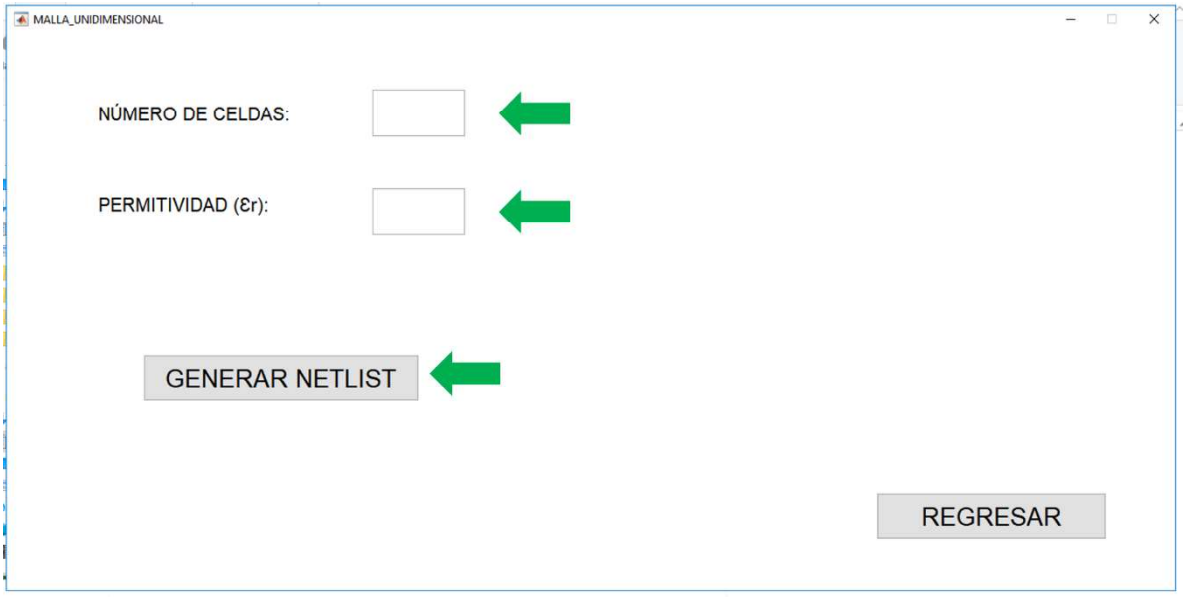

Figura 3.3. Ventana de ingreso de parámetros y generación de *Netlist Unidimensional*

Cuando el proceso de generación del archivo *Netlist* termina se despliega la Figura 3.4, donde se observa los valores de inductancia, capacitancia y frecuencia de resonancia calculados, además de un bosquejo del circuito general que se generó usando los datos proporcionados.

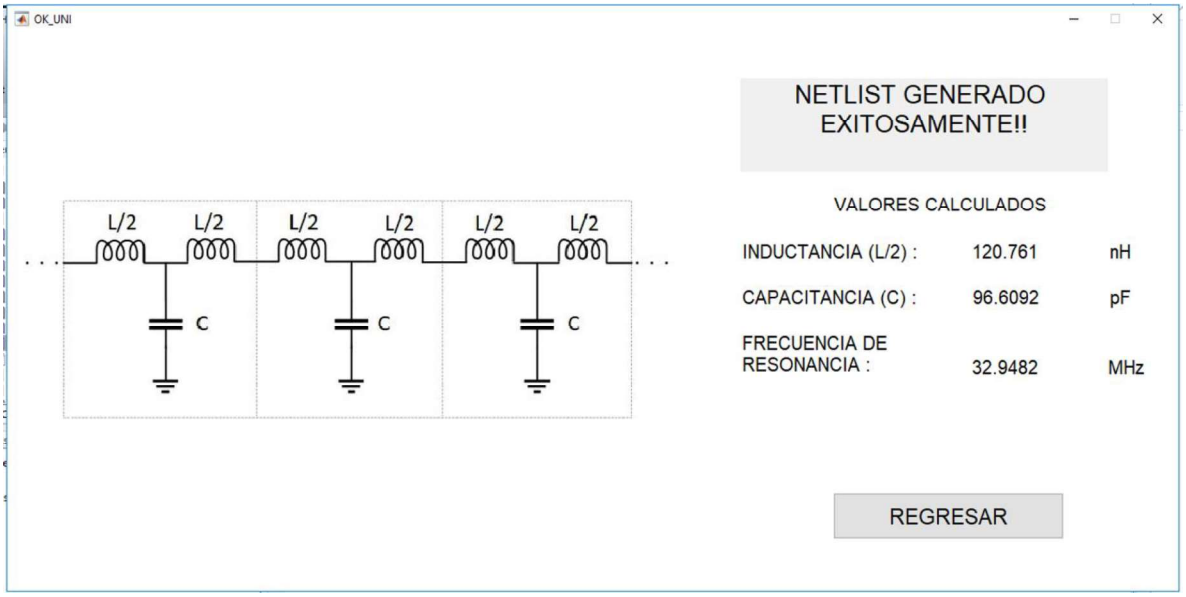

Figura 3.4. Ventana final de la interfaz

El archivo *Netlist* generado se guarda en la carpeta de MATLAB asignada por omisión con el nombre de *Netlist_Unidimensional.txt*, el mismo que se debe cargar en el ADS tal como se indicó en la sección 2.1.7.

Para generar un *Netlist* de una malla de circuitos *LC* bidimensional en la ventana que se muestra en la Figura 3.5 se escoge la opción *MALLA BIDIMENSIONAL*.

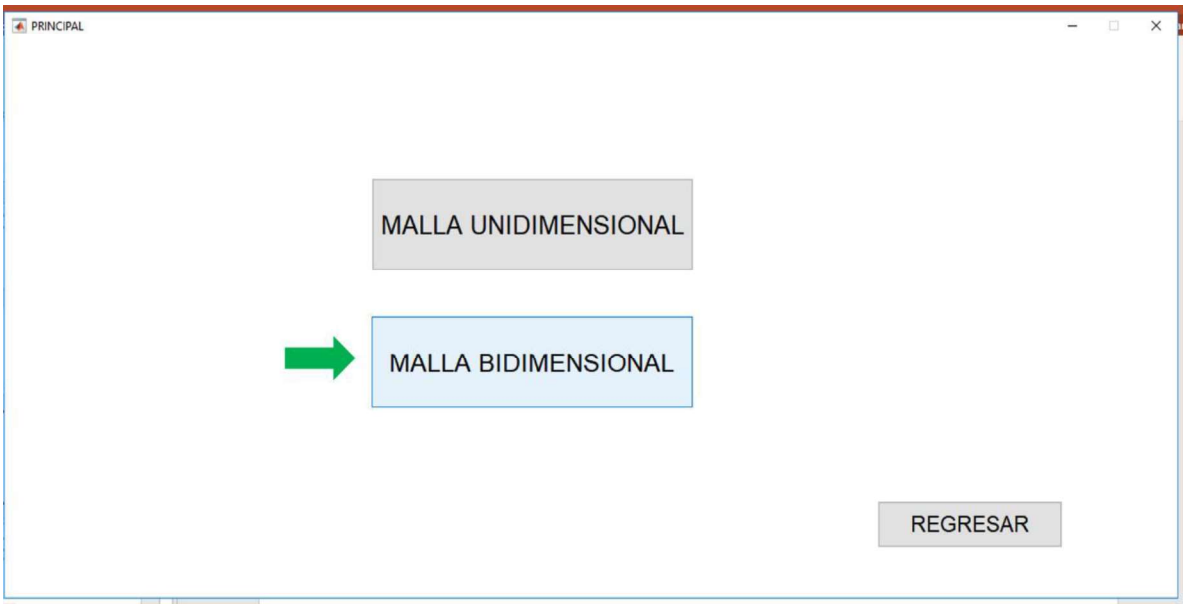

Figura 3.5. Ventana principal de la interfaz

En la ventana que se observa en la Figura 3.6 se ingresan los datos, número de filas, número de columnas y permitividad, teniendo en cuenta que por motivos de diseño el número de filas debe ser un valor impar, referirse a la Figura 2.31. Si no se cumple con este requerimiento se despliega un mensaje de error tal como se muestra en la Figura 3.7.

Figura 3.6. Ventana de ingreso de datos y generación de *Netlist Bidimensional*

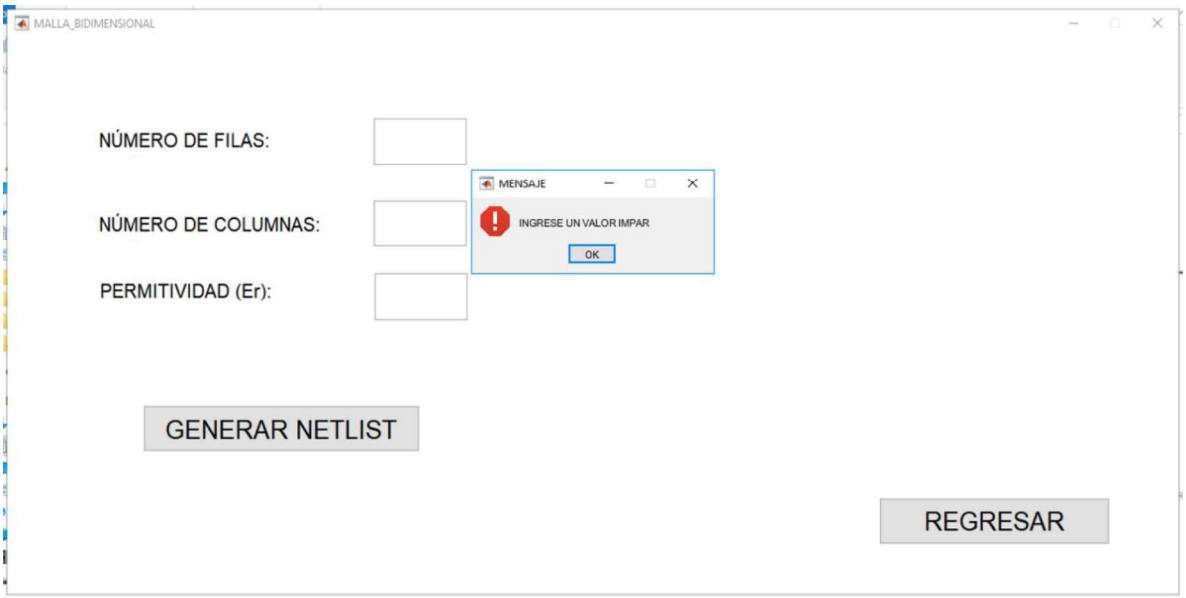

Figura 3.7. Mensaje de error al no escoger un valor impar de filas

En el caso que todos los valores ingresados sean los correctos se despliega la ventana final mostrada en la Figura 3.8, que indica los valores de inductancia, capacitancia y frecuencia de resonancia calculados, además de un bosquejo del circuito general que se generó usando los datos proporcionados.

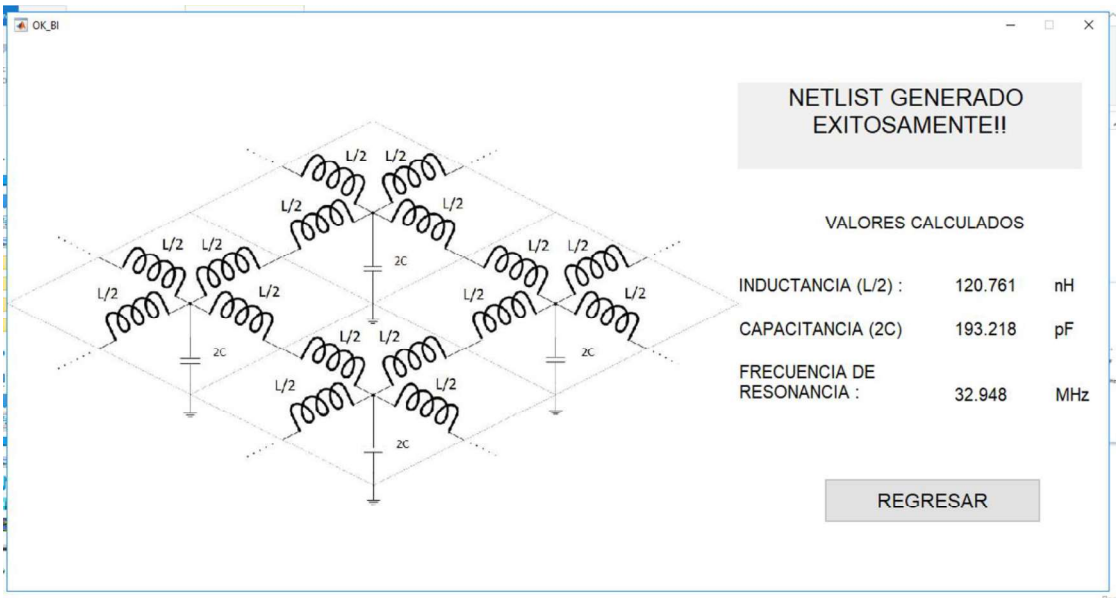

Figura 3.8. Ventana final de la interfaz

El archivo *Netlist* generado se guarda en la carpeta de MATLAB asignada por omisión con el nombre de *Netlist_Bidimensional.txt*, el mismo que se deberá cargar en el ADS tal como se indicó en la sección 2.1.7.

3.2 SIMULACIÓN DE ADS

Se comprobará el correcto funcionamiento de la interfaz gráfica de usuario para la generación del *Netlist*, tanto para mallas unidimensionales como para bidimensionales, y posteriormente se simulará en el ADS.

Se analizarán dos casos; primero se emularán dos medios dieléctricos, Teflón (PTFE) cuyo valor de permitividad es ε = 2,1 y alúmina, con un valor de permitividad de ε = 9,9 con un número bajo de celdas. Seguidamente, se aumentará el número de celdas a un valor mucho mayor para verificar que la relación permanece invariable.

En ambos casos se realiza una comparación entre sus fases obtenidas, teórica y de manera simulada.

3.2.1 SIMULACIÓN DE MALLA UNIDIMENSIONAL DE 9 CELDAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 2,1 (TEFLÓN)

Se ingresa los datos en la interfaz gráfica de usuario como se muestra en la Figura 3.9.

Figura 3.9. Ingreso de número de celdas y valor de permitividad del Teflón

Posterior al generar el *Netlist* se despliega los valores de inductancia y capacitancia calculados por la interfaz, tal como se observa en la Figura 3.10.

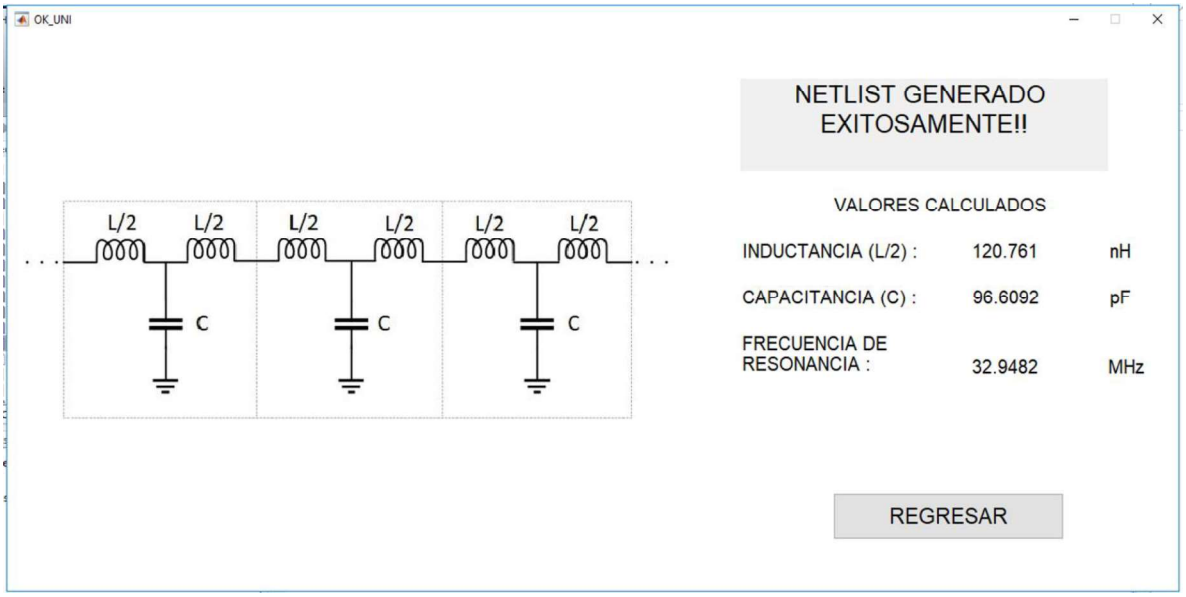

Figura 3.10. Valores de inductancia y capacitancia calculados para la malla unidimensional homogénea compuesta por Teflón

Con los respectivos valores de inductancia y capacitancia se calcula la frecuencia de resonancia, usando la Ecuación 1.4.

En la Ecuación 3.1, se muestra un ejemplo de cálculo de la frecuencia de resonancia.

$$f_{\mathrm{r}} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(241{,}522\ \mathrm{nH}).(96{,}6092\ \mathrm{pF})}} = 32{,}948\ \mathrm{MHz} \tag{3.1}$$

Con la frecuencia de resonancia obtenida, se escoge un valor de frecuencia de trabajo por debajo que no altere el correcto funcionamiento de la red. Para el presente análisis se escogió 10 MHz.

Seguidamente, se carga el archivo *Netlist* generado en el ADS tal como se explica en la Sección 2.1.7.

En la Figura 3.11 se muestra la configuración del control de simulación necesario según el requerimiento de frecuencia de trabajo.

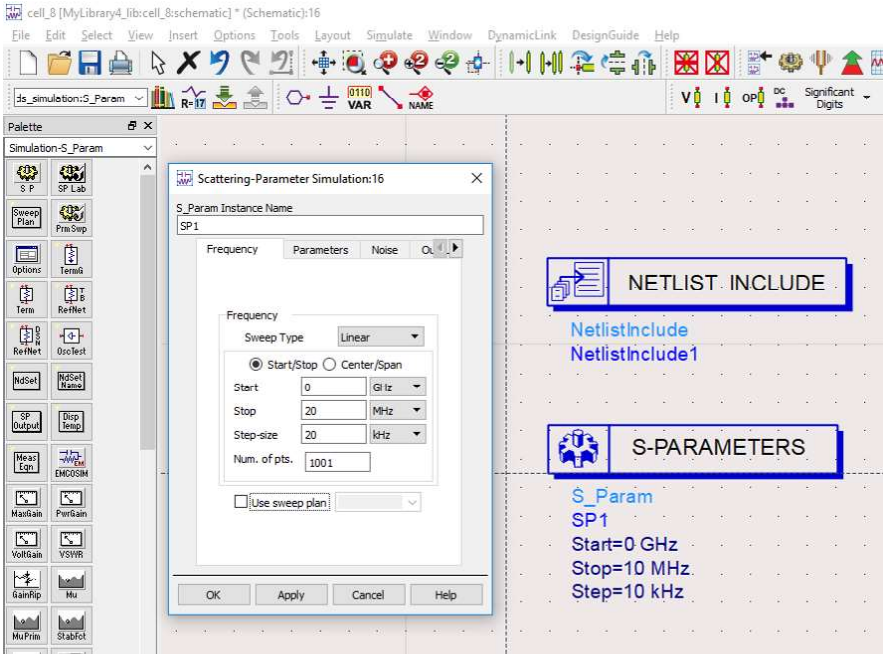

Figura 3.11. Control de simulación configurado de 0 MHz a 2 MHz

Se realiza la simulación de los parámetros *S* y se configura la gráfica para obtener la fase del parámetro $S_{2,1}$ tal como se explica en la Sección 2.1.6.

La gráfica resultante se puede observar en la Figura 3.12.

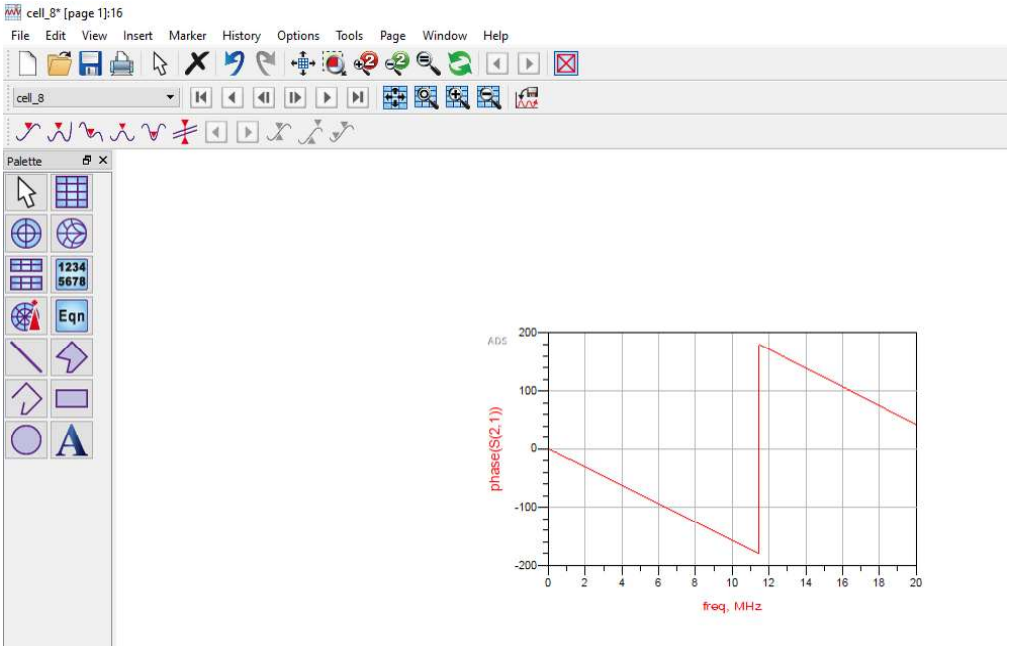

Figura 3.12. Interfaz de resultados mostrando gráfica de la fase del parámetro $S_{2,1}$ de la malla unidimensional homogénea emulando Teflón

Para visualizar los valores de fase en la frecuencia de trabajo seleccionada se hace uso de marcadores en ADS. La forma de acceder a ellos se explica en la Figura 3.13.

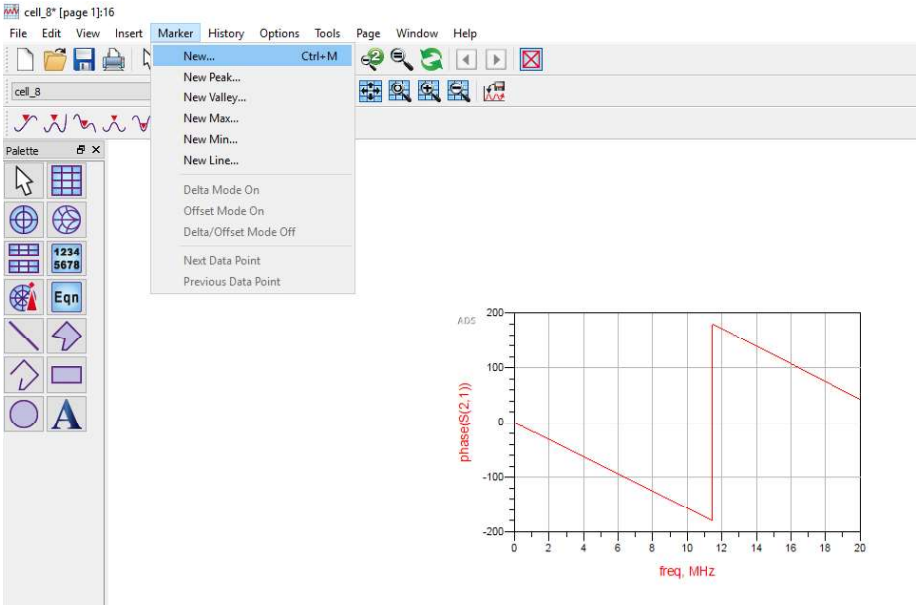

Figura 3.13. Marcador para valores de gráficas en ADS

Con lo cual obtenemos el valor de fase mostrado en la Figura 3.14.

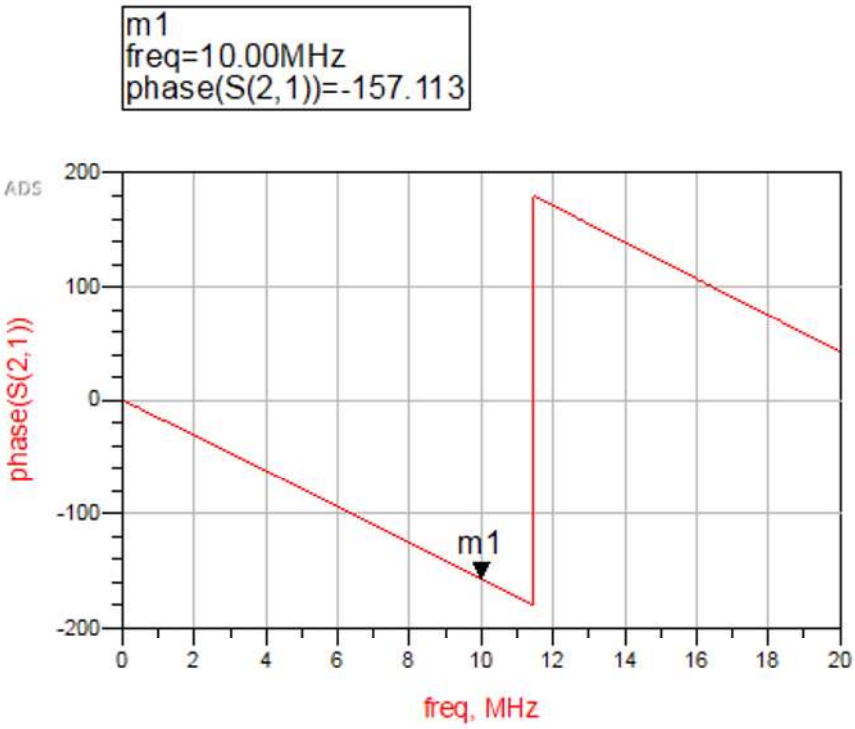

Figura 3.14. Valor de fase de la malla unidimensional de Teflón a la frecuencia de trabajo

3.2.2 SIMULACIÓN DE MALLA UNIDIMENSIONAL DE 9 CELDAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 9,9 (ALÚMINA)

Para realizar esta simulación, se procede de igual manera como se describe en la Sección 3.2.1 del presente proyecto, pero generando el *Netlist* como se muestra en la Figura 3.15.

Figura 3.15. Ingreso de número de celdas y valor de permitividad de la Alúmina

Se muestra los valores calculados de inductancia, capacitancia y frecuencia de resonancia en la Figura 3.16.

La frecuencia de resonancia calculada para este caso resulta 15,1748 MHz, por lo que se escoge una frecuencia de trabajo para el análisis de 10 MHz. Se obtiene como resultado la Figura 3.17.

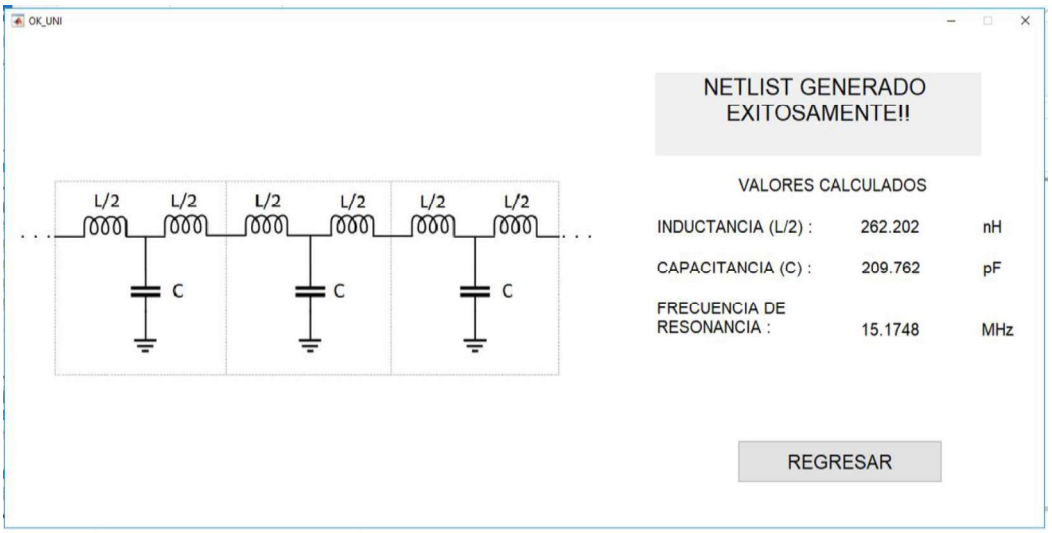

Figura 3.16. Valores de inductancia y capacitancia calculados para la malla unidimensional homogénea compuesta por alúmina

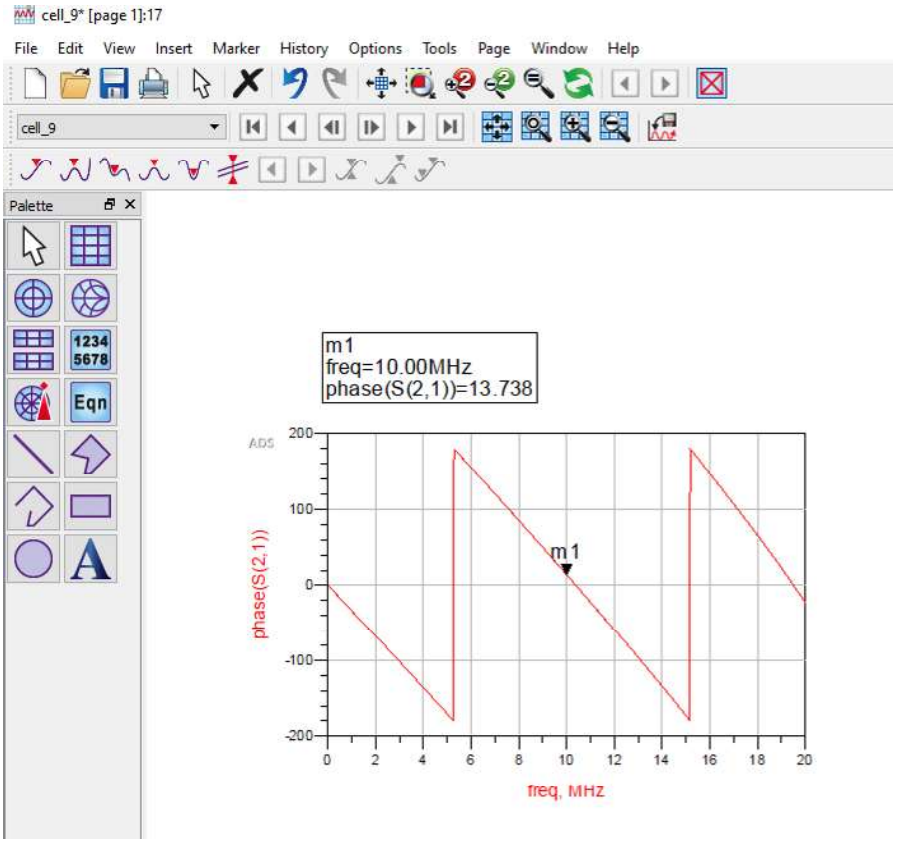

Figura 3.17. Interfaz de resultados mostrando gráfica de la fase del parámetro $S_{2,1}$ de la malla unidimensional homogénea emulando alúmina

Para obtener el valor real de la fase, teniendo en cuenta que ya ha pasado un ciclo desde el inicio, se crea una ecuación usando en comando *unwrap,* tal como se indica en la Figura 3.18, mismo que permite “desdoblar” la fase obtenida.

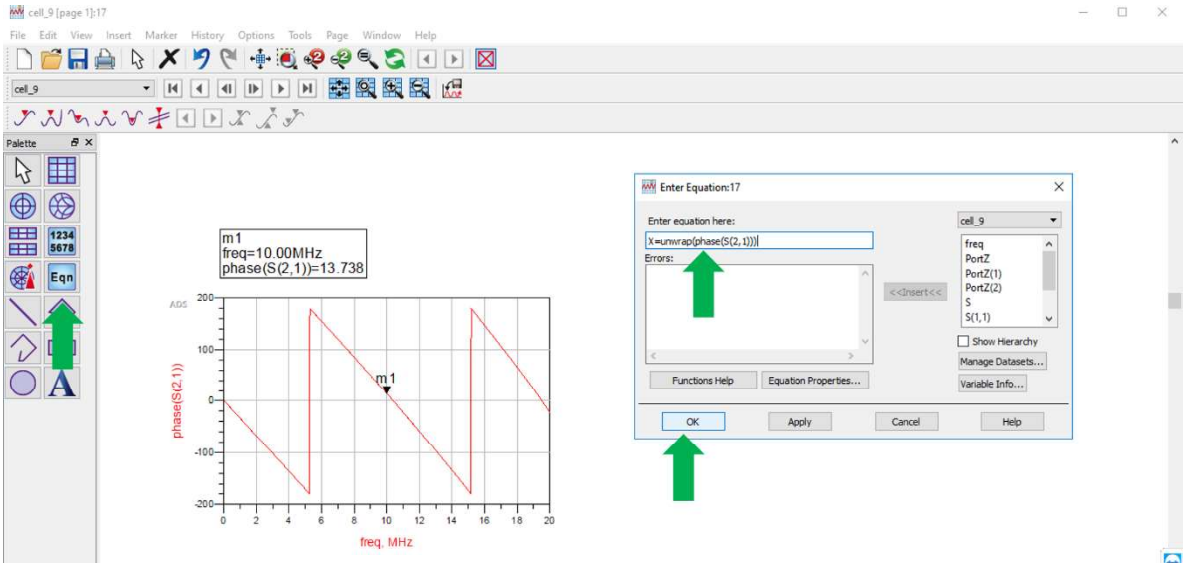

Figura 3.18. Creación de ecuación de “desdoblamiento” de fase usando el comando *unwrap*

El resultado de fase “desdoblada” se muestra usando un marcador en la Figura 3.19.

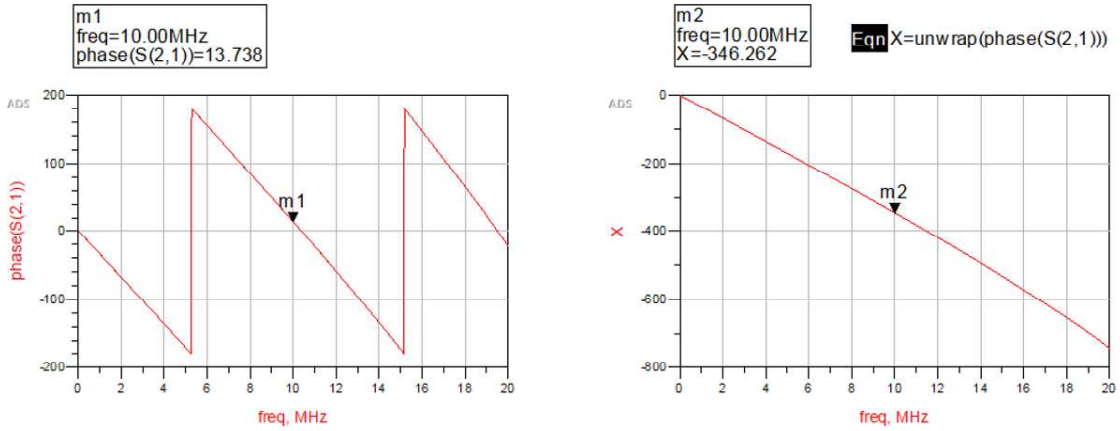

Figura 3.19. Gráfica en fase (desdoblada) del parámetro $S_{2,1}$ para Alúmina

La relación experimental de fases entre los dos dieléctricos, alúmina y Teflón se muestra en la Ecuación 3.2.

$$\Delta\varphi = \left|\frac{\varphi_{\text{Alúmina}}}{\varphi_{\text{Teflón}}}\right| = \left|\frac{-346{,}262°}{-157{,}113°}\right| = 2{,}2039 \tag{3.2}$$

3.2.3 COMPROBACIÓN TEÓRICA DE LA RELACIÓN DE FASES ENTRE MATERIALES

Con el fin de verificar el resultado obtenido en la simulación, en esta sección se realizará los cálculos teóricos que comprueben la relación de fases para ambos entornos (Teflón y alúmina).

En primer lugar, se calcula la longitud de onda en el vacío λ_0 para la frecuencia de trabajo de 10 MHz obteniéndose un valor de 30 m. Con esta información es posible calcular la longitud de onda en cada uno de los medios utilizando la Ecuación 3.3.

$$\lambda_{\text{Medio}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{3.3}$$

Así, $\lambda_{\text{Teflón}}$ = 20,7019 m y $\lambda_{\text{Alúmina}}$ = 9,535 m. Considerando para ambos medios una longitud física constante en la cual la onda se propaga, la relación entre las fases corresponde a la relación entre sus longitudes de onda en cada medio respectivamente.

La relación de fase teórica obtenida se presenta en la Ecuación 3.4.

$$\Delta\varphi \approx \frac{\lambda_{\text{Teflón}}}{\lambda_{\text{Alúmina}}} = \frac{20{,}7019\ \text{m}}{9{,}535\ \text{m}} = 2{,}1711 \tag{3.4}$$

Comparando el resultado con el obtenido en la Ecuación 3.2(3.2), se observa que la simulación presenta un error absoluto de 0,328 lo que representa un error relativo porcentual de 1,51%. Estos valores validan la implementación práctica de la malla unidimensional.

3.2.4 RELACIÓN DE FASES ENTRE MALLAS UNIDIMENSIONALES DE 100 CELDAS DE ALÚMINA Y TEFLÓN

Tal como se detalló en la Sección 3.2.1 y 3.2.2, se realiza la simulación para mallas unidimensionales de 100 celdas, obteniendo los siguientes resultados, para la frecuencia de trabajo de 1 MHz.

La gráfica de la fase del parámetro $S_{2,1}$ vs. frecuencia para una malla unidimensional de 100 celdas con valor de permitividad relativa de 2,1 se muestra en la Figura 3.20.

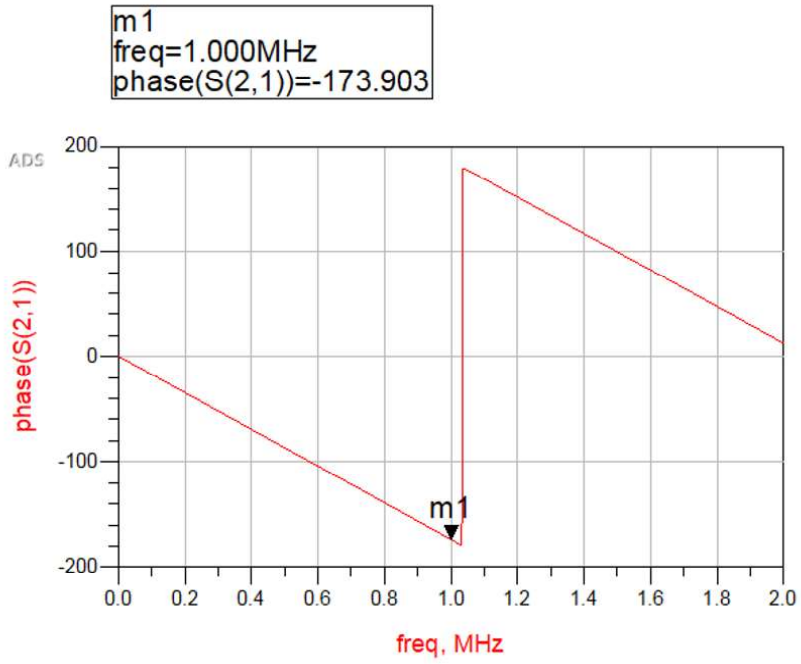

Figura 3.20. Gráfica de la fase del parámetro $S_{2,1}$ para Teflón en una malla unidimensional de 100 celdas

Por otro lado, la gráfica de la fase (desdoblada) vs. frecuencia para una malla unidimensional de 100 celdas con permitividad de 9,9 se muestra en la Figura 3.21.

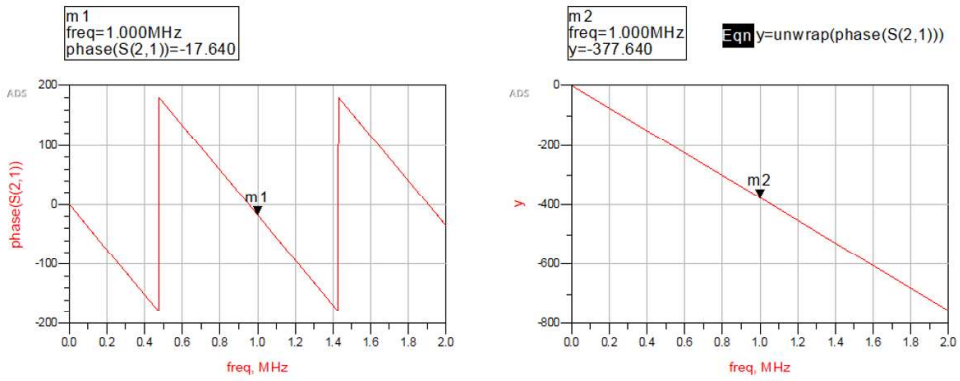

Figura 3.21. Gráfica de la fase (desdoblada) del parámetro $S_{2,1}$ para alúmina en una malla de 100 celdas

Con lo que, la relación experimental de fases entre los dos dieléctricos, alúmina y Teflón, para celdas de longitud 100 resulta Δ_φ = 2,1715. En este caso el error absoluto obtenido es de 0,0004 y el error relativo porcentual es de 0,018%.

Se puede concluir de este experimento que mientras más muestras (celdas) intervengan en la simulación, los resultados obtenidos son más apegados al valor teórico.

3.2.5 SIMULACIÓN DE MALLA BIDIMENSIONAL DE 9 FILAS Y 7 COLUMNAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 2,1 (TEFLÓN)

Para esta simulación se ingresa los datos en la interfaz gráfica de usuario como se muestra en la Figura 3.22.

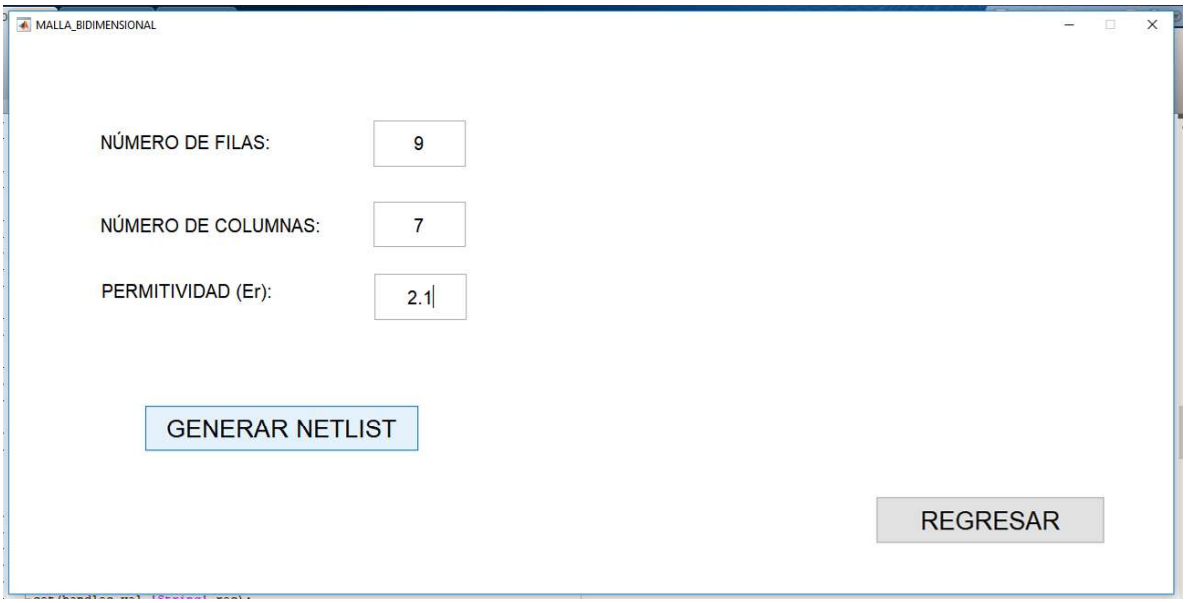

Figura 3.22. Ingreso de filas, columnas y permitividad del Teflón

Posterior al generar el *Netlist* se despliega los valores de inductancia capacitancia y frecuencia de resonancia calculados por la interfaz, tal como se observa en Figura 3.23.

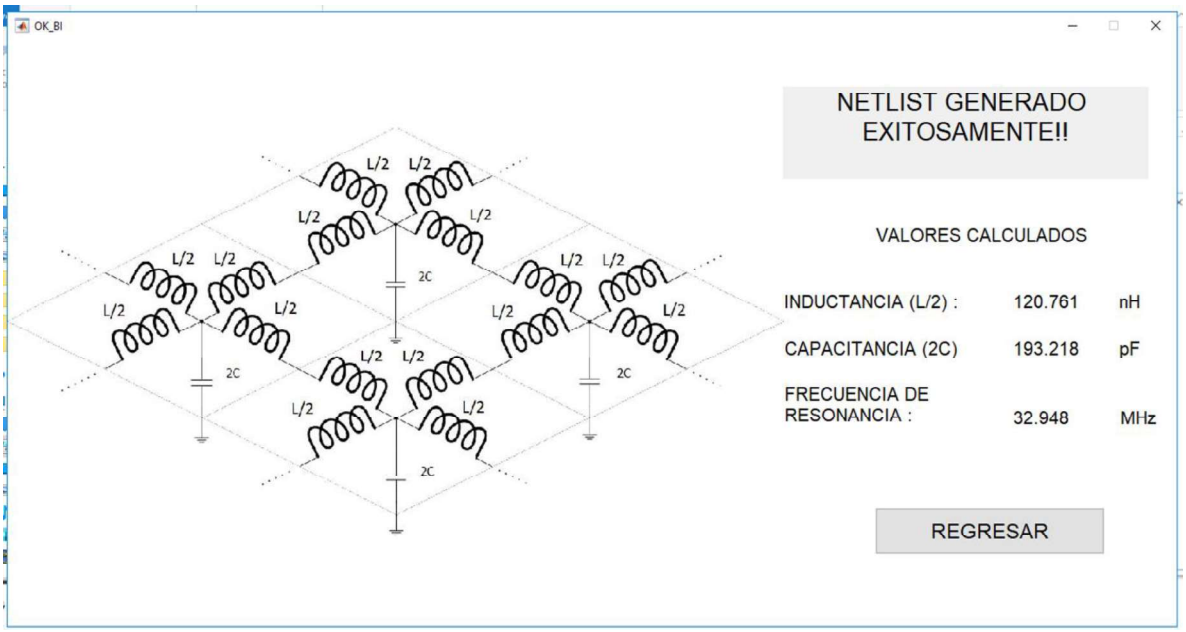

Figura 3.23. Valores de inductancia y capacitancia calculados para Teflón en celdas bidimensionales

Debido a que se utiliza los mismos materiales que en las mallas unidimensionales, y que la estructura simplemente presenta otra dimensión de propagación, la frecuencia de resonancia es igual a 32,948 MHz, por lo que se escoge una frecuencia de trabajo inferior para el análisis de 1 MHz.

Seguidamente se carga el archivo *Netlist* generado en el ADS tal como se explica en la Sección 2.1.7.

Se realiza la simulación de los parámetros *S* y se configura para obtener la gráfica en fase de los parámetros *S*(*,1), sin contar el *S*(1,1), es decir *S*(2,1), *S*(3,1), …, tal como se explica en la Sección 2.1.6 y se muestra en la Figura 3.24.

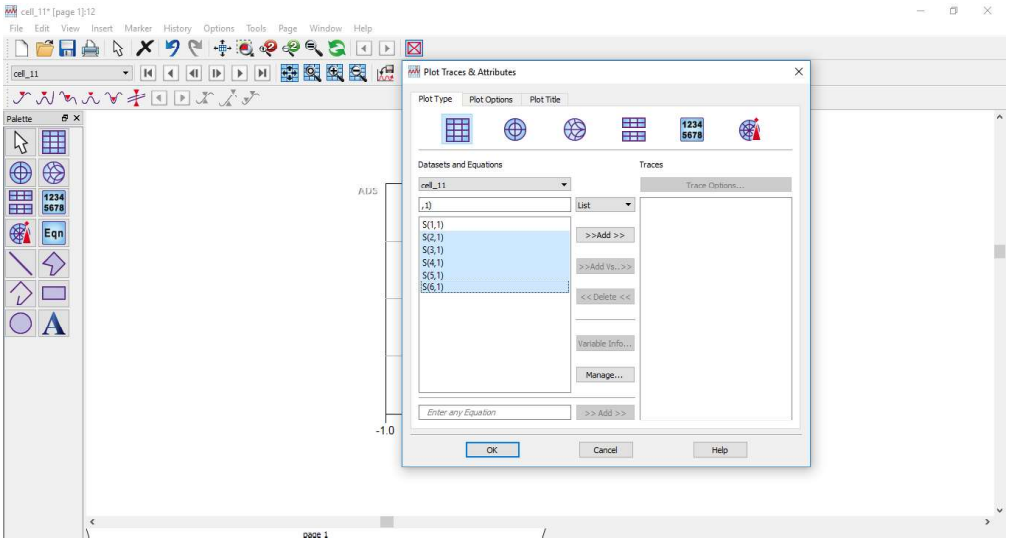

Figura 3.24. Selección de parámetros *S* para graficar en función de la frecuencia

Al realizar este procedimiento se obtiene la Figura 3.25, y mediante el uso de un marcador se despliega el valor de la fase de cada puerto de salida de la malla.

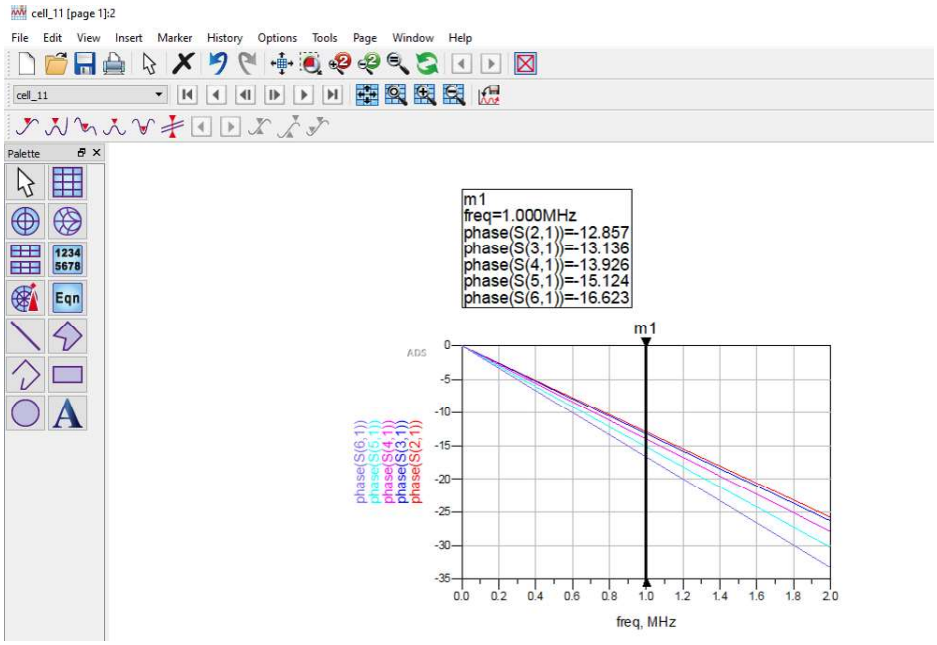

Figura 3.25. Gráfica de fases de puertos de salida para una malla bidimensional de Teflón

Al analizar las fases obtenidas, se observa la tendencia expuesta en la Ecuación 3.5.

$$\varphi_{(6,1)} > \varphi_{(5,1)} > \varphi_{(4,1)} > \varphi_{(3,1)} > \varphi_{(2,1)} \tag{3.5}$$

Para comprender de mejor manera esta tendencia, la Figura 3.26 esquematiza la distribución de puertos de la simulación.

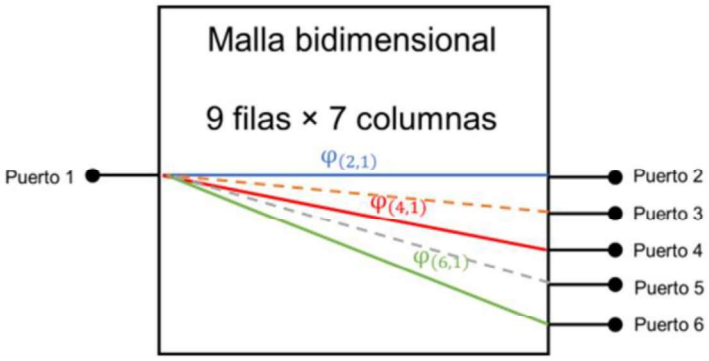

Figura 3.26. Esquema de distribución de puertos en la malla bidimensional

Se puede apreciar que la longitud eléctrica entre el puerto 2 y el 1, caracterizada por la fase del parámetro $S_{2,1}$, $\varphi_{2,1}$, es menor que la longitud eléctrica de los otros puertos subsiguientes. Entonces, el resultado obtenido de la simulación es concordante con lo esperado.

3.2.6 SIMULACIÓN DE MALLA BIDIMENSIONAL DE 9 FILAS Y 7 COLUMNAS CON PERMITIVIDAD RELATIVA DE 9,9 (ALÚMINA)

Para esta simulación se ingresa los datos en la interfaz gráfica de usuario como se muestra en la Figura 3.27.

Figura 3.27. Ingreso de filas, columnas y permitividad de alúmina

Posterior al generar el *Netlist* se despliega los valores de inductancia capacitancia y frecuencia de resonancia calculados por la interfaz, tal como se observa en la Figura 3.28.

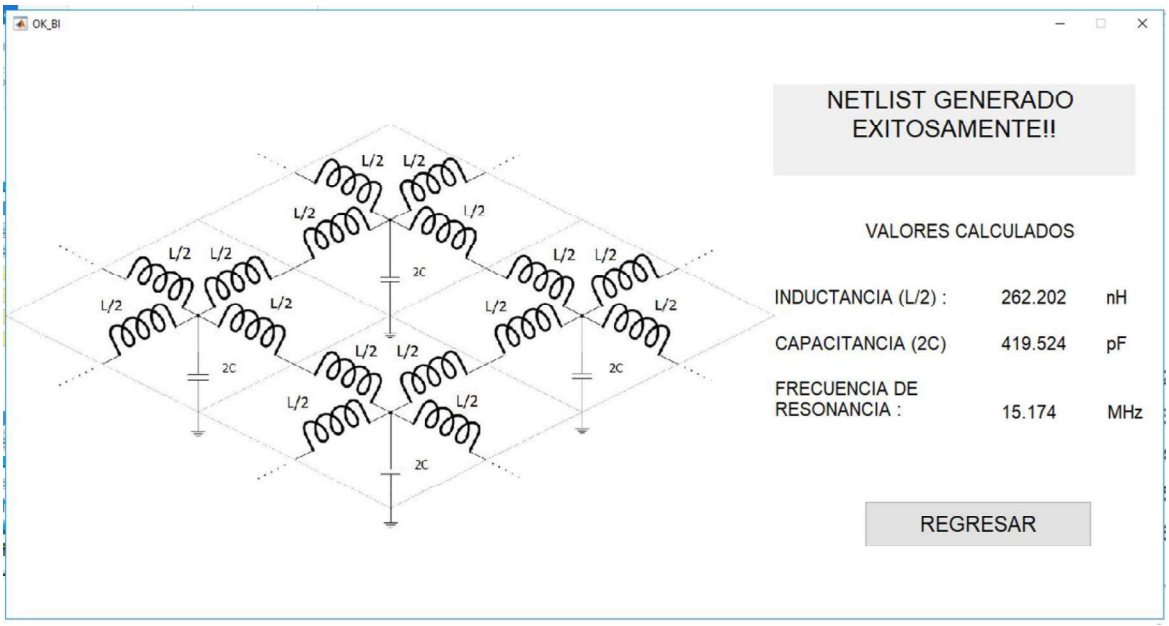

Figura 3.28. Valores de inductancia y capacitancia calculados para alúmina en celdas bidimensionales

La frecuencia de resonancia calculada para este caso resulta de 15,174 MHz, por lo que se escoge una frecuencia de trabajo inferior para el análisis de 1 MHz.

Seguidamente se carga el archivo *Netlist* generado en el ADS tal como se explica en la Sección 2.1.7.

Se realiza la simulación de los parámetros *S* y se configura para obtener la gráfica en fase de los parámetros *S*(*,1), sin contar el *S*(1,1), es decir *S*(2,1), *S*(3,1), …., tal como se explica en la Sección 2.1.6 y se muestra en la Figura 3.29. Con lo que se concluye lo expuesto en la Ecuación 3.5.

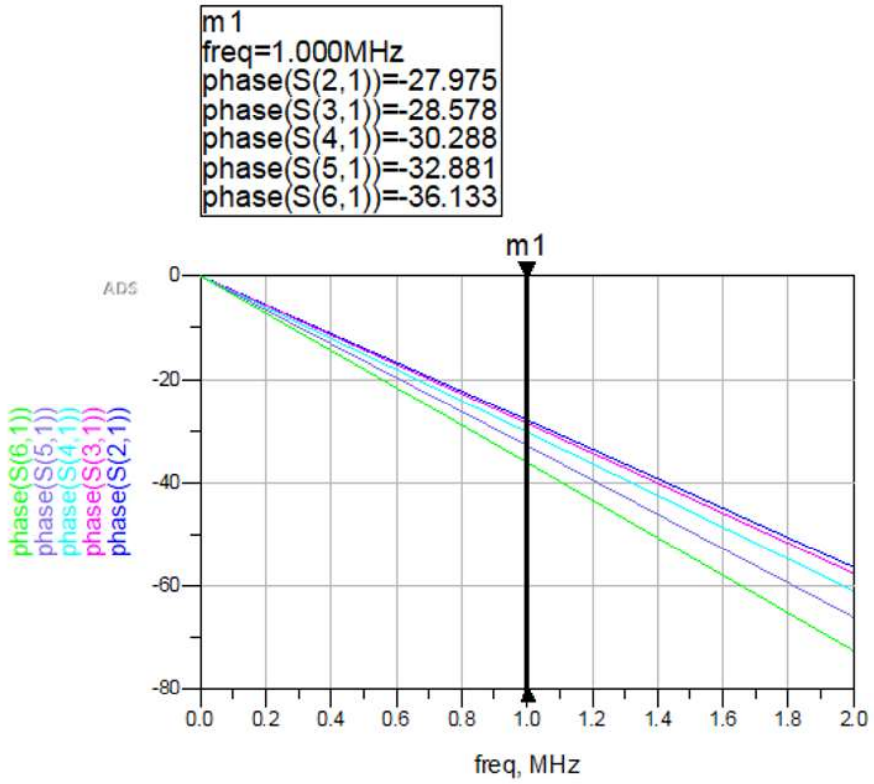

Figura 3.29. Gráfica de fases de puertos de salida para una malla bidimensional de Alúmina

3.3 APLICACIÓN RADIANTE CONVENCIONAL

Esta sección presenta el diseño de un lente dieléctrico a ser emulado por un arreglo bidimensional de celdas para verificar el efecto de colimación de ondas producido por este componente cuando es iluminado por una fuente radiante.

3.3.1 DISEÑO DE LENTE DE SUPERFICIE REFRACTIVA

La Figura 3.30 esquematiza la trayectoria de dos rayos arbitrarios, emitidos por la fuente radiante, mismos que se propagan en un lente que presenta una cara con superficie refractiva de determinada curvatura mientras que, la otra cara es planar [7].

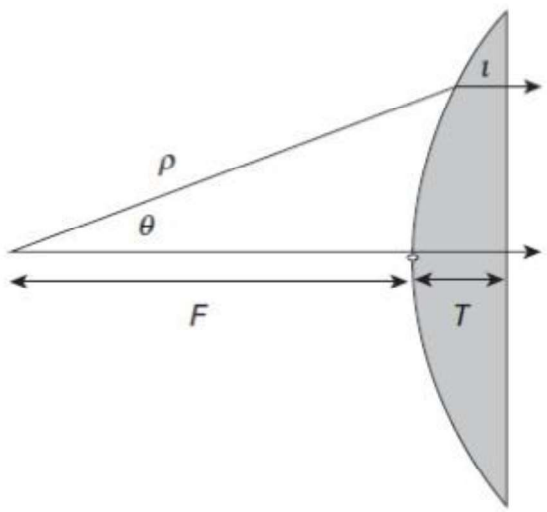

Figura 3.30. Lente de una superficie refractiva [7]

Para conseguir el efecto de colimación, los dos rayos deberían presentar la misma fase el momento de atravesar el lente, es decir, cuando éstos abandonen la cara planar del lente. Suponiendo que el lente dieléctrico de permitividad $\varepsilon_{r\ Lente}$ se encuentra inmerso en vacío ($\varepsilon_{r\ Vacío}$ =1) las longitudes eléctricas de los rayos serán iguales con lo que se obtiene:

$$F + nT = \rho + nl \tag{3.6}$$

en donde:

n: Coeficiente de refracción ($n = \sqrt{\varepsilon_{\mathrm{r\ lente}}}$)

La Ecuación 3.6 puede ser expresada en coordenadas polares [7]

$$r = \frac{(n-1)F}{n\cos\theta - 1} \tag{3.7}$$

Para modelar el lente en un arreglo bidimensional en Keysight® ADS es necesario determinar la cantidad de celdas a utilizarse. La Figura 3.31 muestra los parámetros a ser diseñados para la emulación del lente en cuestión.

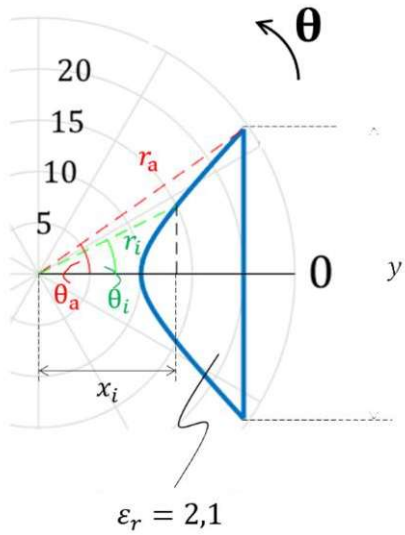

Figura 3.31. Diagrama del lente y parámetros de diseño.

Para el diseño, se asume un lente, embebido en vacío, realizado con Teflón (PTFE) cuyo valor de permitividad relativa es de $\varepsilon_r = 2{,}1$. La fuente radiante se sitúa a 10 celdas de la cara refractiva del lente y el espesor del lente corresponde de igual manera a 10 celdas, es decir, F=10 celdas y T=10 celdas, respectivamente.

La altura del lente es determinada al igualar el valor de r de la Ecuación 3.7 para θ_a y su respectiva relación trigonométrica con $F + T = 20$ celdas. Entonces,

$$\cos\theta_a = \frac{F+T}{r_a} = \frac{20}{r_a} \tag{3.8}$$

Igualando r_a de la Ecuación 3.8 con r_a de la Ecuación 3.7 (para θ_a) se obtiene

$$\frac{20}{\cos\theta_a} = \frac{10\left(\sqrt{2{,}1}-1\right)}{10\cos\theta_a - 1}$$
$$\theta_a = 35{,}25° \tag{3.9}$$

Con este valor calculado, y aplicando cálculo trigonométrico, se obtiene una altura del lente de $y = 28{,}2$ celdas. Entonces, se determina un dominio de emulación de celdas bidimensionales de dimensión 29 columnas × 20 filas. La Figura 3.32 muestra la estructura bidimensional cuya fila central (#15) presenta 10 celdas (de la columna #1 a la #10) con

permitividad $\varepsilon_r = 1$ (sin pintar) y 10 celdas (de la columna #11 a la #20) con permitividad $\varepsilon_r = 2{,}1$ (pintadas de color gris).

El algoritmo para la distribución simétrica de las demás filas está basado en un incremento $\Delta\theta$ del ángulo θ_a. En primer lugar, se determina el valor del incremento $\Delta\theta$ dividiendo el valor del ángulo θ_a para 14 (correspondiente al número de filas simétricamente dispuestas a ambos lados de la fila #15), entonces

$$\Delta\theta = \frac{35{,}25°}{14} = 2{,}52° \tag{3.10}$$

La distribución de celdas en la fila #14, ubicada a una distancia $i = 1$ de la fila #15, es calculada usando el ángulo θ_1 dado por la expresión

$$\theta_i = i\Delta\theta$$

$$\theta_1 = 1 \times 2{,}52° = 2{,}52° \tag{3.11}$$

la distancia entre la fuente radiante y el punto de curvatura r_1 a θ_1

$$r_i = \frac{(n-1)F}{n\cos\theta_i - 1}$$

$$r_1 = \frac{10\ [\text{celdas}] \times \left(\sqrt{2{,}1} - 1\right)}{\sqrt{2{,}1} \times \cos(2{,}52°) - 1} = 10{,}03\ \text{celdas} \tag{3.12}$$

y la respectiva proyección x_1 de la longitud r_1

$$x_i = r_i \cos\theta_i$$

$$x_1 = 10{,}03\ [\text{celdas}] \times \cos(2{,}52°) = 10{,}02\ [\text{celdas}] \tag{3.13}$$

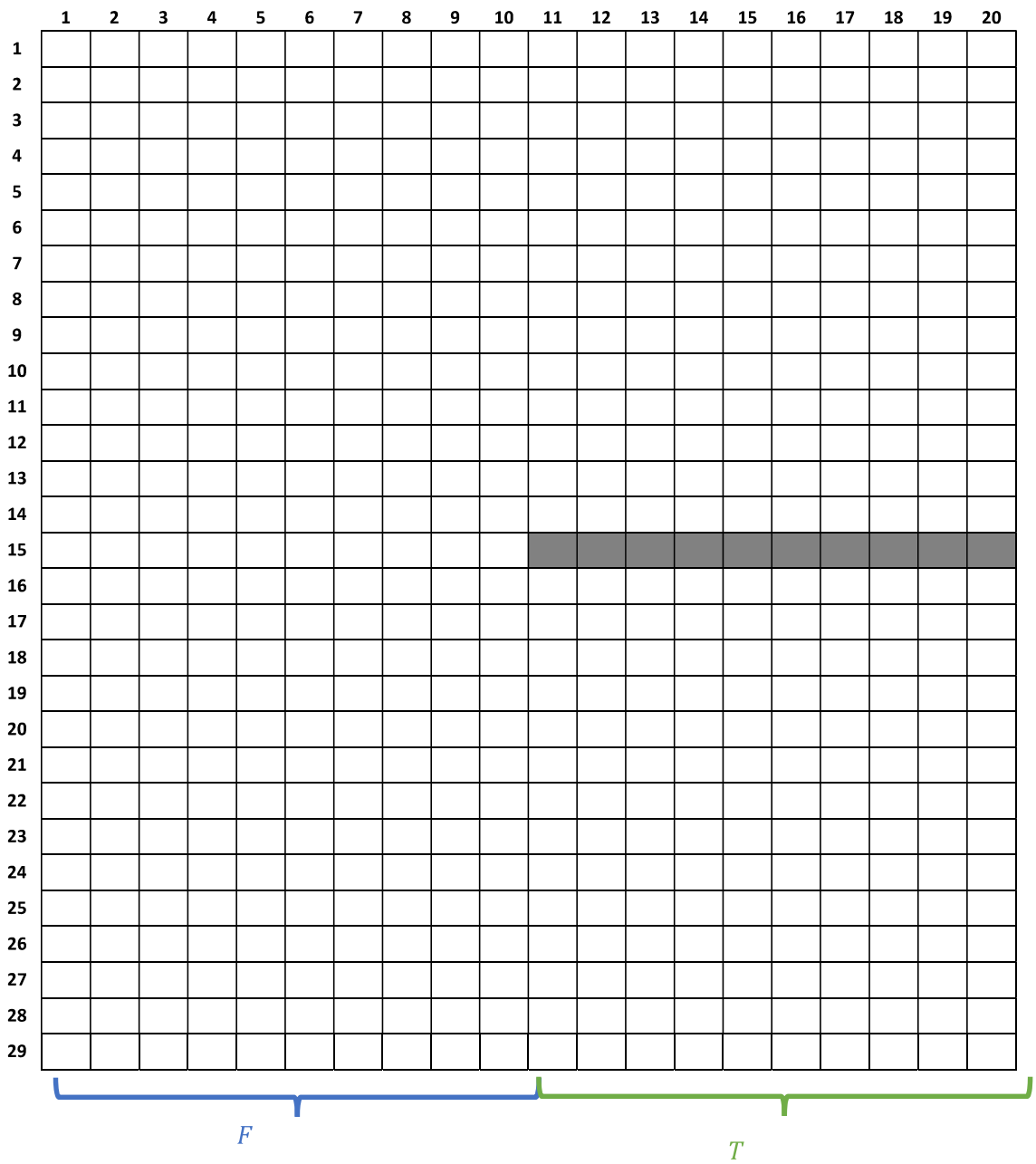

Figura 3.32. Estructura bidimensional inicial con celdas de fila central marcadas para inicio de iteración

Entonces, la cantidad de celdas asignadas con permitividad correspondiente al Teflón en la fila #14 será

$$\#celdas_{(15-i)} = (F + T) - x_i$$

$$\#celdas_{14} = (10 + 10)\ [\text{celdas}] - 10{,}02\ [\text{celdas}] = 9{,}98\ [\text{celdas}] \tag{3.14}$$

El valor obtenido es redondeado a cero cifras decimales utilizando método estándar de redondeo. Por consiguiente, la fila #14 y su respectiva simétrica, fila #16, presentan 10 celdas con permitividad ε_r = 2,1. Para la determinación de celdas con permitividad ε_r = 2,1 en las demás filas y sus respectivas simétricas de la estructura (#13 → #1 y #16 → #29) se realiza el procedimiento aquí descrito para para i=1 respectivamente cuando *i* = 2…14. La Figura 3.33 muestra la estructura bidimensional completa a implementar en Keysigth® ADS.

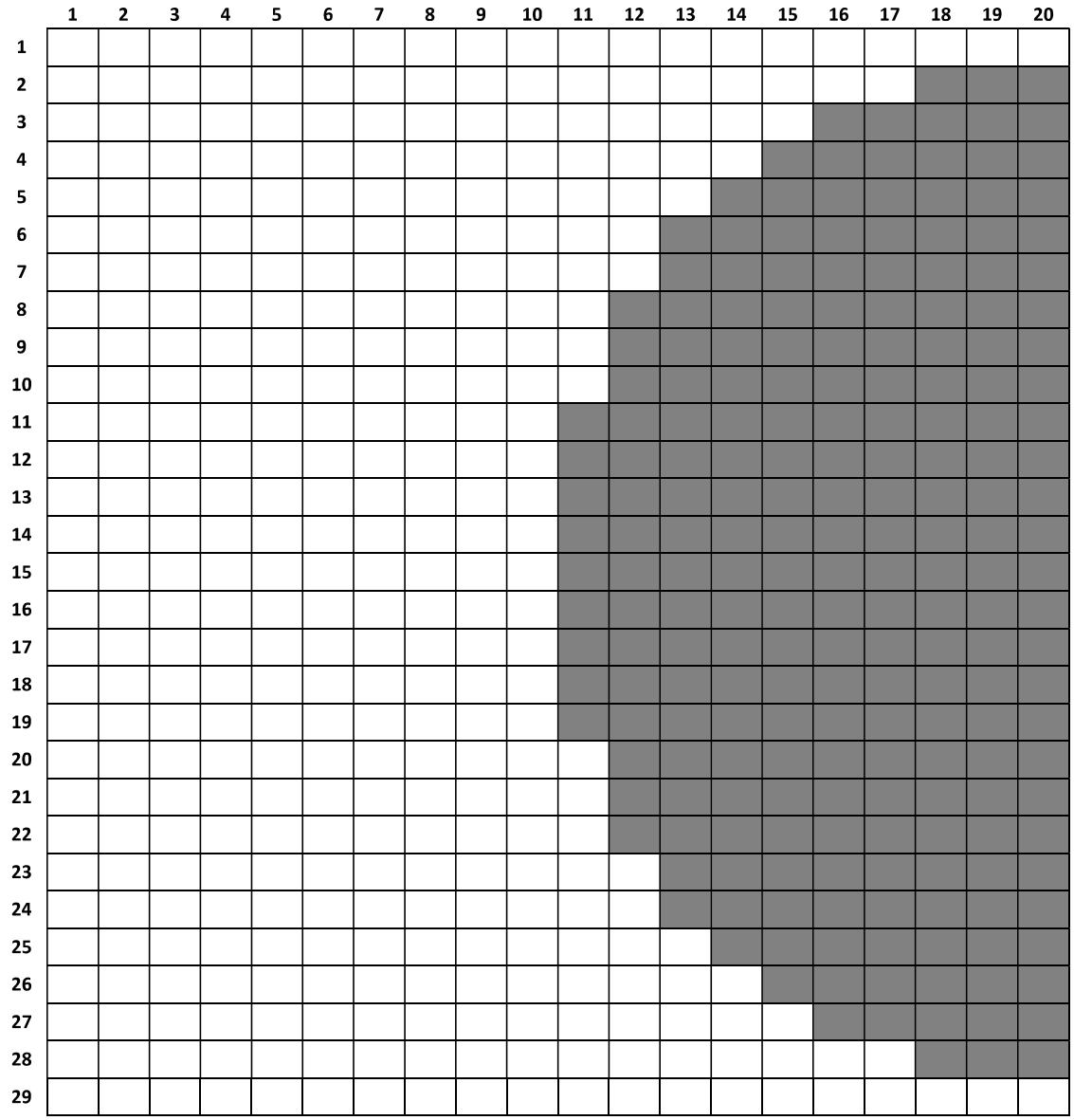

Figura 3.33. Estructura bidimensional completa. Cuadros marcados en gris destacan la forma del lente a implementar.

3.3.2 RESULTADO DE SIMULACIÓN DEL LENTE DISEÑADO

Una vez generado el archivo *Netlist* la simulación realizada en ADS entrega el resultado mostrado en la Figura 3.34.

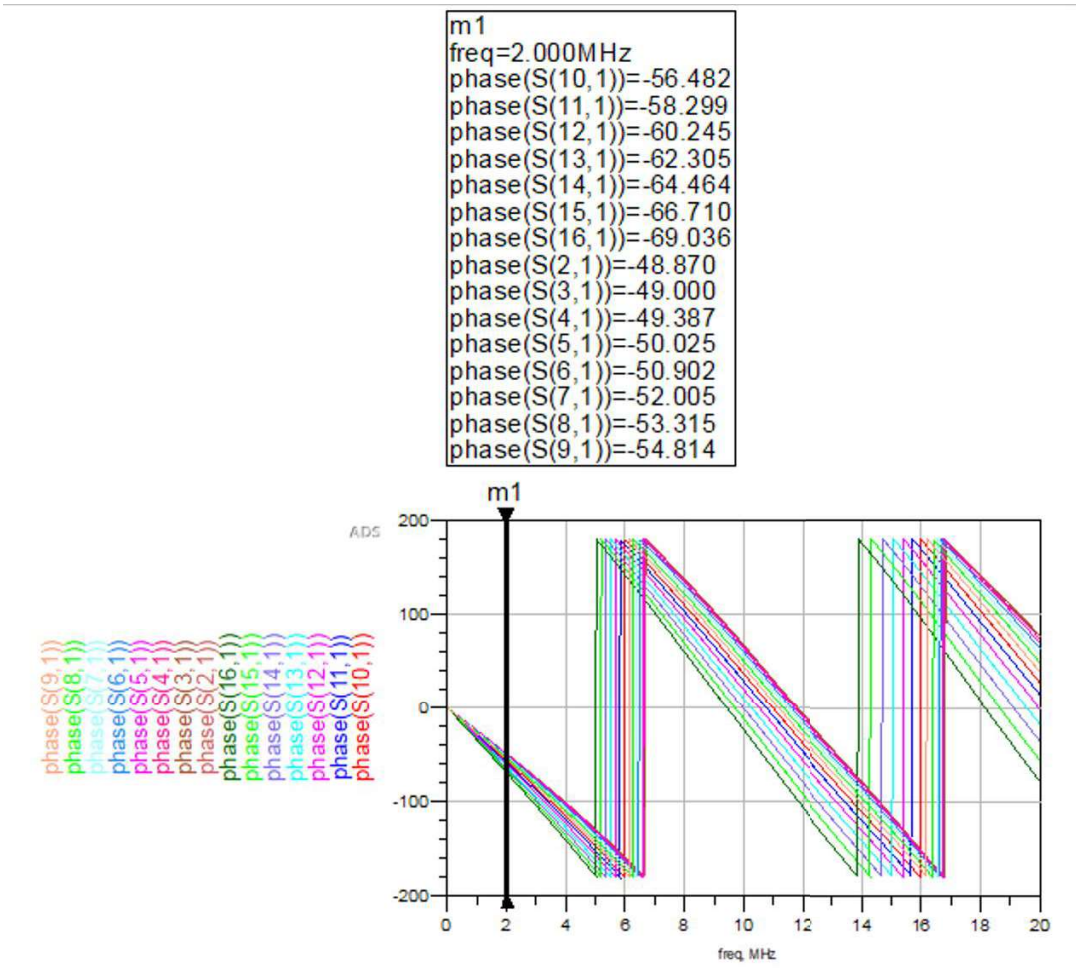

Figura 3.34. Resultado obtenido al simular el lente de superficie refractiva

Para corroborar el efecto colimante de esta estructura se realizó una simulación de una estructura homogénea de iguales dimensiones (29 × 20) emulando Teflón. La Figura 3.35 muestra un diagrama comparativo en donde se aprecia el efecto colimante del lente al disminuir la diferencia de fase de cada fila con respecto a la fila central.

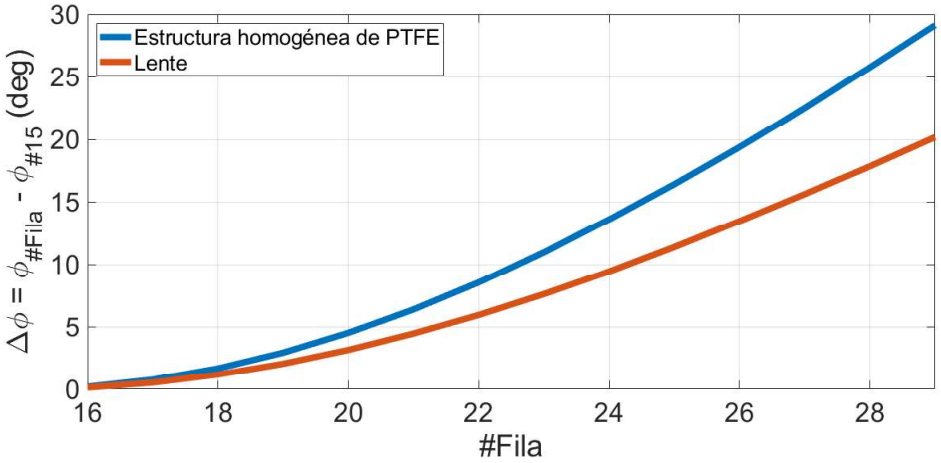

Figura 3.35. Variación de fase con respecto a la fila central de las demás filas en dos estructuras: lente de superficie refractiva y material homogéneo

En una aplicación real, la diferencia de fase sería de cero, sin embargo, en la estructura simulada existe un máximo de alrededor de 20° de diferencia entre la fila 29 y la 15. Esto se debe a que las celdas solo proporcionan dos caminos de propagación: uno horizontal y otro vertical y, la propagación de este tipo de aplicaciones ocurre en forma radial (desde el punto de vista planar).

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha realizado la co-simulación entre MATLAB y Keysight® ADS para la generación de estructuras planares que caractericen determinada propiedad dieléctrica.

Se ha estudiado la estructura de un archivo *Netlist* para la generación de subcircuitos en Keysight® ADS interconectados entre sí para la conformación de mallas unidimensionales y bidimensionales de dimensiones arbitrarias.

Con la ayuda de MATLAB se facilitó la interacción con el usuario para el dimensionamiento de los elementos concentrados, parte de los subcircuitos, para la conformación de materiales dieléctricos emulados con redes *LC*.

Una vez diseñada la metodología para la creación de mallas, se simuló estructuras unidimensionales y bidimensionales que emulan diferentes materiales dieléctricos. Así mismo, se comprobó teóricamente la correcta implementación de las mallas obteniéndose resultados con un error relativo porcentual menor al 2%.

Para la correcta interpretación de resultados, los elementos discretos calculados por la interfaz GUI fueron analizados en términos de frecuencia de resonancia. Es así entonces que, se optó por analizar los resultados en frecuencias de trabajo por debajo de la frecuencia de resonancia calculada para evitar interpretaciones erróneas de lo obtenido.

Uno de los aspectos más relevantes del presente proyecto es la realización de un lente de superficie refractiva con las estructuras emuladas. Se comprobó el efecto colimante de este lente con respecto a un bloque de material homogéneo. Adicionalmente se comprobó la limitación de este tipo de estructuras en el efecto colimador al poseer éstas únicamente dos caminos de propagación.

4.2 RECOMENDACIONES

- Si bien la generación de los archivos *Netlist* fue automatizada por medio de una interfaz gráfica, se debería realizar un estudio para la comunicación directa entre MATLAB y Keysight® ADS para el control pleno de la simulación.
- Ya que la interpretación del archivo *Netlist* no es muy clara en una primera aproximación al carecer de una presentación gráfica, se recomienda investigar la traducción del código de texto presente en el archivo *Netlist* a una representación gráfica más entendible.
- Para obtener resultados más apegados a la realidad, las mallas bidimensionales deberían ser implementadas con más caminos de propagación.
- En futuras implementaciones se debería considerar no únicamente una línea de transmisión sin pérdidas, es decir, las celdas deberías contener elementos resistivos. Esto ayudaría no solo un análisis basado en la fase sino también en términos de eficiencia.
- Por último, se recomienda la construcción de un prototipo antena lente basado en una malla bidimensional como las analizadas en el presente trabajo.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications*. John Wiley & Sons, 2005.

[2] J. F. White, *High frequency techniques*. Wiley Online Library, 2003.

[3] D. M. Pozar, *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.

[4] G. Kron, "Equivalent circuits to represent the electromagnetic field equations," *Physical Review*, vol. 64, no. 3–4, p. 126, 1943.

[5] V. Veselago, "Electrodynamics of substances with simultaneously negative and," *Usp. Fiz. Nauk*, vol. 92, p. 517, 1967.

[6] R. K. Luneburg and M. Herzberger, *Mathematical theory of optics*. Univ of California Press, 1964.

[7] J. Thornton and K.-C. Huang, *Modern lens antennas for communications engineering*, vol. 39. John Wiley & Sons, 2013.

[8] C. Hua, X. Wu, N. Yang, and W. Wu, "Air-filled parallel-plate cylindrical modified Luneberg lens antenna for multiple-beam scanning at millimeter-wave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 1, pp. 436–443, 2012.

[9] H. Merlet, P. Le Bars, O. Lafond, and M. Himdi, "Manufacturing method of a dielectric material and its applications to millimeter-waves beam forming antenna systems." 2011.

[10] H.-V. Barba-Molina, "Shared-aperture Adaptive Microwave and Millimeter Wave Antennas," Universität Stuttgart, 2018.

[11] P. Alitalo, S. Maslovski, and S. Tretyakov, "Three-dimensional isotropic perfect lens based on LC-loaded transmission lines," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, no. 6, p. 064912, 2006.

[12] P. Alitalo, F. Bongard, J. Mosig, and S. Tretyakov, "Transmission-line lens antenna with embedded source," in *2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation*, 2009, pp. 625–629.

[13] P. Alitalo, F. Bongard, J.-F. Zürcher, J. Mosig, and S. Tretyakov, "Experimental verification of broadband cloaking using a volumetric cloak composed of periodically stacked cylindrical transmission-line networks," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 1, p. 014103, 2009.

[14] Keysight-Technologies, "Advanced Design System (ADS)," Keysight Technologies, Jul. 2014.

ANEXOS

ANEXO A. Código para generar el archivo *Netlist* para mallas unidimensionales

ANEXO B. Código para generar el archivo *Netlist* para mallas bidimensionales

ANEXO A

Código para generar el archivo *Netlist* para mallas unidimensionales.

```
clc
close all

global num_celdas_uni %VARIABLE GLOBAL DE NÚMERO DE CELDAS INGRESADA POR
EL USUARIO
global permitividad_uni %VARIABLE GLOBAL DE PERMITIVIDAD INGRESADA POR EL
USUARIO
global inductor_uni %VARIABLE GLOBAL DE VALOR DE INDUCTANCIA CALCULADA
global capacitor_uni %VARIABLE GLOBAL DE VALOR DE CAPACITANCIA CALCULADA

%VARIABLES LOCALES
a=num_celdas_uni; %VARIABLE LOCAL DE NÚMERO DE CELDAS
Er=permitividad_uni; %VARIABLE LOCAL DE PERMITIVIDAD
L=inductor_uni;  %VARIABLE LOCAL DE VALOR DE INDUCTANCIA
C=capacitor_uni; %VARIABLE LOCAL DE VALOR DE CAPACITANCIA

%CREACION DE NETLIST

%CREACIÓN DE UN ARCHIVO .TXT DONDE SE GUARDARÁ EL NETLIST GENERADO
fid=fopen('NETLIST_UNIDIMENSIONAL.txt','w');

%ENCABEZADO DE NETLIST
fprintf(fid,'; Top Design: "MALLA_UNIDIMENSIONAL_lib:MU:schematic" \n');
fprintf(fid,'; Netlisted using Hierarchy Policy: "Standard" \n');
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'Options ResourceUsage=yes UseNutmegFormat=no EnableOptim=no
TopDesignName="MALLA_UNIDIMENSIONAL_lib:MU:schematic"
DcopOutputNodeVoltages=yes DcopOutputPinCurrents=yes
DcopOutputAllSweepPoints=no DcopOutputDcopType=0 \n');
fprintf(fid,'; Library Name: MALLA_UNIDIMENSIONAL_lib \n');
fprintf(fid,'; Cell Name: SUB_UNI \n');
fprintf(fid,'; View Name: schematic \n');

%CREACIÓN DE UNA SUBRED UNIDIMENSIONAL
fprintf(fid,'define SUB_UNI ( _node1  _node3 ) \n');
fprintf(fid,'parameters  l1=%d  l2=%d  c1=%d  \n',L,L,C);
fprintf(fid,'L:l1  _node1 _node2 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'L:l2  _node2 _node3 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'C:c1  _node2 0 C=%d \n',C);
fprintf(fid,'end SUB_UNI \n');
fprintf(fid,'\n');

%MALLA DE SUBREDES UNIDIMENSIONALES
b=10;
for i=1:a
    n=b;
    m=n+1;
    fprintf(fid,'SUB_UNI:xmalla%d %d %d _M=1 l1=%d l2=%d c1=%d
\n',i,n,m,L,L,C);
    b=m;
```

```
end

%PUERTOS DE ENTRADA Y SALIDA
d=10;
num=1;
for j=1:a-1:a
    fprintf(fid,'Port:TermG%d  %d 0 Num=%d Z=50 Ohm
Noise=yes\n',j,d,num);
    num=num+1;
    d=b;
end
```

ANEXO B

Código para generar el archivo *Netlist* para mallas bidimensionales.

```
clc
close all

global num_columnas
global num_filas
global capacitor_bi
global permitividad_bi
global inductor_bi

%INGRESO DE DIMENSIONES DE LA MALLA
N=num_columnas;
M=num_filas;

%TOTAL DE SUBCIRCUITOS DE LA MALLA
T=N*M;

%CALCULO DE VARIABLES PARA AJUSTAR EL TAMAÑO DE LA MATRIZ
X=N+3;
Y=M+3;

%VALORES DE FILAS Y COLUMNAS DE LA MATRIZ
C=(2*N)+3;
F=(2*M)+3;

%CALCULO DE L Y C
Er_bi=permitividad_bi;
CC=capacitor_bi;
L=inductor_bi;

% %GENERACION DE LA MATRIZ
A=zeros(F,C);
k=1; %Constante
for ii=2:C-1
    for jj=2:F-1
        A(jj,ii)=k;
        k=k+1;
    end
end

%GENERACION DE NETLIST
fid=fopen('NETLIST_BIDIMENSIONAL.txt','w');

fprintf(fid,'; Top Design: "MALLA_BIDIMENSIONAL_lib:MB:schematic" \n');
fprintf(fid,'; Netlisted using Hierarchy Policy: "Standard" \n');
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid,'Options ResourceUsage=yes UseNutmegFormat=no EnableOptim=no
TopDesignName="MALLA_BIDIMENSIONAL_lib:MB:schematic"
DcopOutputNodeVoltages=yes DcopOutputPinCurrents=yes
DcopOutputAllSweepPoints=no DcopOutputDcopType=0 \n');
fprintf(fid,'; Library Name: MALLA_BIDIMENSIONAL_lib\n');
```

```
fprintf(fid,'; Cell Name: SUB_BI \n');
fprintf(fid,'; View Name: schematic \n');
fprintf(fid,'define SUB_BI ( _node1  _node2  _node3  _node4 ) \n');
fprintf(fid,'parameters  l1=%d  l2=%d  l3=%d  l4=%d  c1=%d
\n',L,L,L,L,CC);
fprintf(fid,'L:l1  _node1 _node5 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'L:l2  _node5 _node2 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'L:l3  _node3 _node5 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'L:l4  _node4 _node5 L=%d Noise=yes \n',L);
fprintf(fid,'C:c1  _node5 0 C=%d \n',CC);
fprintf(fid,'end SUB_BI \n');
fprintf(fid,'\n');

kk=1;
ll=1;
veces=1;
while veces<=T

       for y=3:2:F-2 %filas
            for z=2:2:C-3 %columnas
                fprintf(fid,'SUB_BI:"XMALLA%d-%d" %d %d %d %d L1=%d L2=%d
L3=%d L4=%d C1=%d \n',ll,kk,A(y,z),A(y,z+2),A(y+1,z+1),A(y-
1,z+1),L,L,L,L,CC);
                kk=kk+1;
                veces=veces+1;
            end
            kk=1;
            ll=ll+1;
        end
end

%CONEXION DE RESISTENCIAS A TIERRA

Num=1;
mitad=0;
 for y=3:2:F-2 %filas
     for z=2:C-3:C-1 %columnas
         if y==(F+1)/2 && z==2 %fila de la mitad sin resistencia
            % Fuente
            fprintf(fid,'Port:TermG%d%d %d 0 Num=%d Z=50 Ohm Noise=yes
\n',y,z,A(y,z),Num);
            Num=Num+1;
         else if y==((F+1)/2) && z==C-1 %fila de puertos de salida
            fprintf(fid,'Port:TermG%d%d %d 0 Num=%d Z=50 Ohm Noise=yes
\n',y,z,A(y,z),Num);
            Num=Num+1;
            mitad=1;
             else if mitad==1
                    fprintf(fid,'R:R%d%d %d 0 R=50 Ohm Noise=yes
\n',y,z,A(y,z));
                    z=C-1;
                    fprintf(fid,'Port:TermG%d%d %d 0 Num=%d Z=50 Ohm
Noise=yes \n',y,z,A(y,z),Num);
                    Num=Num+1;
                    break;
                 else
```

```
                    fprintf(fid,'R:R%d%d %d 0 R=50 Ohm Noise=yes
\n',y,z,A(y,z));
                end
            end
        end
    end
end

%RESISTENCIAS PRIMERA Y ULTIMA FILA
for a=2:F-3:F-1 %filas
    for b=3:2:C-2 %columnas
        fprintf(fid,'R:R%d%d %d 0 R=50 Ohm Noise=yes \n',a,b,A(a,b));
    end
end
```

ORDEN DE EMPASTADO