



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

— **TELECOM** ESCUELA  
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR  
DE INGENIERÍA DE  
TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Telecomunicación

Desarrollo de una herramienta software para la selección  
de substratos adecuados en el diseño de circuitos  
microstrip y stripline a frecuencias de microondas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de  
Telecomunicación

AUTOR/A: Sancho Sanz, Gonzalo

Tutor/a: Baquero Escudero, Mariano

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## Resumen

Este TFG consta de la creación de una herramienta práctica y eficaz que oriente a cualquier persona interesada sobre que sustrato es conveniente o no para sus necesidades. Este software busca llenar ese vacío proporcionando una solución directa y útil además de probar su funcionalidad en casos reales. El objetivo del TFG es investigar las condiciones necesarias para que un sustrato funcione adecuadamente en un circuito específico, garantizando las características deseadas como la impedancia máxima y mínima a una frecuencia de trabajo deseada. El software se desarrollará utilizando Matlab y su herramienta App Designer, permitiendo que el usuario introduzca sus requisitos y este le simplifique la decisión acerca de que sustrato es el adecuado, además de incluir modelos de los fabricantes más importantes, mejorando la practicidad del programa. El resultado final será un software con una interfaz gráfica amigable y fácil de usar que guiará al usuario en la selección del sustrato más adecuado para su diseño. Este proyecto no solo tiene relevancia académica, ya que al ser tan sencillo se puede usar para la enseñanza en el campo de los circuitos planares, sino que también ofrece una herramienta práctica de gran utilidad para el campo de diseño de circuitos.

## Abstract

This TFG consists of the creation of a practical and effective tool to guide any interested person on what substrate is suitable or not for their needs. This software aims to fill this gap by providing a direct and useful solution and testing its functionality in real cases. The objective of the TFG is to investigate the necessary conditions for a substrate to work properly in a specific circuit, guaranteeing the desired characteristics such as maximum and minimum impedance at a desired working frequency. The software will be developed using Matlab and its App Designer tool, allowing the user to enter his requirements and it will simplify the decision about which substrate is the right one, besides including models of the most important manufacturers, improving the practicality of the program. The final result will be a software with a friendly and easy to use graphical interface that will guide the user in the selection of the most suitable substrate for his design. This project is not only of academic relevance, since it is so simple that it can be used for teaching in the field of planar circuits, but it also offers a practical tool of great utility for the field of circuit design.

## Resum

Este TFG consta de la creació d'una ferramenta pràctica i eficaç que orient a qualsevol persona interessada sobre que substrat és convenient o no per a les seues necessitats. Este programari busca omplir eixe buit proporcionant una solució directa i útil a més de provar la seua funcionalitat en casos reals. L'objectiu del TFG és investigar les condicions necessàries perquè un substrat funcione adequadament en un circuit específic, garantint les característiques desitjades com la impedància màxima i mínima a una freqüència de treball desitjada. El programari es desenvoluparà utilitzant Matlab i la seua eina App Designer, permetent que l'usuari introduísca els seus requisits i est li simplifique la decisió acoste que substrat és l'adequat, a més d'incloure models dels fabricants més importants, millorant la practicitat del programa. El resultat final serà un programari amb una interfície gràfica amigable i fàcil d'usar que guiarà a l'usuari en la selecció del substrat més adequat per al seu disseny. Este projecte no sols té rellevància acadèmica, ja que en ser tan senzill es pot usar per a l'ensenyament en el camp dels circuits planars, sinó que també oferix una ferramenta pràctica de gran utilitat per al camp de disseny de circuits.

## RESUMEN EJECUTIVO

CONCEPTO (traducción)	¿Cumple? (S/N)	¿Dónde? (páginas)
<b>1. IDENTIFICAR:</b>		
1.1. Planteamiento del problema y oportunidad	S	Página 7
1.2. Toma en consideración de los condicionantes (normas técnicas y regulación, necesidades, requisitos y especificaciones)	S	Página 19 a página 22
1.3. Establecimiento de objetivos	S	Página 7
<b>2. FORMULAR:</b>		
2.1. Generación de soluciones creativas (análisis)	S	Página 19 a página 22
2.2. Evaluación de múltiples soluciones y toma de decisiones (síntesis)	S	Página 16
<b>3. RESOLVER:</b>		
3.1. Evaluación del cumplimiento de objetivos	S	Página 41
3.2. Evaluación del impacto global y alcance (contribuciones y recomendaciones prácticas)	S	Página 41

## Índice de contenido

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>RESUM</b> .....	<b>3</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>4</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
1.1 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN .....	7
1.2 OBJETO DEL TFG Y ASIGNATURAS RELACIONADAS .....	7
1.3 OBJETIVO DEL TRABAJO .....	7
<b>2. CIRCUITOS PLANARES</b> .....	<b>8</b>
2.1 HISTORIA DE LOS CIRCUITOS PLANARES .....	8
<b>4. SOFTWARE</b> .....	<b>17</b>
4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
4.2 ECUACIONES UTILIZADAS .....	19
4.3 CREACIÓN DEL SOFTWARE MEDIANTE MATLAB APP DESIGNER .....	24
4.4 CÓDIGO SOLUCIÓN .....	25
<b>5. EJEMPLO DE APLICACIÓN</b> .....	<b>30</b>
<b>6. CONCLUSIÓN</b> .....	<b>42</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>42</b>

---

*Tabla de ilustraciones*

---

<i>Ilustración 1: Diseño y parámetros de una línea de transmisión ideal</i> .....	12
<i>Ilustración 2: Esquema línea Microstrip</i> .....	13
<i>Ilustración 3: Funcionamiento línea Microstrip</i> .....	14
<i>Ilustración 4: Relación de la impedancia característica con la geometría de una línea Microstrip</i> ..	15
<i>Ilustración 5: Esquema línea Stripline</i> .....	15
<i>Ilustración 6: Relación de la impedancia característica con la geometría de una línea Stripline</i> .....	17
<i>Ilustración 7: Resolución de sustratos por parte del software</i> .....	18
<i>Ilustración 8: Impedancia/anchura líneas Microstrip y Stripline</i> .....	20
<i>Ilustración 9: Diseño software</i> .....	24
<i>Ilustración 10: Entorno gráfico Matlab App Designer</i> .....	25
<i>Ilustración 11: Opciones de trabajo del software</i> .....	26
<i>Ilustración 12: Campos a rellenar por el usuario</i> .....	26
<i>Ilustración 13: Campos de datos de sustratos preinstalados</i> .....	27
<i>Ilustración 14: Código primer filtro para líneas Microstrip</i> .....	27
<i>Ilustración 15: Código segundo filtro para líneas Microstrip</i> .....	28
<i>Ilustración 16: Código primer filtro para líneas Stripline</i> .....	28
<i>Ilustración 17: Código segundo filtro para líneas Stripline</i> .....	29
<i>Ilustración 18: Diseño de un acoplador direccional Branch Line de dos etapas con líneas de transmisión ideales</i> .....	30
<i>Ilustración 19: Acoplador direccional Branch Line con de dos etapas con línea Microstrip</i> .....	31
<i>Ilustración 20: Layout del acoplador direccional Branch Line</i> .....	32
<i>Ilustración 21: Prueba 1 Microstrip <math>f=2,15\text{GHz}</math> y <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math></i> .....	33
<i>Ilustración 22: Prueba 2 Microstrip <math>f=2,15\text{GHz}</math> y <math>W_{\min}=0,15\text{mm}</math></i> .....	34
<i>Ilustración 23: Prueba 3 Microstrip <math>f=7,5\text{GHz}</math> y <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math></i> .....	35
<i>Ilustración 24: Prueba 4 Microstrip <math>f=9\text{GHz}</math> y <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math></i> .....	36
<i>Ilustración 25: Acoplador Direccional Branch Line de una etapa</i> .....	37
<i>Ilustración 26: Prueba 1 Stripline <math>f=2,15\text{GHz}</math> <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math> y <math>t=0,02\text{mm}</math></i> .....	39
<i>Ilustración 27: Prueba 1 Stripline <math>f=2,15\text{GHz}</math> <math>W_{\min}=0,2\text{mm}</math> y <math>t=0,02\text{mm}</math></i> .....	40
<i>Ilustración 28: Prueba 2 Stripline <math>f=10\text{GHz}</math> <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math> y <math>t=0,02\text{mm}</math></i> .....	41
<i>Ilustración 29: Prueba 3 Stripline <math>f=15\text{GHz}</math> <math>W_{\min}=0,05\text{mm}</math> y <math>t=0,02\text{mm}</math></i> .....	42
<i>Ilustración 30: Prueba 4 Stripline <math>f=16\text{GHz}</math> <math>W_{\min}=0,15\text{mm}</math> y <math>t=0,02\text{mm}</math></i> .....	42

# 1. Introducción

En este trabajo se va a desarrollar un programa informático para la selección de sustratos adecuados en el diseño de circuitos Microstrip y Stripline, ambos circuitos planares a frecuencias de microondas. La idea es que este software, mediante una interfaz gráfica, le ofrezca al usuario una orientación a la hora de elegir que sustrato le conviene, dependiendo de los parámetros del circuito a realizar.

## 1.1 Contexto y justificación

A la hora de diseñar un circuito a partir de líneas planares llega un momento en el que es necesario la elección de un sustrato que se implemente en el circuito. Este trabajo consiste en el desarrollo de una herramienta útil e intuitiva que ayude en ese momento al diseñador del circuito, orientando al usuario acerca de los posibles sustratos que puede elegir. En el apartado de **Ejemplos de aplicación** se detallarán en profundidad una serie de casos donde puede ser de utilidad y se probará el funcionamiento del mismo.

## 1.2 Objeto del TFG y asignaturas relacionadas

El objeto del trabajo reside en la investigación acerca de las condiciones necesarias para que un determinado sustrato sea adecuado en según qué circuito para la obtención de las características que se desean. Como por ejemplo impedancias máxima y mínima de las líneas de transmisión. Además de incluir ciertos modelos de los fabricantes más importantes de sustratos para circuitos planares, para simplificar al usuario la búsqueda de los mismos.

Para este trabajo se han empleado tanto los conocimientos como las presentaciones, documentos teóricos y fórmulas matemáticas de las asignaturas del grado Fundamentos de Transmisión y Líneas de transmisión. Además de los encontrados en la red que se detallaran en el apartado de [Bibliografía](#).

## 1.3 Objetivo del trabajo

El objetivo del trabajo es diseñar un software mediante la herramienta de Matlab llamada App Designer, que a través de la introducción de unos parámetros por parte del usuario sobre las impedancias mínima y máxima, la frecuencia de trabajo y otra serie de parámetros que se detallan a continuación, orienten al usuario acerca de qué sustrato le conviene en su situación particular, y cuál, en

su defecto, no le conviene. Todo esto procurando una interfaz gráfica agradable, intuitiva y fácil de utilizar.

## 2. Circuitos Planares

### 2.1 Historia de los circuitos planares

Antes de hablar de las líneas Microstrip o las Stripline conviene detallar que camino ha seguido esta tecnología para llegar a este punto en el que se encuentra.

Los circuitos planares, incluyendo las líneas Microstrip y Stripline, tienen una rica historia. La primera vez que se escuchó el término de circuito planar fue al principio de la década de los 50, cuando la tecnología de circuitos impresos conocidos comúnmente como PCB comenzó a desarrollarse. Los PCB permitieron la creación de circuitos eléctricos que al estar impresos sobre unas superficies planas tomaron el nombre de circuito planar. Durante este periodo de tiempo también comenzó el desarrollo de una de las líneas sobre las que se centra este trabajo de final de grado, la línea de transmisión tipo Stripline, también llamada triplaca, cuyo diseño se basaba en un sustrato entre dos planos de masa. Esta línea fue una de las primeras formas de línea de transmisión plana que podía proporcionar un entorno electromagnético controlado. Unos pocos años más tarde se patentó la tecnología de Microstrip, cuya diferencia principal con la Stripline radica en tener un único plano de tierra y estar expuesta al aire o a otro dieléctrico, facilitando su integración en estas placas, y aumentando ampliamente su uso debido a que su fabricación era más sencilla además de incurrir en menores costes de fabricación.

Durante las décadas de los 70 y 80, la tecnología Microstrip se adoptó masivamente en aplicaciones de microondas y radiofrecuencia como sistemas de radar o comunicación mediante satélite. La razón principal del uso de estas líneas se debe a la característica de que responden muy bien a altas frecuencias. Durante este periodo de tiempo también se desarrollaron técnicas de diseño avanzadas y los primeros programas o software de simulación, permitiendo un diseño más preciso y optimizado de ambos tipos de circuitos planares. Dada la simplificación que estos programas proporcionaban a la prueba de distintas configuraciones, se introdujeron nuevas configuraciones con distintos materiales dieléctricos, mejorando el rendimiento y la eficiencia de los mismos y adecuando las características de la línea al propósito deseado.

En los años 90, la evolución de los sustratos dieléctricos y la integración con tecnologías de conductores permitieron el desarrollo de circuitos híbridos, combinando circuitos integrados (ICs) con Microstrip y Stripline para mejorar la funcionalidad y reducir el tamaño. Esta disminución del tamaño de los circuitos, el aumento de la densidad de componentes y los avances de principios de los 2000 de las tecnologías de fabricación de circuitos planares permitieron una mejoría importante en este sector.

Por último, a lo largo de los últimos años se han ido desarrollando materiales cada vez avanzados como los sustratos de baja constante dieléctrica, mejorando la eficiencia y reduciendo las pérdidas en los circuitos que implican una gran frecuencia de trabajo. En la actualidad, los circuitos Microstrip y Stripline continúan siendo esenciales en el desarrollo de tecnologías que están en boca de todos como el 5G, el Internet of things (IoT) o las comunicaciones de alta velocidad. Las investigaciones actuales se centran en mejorar la adaptabilidad de estos circuitos para su uso en aplicaciones portátiles y dispositivos móviles.

## 2.2 Fabricantes de alta calidad

En el diseño y fabricación de circuitos Microstrip y Stripline la elección del sustrato es de gran importancia ya que estos sustratos deben ofrecer una serie de características como una baja pérdida dieléctrica, capacidad de resistir ciertas temperaturas y consistencia de rendimiento para asegurar que no exista distorsión de la señal y conseguir un funcionamiento eficiente del circuito planar. En este punto, se enumeran algunos de los fabricantes más reconocidos en la industria de los sustratos para altas frecuencias de trabajo, algunos de los cuales hemos usado para añadir los datos al software para que el usuario tenga alguna opción entre la que elegir. Estos fabricantes son líderes en la producción de sustratos de alta calidad que cumplen con los rigurosos requisitos de rendimiento necesarios para aplicaciones avanzadas de alta frecuencia.

- **Rogers Corporation**

Rogers es probablemente la compañía más conocida de este sector, que destaca por sus materiales avanzados para alta circuitos en frecuencia, como los sustratos RO3000, RO4000, y RT/duroid. Dada la gran presencia de estos sustratos en el mercado los tres con sus distintas variables de permitividades y alturas se han incluido en el software. Rogers también destaca por su carrera en el desarrollo de materiales con bajas constantes dieléctricas, lo que es importante para mantener la integridad de la señal sin distorsión en aplicaciones de alta frecuencia.

- **Isola Group**

Isola proporciona una gama de materiales dieléctricos de alta frecuencia, como Isola Astra MT77. Estos sustratos son muy valorados por su baja permitividad y alta estabilidad térmica, lo que los hace ideales para aplicaciones de alta frecuencia. Lo más relevante de esta compañía es la gran capacidad de innovación que constantemente presenta en sus productos.

- **Taconic**

Taconic es un importante fabricante de sustratos de alta frecuencia, conocidos especialmente por sus materiales basados en Politetrafluoroetileno, este material proporciona a los productos de Taconic una serie de características que provoca que sean altamente apreciados en aplicaciones de RF y microondas por su excelente rendimiento, incluyendo baja pérdida de inserción. Ejemplos de sustratos fabricados con este material pueden ser el Taconic RF-35 y Taconic TLY-5a.

- **Arlon Electronic Materials**

Arlon como los fabricantes anteriores ofrece una serie de sustratos de alta frecuencia, como los Arlon AD450 y Arlon CLTE, que al igual que los anteriores están diseñados aplicaciones de microondas y telecomunicaciones en satélites. Estos sustratos son reconocidos por su excepcional estabilidad térmica y baja constante dieléctrica, lo que asegura un buen rendimiento en condiciones extremas. Arlon también destaca por su inversión en investigación y desarrollo para mejorar continuamente sus materiales.

## 2.3 Procesos de fabricación

En la fabricación de líneas de transmisión en sustratos dieléctricos destinados a crear circuitos planares como los Microstrip y Stripline, el proceso de fabricación que se elija afecta directamente a la calidad de los circuitos planares y por ejemplo limita el ancho mínimo de línea que se puede conseguir. Esta variable será clave en este trabajo. Existen varios procesos industriales que se utilizan actualmente para la fabricación de estos sustratos, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones específicas. En este apartado, se van a describir algunos de los procesos más importantes.

Uno de los procesos más comunes en la producción de sustratos dieléctricos es el que conoce como microfresado. Este es un proceso de fabricación que destaca por su alta precisión, utilizando herramientas de corte diminutas que dibujan patrones en el sustrato que pueden llegar a tener una alta complejidad. El tamaño de las herramientas de corte determina la precisión y resolución que se puede llegar a conseguir. El microfresado es ideal para la producción de prototipos y pequeñas series de producción donde se requiere una alta precisión, pero requiere más tiempo y coste comparado con otros tipos de procesos de fabricación.

Otra manera de fabricación de líneas de transmisión a partir de un sustrato dieléctrico es mediante el proceso fotolitográfico. En este proceso de fabricación se hace uso de luz ultravioleta para transferir un patrón desde una máscara fotográfica a una capa de resina resistente fotosensible depositada sobre el sustrato, y con un posterior atacado químico se dibujan las líneas de transmisión deseadas. Los pasos clave en el proceso de fotolitografía incluyen la aplicación de la resina fotosensible, seguido de la exposición del sustrato a la luz ultravioleta a través de una capa que actúa como máscara filtrando a que parte del sustrato le llega la luz donde se dibujará el patrón deseado formando la línea de transmisión. Más tarde se elimina la máscara, descubriendo la línea de transmisión cuyo patrón queda impreso en el sustrato, y las áreas del sustrato no cubiertas por la resina fotosensible y se lavan químicamente para crear el patrón final. Este proceso es más eficiente que el microfresado dado su mayor capacidad para replicarlo de una manera más sencilla además de conseguir una muy buena precisión.

### 3. Líneas Microstrip y Stripline

En los circuitos planares para alta frecuencia aparecerán diferentes líneas de transmisión, caracterizadas cada una de ellas por una impedancia característica. Estas líneas de transmisión poseen una gran importancia en el ámbito de la electrónica, ya que pueden transmitir señales eléctricas con pocas pérdidas. Junto con la línea coplanar las líneas de transmisión más utilizadas son la Microstrip y la Stripline, que se explicarán a continuación, ya que son hacia las que está enfocado este trabajo de fin de grado. La Stripline consiste en dos planos conductores paralelos separados por un dieléctrico homogéneo y una tira conductora en medio, mientras que Microstrip consiste en un solo plano conductor bajo un sustrato dieléctrico y encima una tira conductora.

Llegado este punto es importante comentar que en el paso previo al diseño de cualquier circuito con líneas de transmisión se realiza una prueba previa con lo que se llaman líneas de transmisión ideales, este tipo de modelo simplificado de las líneas de transmisión facilita la creación de un diseño previo. Esta línea de transmisión se caracteriza por no presentar pérdidas provocadas por la resistencia del conductor a la conductancia del dieléctrico, lo que significa que toda la energía transmitida es recibida. Además, en una línea de transmisión ideal, el término que define la dispersión de la señal a lo largo de la línea no se tiene en cuenta, lo que implica que todas las frecuencias de la señal viajan a la misma velocidad.

Una línea de transmisión ideal se describe mediante una serie de parámetros, donde  $L$  es la inductancia y  $C$  es la capacitancia. Los valores de  $L$  y  $C$  determinan la velocidad de propagación de la señal y la impedancia característica de la línea.

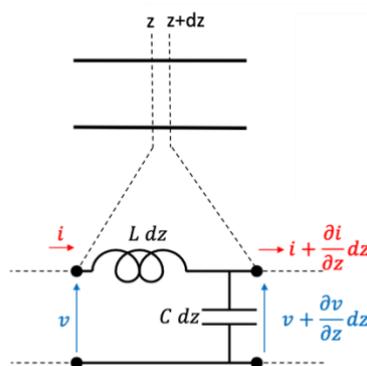


Ilustración 1: Diseño y parámetros de una línea de transmisión ideal

Fuente: Presentación de asignatura de Líneas de Trasmisión

Estas características con las que se definen las líneas de transmisión ideales sirven para obtener los parámetros que rigen su funcionamiento. En primer lugar la impedancia característica, tan importante para la realización de este trabajo se puede calcular en un modelo ideal de la siguiente forma:

$$Z_c = \sqrt{L/C}$$

Otro parámetro relevante es el que se conoce como velocidad de propagación y rige la velocidad a la que viajan las señales dentro de una línea de transmisión. Este parámetro es importante ya que permite calcular la longitud de onda

$$V_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \lambda_p = \frac{V_p}{f}$$

Por último y antes de comenzar con la descripción de las líneas de transmisión que van a emplearse para la realización de este trabajo es relevante comentar que la principal diferencia en la construcción de ambas líneas de transmisión radica en que la Microstrip no está cerrada por el recubrimiento metálico por la parte superior. Otra característica que es relevante para el funcionamiento de estas líneas planares es que la propagación de señales en este tipo de líneas ocurre en el modo TEM (Transverse Electromagnetic Mode) o cuasi-TEM en el caso de la Microstrip. <sup>1</sup>

### 3.1 Microstrip

La característica principal de la estructura de la línea Microstrip, si la comparáramos con la Stripline, es que solo hará uso de un sustrato, estando formada por una tira conductora separada de un plano de masa por un sustrato dieléctrico. <sup>2</sup>

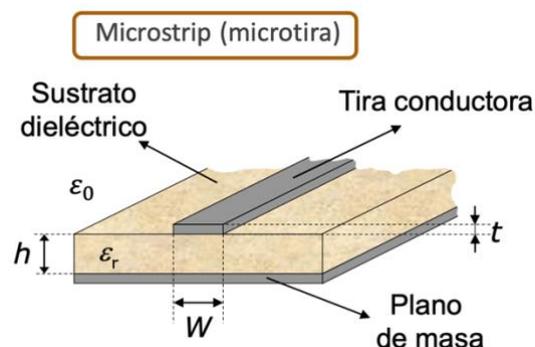
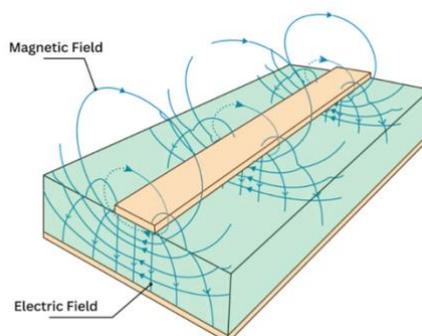


Ilustración 2: Esquema línea Microstrip

Fuente: Presentación de asignatura de Fundamentos de Trasmisión

El funcionamiento de una línea Microstrip se basa en la propagación de ondas electromagnéticas entre la tira conductora y el plano de masa. El valor de la permitividad del material dieléctrico influye en la velocidad a la que las señales se desplazan a través de la línea. Esta velocidad a la que viaja la señal, conocida como velocidad de propagación, está determinada por la constante dieléctrica del material. Cuando se aplica una señal eléctrica a la línea Microstrip, se genera un campo electromagnético alrededor del conductor. Este campo interactúa con el material dieléctrico, lo que permite que la señal se propague.

Las líneas de transmisión Microstrip generalmente exhiben una propagación en modo cuasi-TEM. En este modo, los campos eléctrico y magnético no son estrictamente perpendiculares a la dirección de propagación, y la velocidad de la señal depende ligeramente de la frecuencia. Esto puede causar una dispersión que podría llegar a causar una pequeña distorsión de la señal, especialmente a medida que se va aumentando la frecuencia.



*Ilustración 3: Funcionamiento línea Microstrip*

*Fuente: Artículo Stripline vs Microstrip: a comprehensive comparison*

Una de las principales ventajas de las líneas de transmisión Microstrip es su estructura simple, facilitando el acceso al conductor para la fase de pruebas y diseño del circuito, o por si se quisiera realizar alguna modificación, una ventaja significativa durante las etapas de diseño y resolución de problemas. Estas líneas también permiten integrar varios componentes, como resistencias, condensadores o bobinas, directamente en la línea Microstrip. Además, las líneas de transmisión Microstrip tienen una mayor capacidad de manejo de potencia en comparación con las Stripline. Esto se debe a su estructura abierta, que permite una mejor disipación del calor, haciéndolas adecuadas para aplicaciones que requieran una potencia elevada. Por último, la velocidad de propagación de la señal en una Microstrip es mayor que en una Stripline. Esto se debe a que la constante dieléctrica efectiva en una línea Microstrip es menor, ya que el campo electromagnético no está completamente confinado dentro del material dieléctrico.

En la línea de transmisión Microstrip al igual que sucederá con la Stripline, y es que dependiendo de las dimensiones con las que se construya la línea de transmisión cambiará la impedancia característica de la misma, en la Ilustración 4 se observa como a medida que la relación  $W/h$  aumenta la impedancia característica disminuye. Esto será de gran importancia a la hora de analizar un sustrato, ya que acorde a la  $h$  y la permitividad del sustrato para conseguir ciertas impedancias máximas se requerirán unos anchos de línea más bajos de los que el usuario puede conseguir.<sup>3</sup>

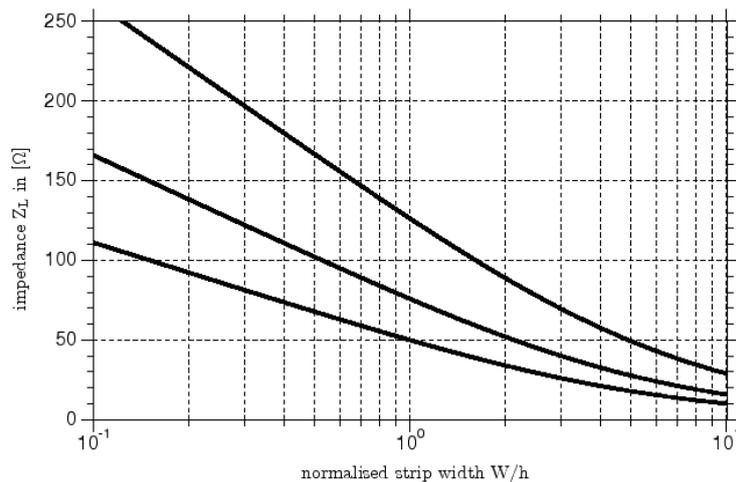


Ilustración 4: Relación de la impedancia característica con la geometría de una línea Microstrip

Fuente: Impedance of Stripline

### 3.2 Stripline

La fabricación de la Stripline o triplaca consiste en una tira conductora, normalmente de cobre, intercalado en un sustrato dieléctrico envuelto por dos planos de masa cortocircuitados, como se ha mostrado en la Ilustración 5.

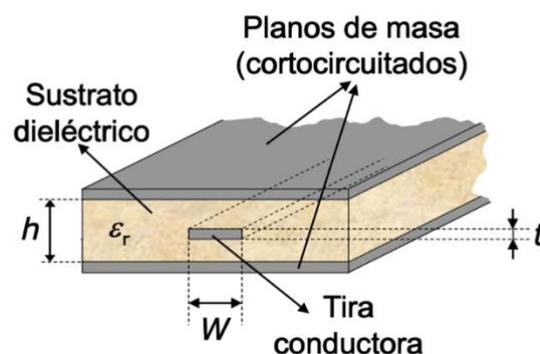


Ilustración 5: Esquema línea Stripline

Fuente: Presentación de asignatura de Fundamentos de Trasmisión

Con esta composición de fabricación, el material dieléctrico es fundamental para el funcionamiento de la línea ya que su función principal es mantener la separación entre el conductor y los planos de tierra, influyendo en la velocidad a la que las señales se desplazan a través del circuito. En lo que respecta al plano de masa está normalmente fabricado con materiales que destacan por su conductividad como el cobre o el aluminio, este actúa como plano de tierra para la Stripline ofreciéndole un camino de retorno para la corriente y protegiendo al conductor de interferencias electromagnéticas externas. Las dimensiones de la Stripline, que incluyen el grosor del conductor 't', la altura del sustrato 'h' y el ancho de la línea 'W', se seleccionan prestando atención en la relación de éstas con la impedancia característica deseada a la frecuencia escogida.

El funcionamiento de la Stripline se basa en la propagación de ondas electromagnéticas guiadas por la tira conductora cuando se aplica una señal eléctrica. Este campo interactúa con el material dieléctrico, lo que permite que la señal se propague a lo largo de la línea de transmisión. La velocidad a la que viaja la señal, conocida como velocidad de propagación, depende de la constante dieléctrica del material independientemente de la frecuencia escogida para el funcionamiento del circuito.

Una de las principales ventajas de las líneas Stripline es que a diferencia de las líneas Microstrip, esta sí posee capacidad para soportar la propagación en modo electromagnético transversal puro (TEM). Este modo TEM asegura que la velocidad de la señal sea independiente de la frecuencia, lo que resulta en una dispersión mínima y por tanto no añade distorsión a la señal.

Otra ventaja que recalcar de esta línea Stripline es que la velocidad de transmisión depende de la permitividad del material, independientemente de la frecuencia como se ha comentado anteriormente por lo que la señal posee menor dispersión.

Otra ventaja sería que estas líneas proporcionan un excelente aislamiento entre pistas adyacentes gracias a la presencia de planos de tierra en ambos lados del conductor. Esta característica disminuye la diafonía, un problema frecuente en circuitos de alta densidad donde múltiples líneas de transmisión están muy cercanas entre sí. Como última ventaja a recalcar de las líneas Stripline es su resistencia a las interferencias electromagnéticas externas debido al apantallamiento que proporcionan los dos planos de masa.

Como desventajas más significativas serían las derivadas de la propia estructura con dos planos de masa, que por un lado requieren el uso de dos sustratos, y además no permiten acceder a la tira conductora en un proceso de medida. Además su estructura cerrada dificulta la disipación de calor. Finalmente, las líneas de transmisión Stripline generan una velocidad de propagación de señal más lenta que las líneas Microstrip como se mencionaba en el punto anterior, esto es debido a que la velocidad de la señal en una línea Stripline está

determinada por la constante dieléctrica del material, donde está confinado el conductor.

Al igual que se ha comentado para las líneas Microstrip la relación entre la altura del sustrato y el ancho de línea forma una curva decreciente con el valor de la impedancia por lo que las medidas con las que se construya la línea de transmisión serán de gran importancia a la hora de intentar cumplir los requerimientos del usuario en cuanto a la impedancia que le proporcione el circuito formado por la línea de transmisión. <sup>3</sup>

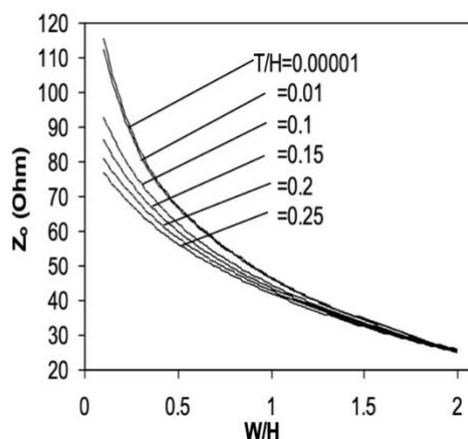


Ilustración 6: Relación de la impedancia característica con la geometría de una línea Stripline

Fuente: Impedance of Stripline

## 4. Software

En este apartado se explica con detalle el problema que se pretende resolver con este trabajo de fin de grado, el planteamiento realizado y la manera de resolverlo, además de detallar el uso de las herramientas elegidas para la resolución.

### 4.1 Planteamiento del problema

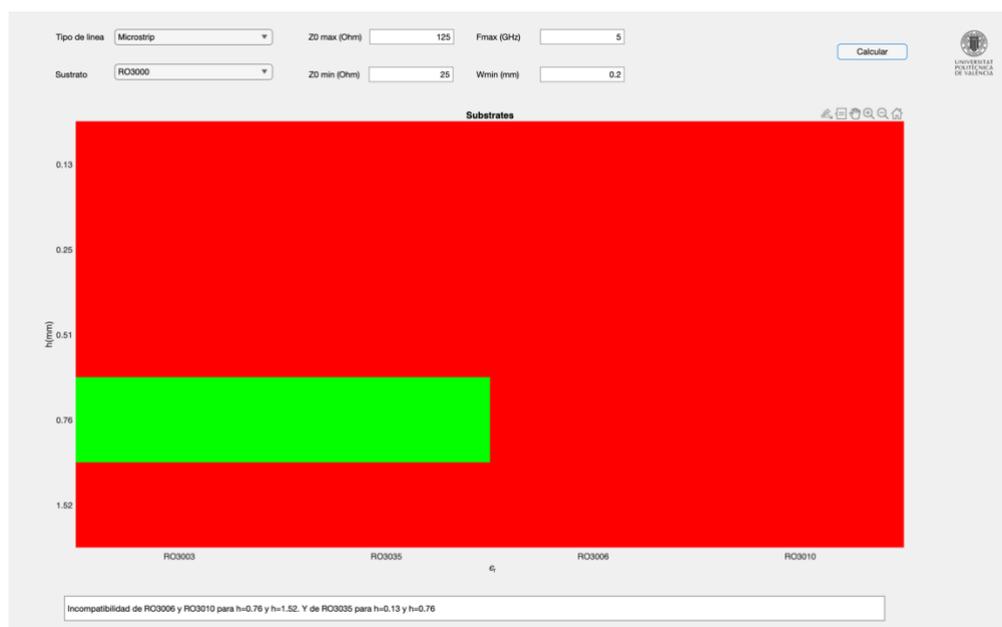
La idea principal de este trabajo de fin de grado es crear una herramienta útil y práctica que sirva para orientar al usuario acerca de que sustrato elegir, dependiendo de las características precisadas por el usuario.

Como primer punto a destacar es importante añadir qué datos son los más relevantes para la creación de un circuito mediante líneas planares. Para el diseño de un circuito planar es necesario conocer las impedancias características de las líneas presentes en este circuito, es decir tanto la impedancia máxima ( $Z_{max}$ ) como mínima ( $Z_{min}$ ) que se le va a requerir a este circuito.

Además de esto, es importante conocer la frecuencia de trabajo ( $f$ ) con la que se va a trabajar en este circuito y el ancho mínimo de la tira que se puede conseguir que dependiendo de la tecnología de fabricación que se vaya a utilizar. Por último se requiere conocer el valor del parámetro ( $t$ ) que correspondería al grosor de la tira conductora dentro del sustrato ya que hemos comprobado que produce un efecto significativo en los resultados por lo que se deberá tener en cuenta este valor para la resolución matemática.

En cuanto a los sustratos se refiere, y dado que esta herramienta es orientativa, se ha visto interesante la opción de añadir los valores tanto de permitividad ( $\epsilon_r$ ) y las alturas posibles ( $h$ ) de los sustratos más vendidos de los principales fabricantes para facilitar el uso del programa. Esto no descartaría la opción, por parte del usuario, de añadir manualmente una serie tanto de permitividades como de alturas para que el software compare su viabilidad con el resto de los datos introducidos.

Por último, en cuanto a la interfaz gráfica el programa comunica al usuario el resultado mediante la generación de una tabla a color donde en el eje de abscisas quedan reflejados las permitividades del sustrato y en el eje de ordenadas las alturas disponibles de dichos sustratos. Esta tabla indicará en color verde las combinaciones de alturas y permitividades que cumplan con los requisitos introducidos por el usuario y de rojo las combinaciones que no los cumplen. En el caso de haber elegido las opciones de sustratos proporcionados por algún fabricante y debido a que se trata de una serie de alturas y sustratos ofrecidos por un tercero, es posible que exista alguna combinación que no esté disponible para su venta, y esto se indicaría en la parte inferior en un cuadro de comentarios



*Ilustración 7: Resolución de sustratos por parte del software*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

## 4.2 Ecuaciones utilizadas

Para poder implantar una solución mediante Matlab lo primero que es necesario es conocer que procesos matemáticos le estamos pidiendo que realice a la herramienta y ver qué línea de filtros ha de pasar un sustrato para ser válido para su uso en una aplicación real.

Para la toma de decisión de si un sustrato es conveniente o no, se van a evaluar los sustratos mediante dos requisitos diferentes. Si un sustrato cumple los dos requisitos se tomará como válido y se indicará así al usuario. Explicaremos conjuntamente ambas requisitos, tanto como para la línea Microstrip como para la Stripline, ya que aunque las fórmulas que rigen el comportamiento de ambos circuitos planares sean distintas la manera de resolver el problema para ambos tipos de línea de transmisión ha sido el mismo.

Se han hecho uso de las fórmulas de la segunda parte de la asignatura de Fundamentos de Transmisión dedicada a las líneas de transmisión que detallan el funcionamiento de las líneas planares. En primer lugar se tomará la información de los sustratos candidatos, ya sean los proporcionados en el software de cierto fabricante o los introducidos por el usuario. Estos datos se componen de dos vectores, uno con las diferentes alturas ( $h$ ) y otro con las posibles permitividades relativas ( $\epsilon_r$ ). Además de esto el usuario introducirá las impedancias máxima ( $Z_{max}$ ) y mínima ( $Z_{min}$ ) que desee conseguir con ese sustrato, la frecuencia ( $f$ ) proporcionada en GHz a la que va a operar y el ancho mínimo de la tira que se puede conseguir. Esto último dependerá del método de fabricación del sustrato de vaya a usar y se detallará en el apartado de Procesos de fabricación.

A partir de aquí se realizarán dos cálculos de forma separada, para averiguar si existe alguna combinación permitividad/altura que cumpla con ambas características. El programa indicará al usuario gráficamente que esa combinación es factible para su montaje.

Conviene destacar los parámetros con los que se está trabajando. Estos parámetros son los siguientes:

- $h$  (mm): altura del sustrato
- $\epsilon_r$ : permitividad del sustrato
- $\epsilon_0$ : permitividad del aire
- $W_{min}$  (mm): ancho mínimo que el usuario puede conseguir de la tira conductora
- $Z_{min}$  (Ohm): impedancia mínima
- $Z_{max}$  (Ohm): impedancia máxima
- $F$  (GHz): frecuencia de trabajo del circuito
- $T$  (mm): grosor de la tira conductora, su valor únicamente es relevante en las líneas Stripline.

Para comprobar si un sustrato es válido para las especificaciones escogidas por el usuario, se realizarán dos cálculos distintos, que irán seleccionando las combinaciones permitividad/altura adecuadas.

El primer cálculo viene relacionado con la relación entre la  $W_{\min}$  y la impedancia máxima, como se observa en la Ilustración 8. Por lo que habrá que comprobar si la impedancia máxima que requiere el usuario es posible conseguirla a partir de la  $W_{\min}$  y las  $h$  y las *permitividades* proporcionadas.

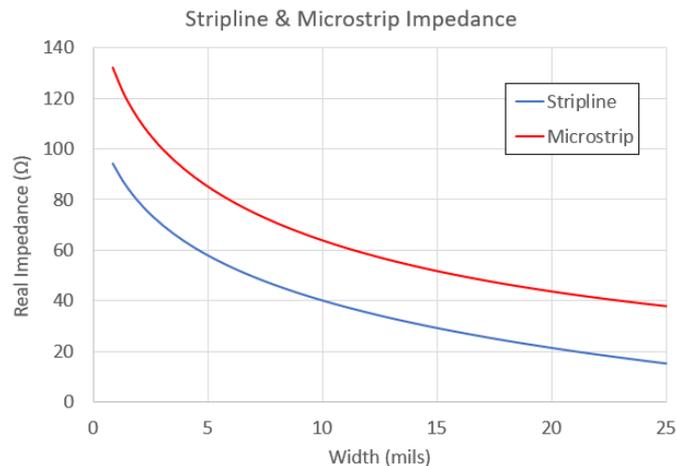


Ilustración 8: Impedancia/anchura líneas Microstrip y Stripline

Fuente: Artículo Microstrip vs Stripline

El segundo cálculo para la elección del sustrato viene dado por la impedancia mínima que requerirá una ' $W/h$ ' mayor y que puede llegar un momento esta ' $W$ ' sea tan grande que aparezcan resonancias transversales indeseadas. Para evitar que esto ocurra el otro requisito que hemos puesto es que con las alturas y permitividades disponibles, se pueda conseguir esta ' $Z_{\min}$ ' sin que la  $W$  sea más del 20% de la longitud de onda ( $\lambda$ ).

Todo este proceso es similar para ambas líneas, tanto las Microstrip como para las Stripline ya que pese a que tanto las fórmulas que rigen su comportamiento como su estructura son diferentes los problemas a los que te puedes enfrentar si no eliges correctamente el tipo de sustrato son los mismos.

En cuanto a las fórmulas asociadas al dieléctrico para la línea Microstrip, estas han sido las proporcionadas por parte de la asignatura de líneas de transmisión.

Las expresiones matemáticas de la línea Microstrip se presentan a continuación.

El cálculo para comprobar la compatibilidad del sustrato con el circuito es el que obtiene la impedancia máxima pedida por el usuario a partir del ancho mínimo realizable de la tira. Para esto lo primero que se hará será calcular la permitividad relativa efectiva a partir de la permitividad relativa del dieléctrico con la fórmula que se muestra a continuación:

$$\varepsilon_{ref} \approx 1 + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \left[ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 10h/W_{min}}} \right]$$

Siendo 'h' la altura del sustrato y 'W<sub>min</sub>' el ancho mínimo de la tira que puede conseguir el usuario a partir de su método de fabricación.

A partir de esta permitividad se puede calcular la impedancia máxima que se puede conseguir para cada sustrato. Como se muestra en la Ilustración 8, para conseguir la impedancia máxima se requerirá el ancho mínimo de la línea, y para su cálculo se empleará la siguiente formula:

$$Z_{max} \approx \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_{ref}}} \ln \left( \frac{8h}{W_{min}} + \frac{W_{min}}{4h} \right) ; \frac{W_{min}}{h} \leq 1 \\ \frac{120 \cdot \pi}{\sqrt{\varepsilon_{ref}}} \left[ \frac{W_{min}}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W_{min}}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} ; \frac{W_{min}}{h} \leq 1 \end{cases}$$

Una vez hallada la impedancia máxima que puede conseguir cada combinación permitividad/altura, se comparará con la impedancia máxima proporcionada por el usuario, y si no se pudiera conseguir esta impedancia máxima esta combinación quedaría descartada. En cambio si fuera suficiente para los requerimientos del usuario se pasaría al siguiente cálculo.

El siguiente cálculo consiste en comprobar si se puede obtener la impedancia mínima de la líneas presentes en el circuito, que vendrá limitado con el ancho máximo de la tira, y que deber ser menor que 0,2 veces la longitud de onda. Cabe recalcar que este valor de 0,2 veces lambda es orientativo y dependiendo de la funciones del circuito o lo restrictivo que quisiera ser el usuario podría no ser suficiente. Mediante la formula siguiente se calculará el valor de 'W<sub>min</sub>/h' necesario para conseguir la impedancia mínima que ha introducido el usuario, a partir de aquí se obtendrá la 'W<sub>min</sub>' a partir de las alturas 'h' introducidas. Si esta 'W<sub>min</sub>' es mayor que 0,2 veces la longitud de onda, esta combinación altura y permitividad quedaría descartada.

$$\frac{W_{min}}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} ; \frac{W_{min}}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} \left[ \ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r} \right] \right] ; \frac{W_{min}}{h} \leq 1 \end{cases}$$

Siendo:

$$A = \frac{Z_{min}}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right)$$

$$B = \frac{377 * \pi}{2Z_{min}\sqrt{\epsilon_r}}$$

En cuanto a las líneas Stripline las fórmulas utilizadas son las obtenidas a partir del artículo de Impedance of Stripline<sup>4</sup>. Se ha preferido escoger estas fórmulas a las fórmulas académicas, puestos que éstas desprecian el parámetro 't' (thickness) mencionado anteriormente. Esta aproximación generaría un error que es preferible evitar, por lo que utilizaremos las fórmulas descritas en este artículo que están más cercanas a la realidad. Y pese a que se tiene en cuenta este nuevo parámetro el procedimiento a seguir es el mismo que para la otra línea de transmisión. En primer lugar se calculará la  $Z_{max}$  y se comparará con la introducida por el usuario. Para esto se toman los valores correspondientes a una ' $W_{min}/h < 0,35$ ' ya que para el cálculo impedancia máxima estos valores requieren una ' $W/h$ ' lo más pequeña posible.

$$Z_{max} = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{4B}{\pi * Z_{k2}}\right)$$

$$Z_{k2} = \frac{W_{min}}{2} \left[ 1 + \frac{t}{\pi * W_{min}} \left[ 1 + \ln\left(\frac{4 * \pi * W_{min}}{t}\right) + 0,51 * \pi * \left(\frac{t}{W_{min}}\right)^2 \right] \right]$$

Análogamente al segundo filtro empleado para las líneas Microstrip se calculará en ' $W$ ' máximo que se va a emplear correspondiente a la ' $Z_{min}$ ' introducida por el usuario y se comparará con la longitud de onda, para ello se empleará la siguiente ecuación.

$$Z_{min} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{94.15}{\left[ \frac{W_{min}/B}{1-t/B} \right] + \frac{Z_{k1}}{\pi}}$$

$$Z_{k1} = \left[ \frac{2}{1 - \frac{t}{B}} \ln\left(\frac{1}{1 - (t/B)} + 1\right) - \left(\frac{1}{1 - \frac{t}{B}} - 1\right) \ln\left(\frac{1}{\left(1 - \frac{t}{B}\right)^2} - 1\right) \right]$$

A través de estos dos procedimientos se comprobará si el sustrato permite la impedancia máxima y mínima necesaria a la frecuencia escogida y con el ancho que el usuario es capaz de conseguir. Tras toda esta elaboración el siguiente paso sería la creación de un software que sea capaz de realizar los pasos descritos en este apartado.

### 4.3 Creación del software mediante Matlab App designer

Para la realización de este software se ha escogido MATLAB. Este es un entorno habitual de programación en distintos campos de ingeniería, proporcionando herramientas que facilitan la manipulación de matrices y la creación de interfaces gráficas para el usuario. En cuanto a App Designer, es una herramienta que ofrece MATLAB que permite crear una aplicación mediante código y una interfaz gráfica que facilita su diseño. Esta solución facilita el diseño y desarrollo de aplicaciones, simplificando el proceso de creación de la misma en según qué ámbito. En nuestro caso, dado que para el cálculo de todo el proceso se emplean matrices y vectores, esta aplicación es idónea para el propósito del trabajo.

El editor de código integrado en App Designer permite escribir y modificar el código asociado a los distintos componentes que te ofrece la interfaz, utilizando una función “callback”, a la que le indicas lo que debe suceder al accionar ciertos elementos que se ejecutará tras presionar el botón “calcular” utilizando los valores asignados en los recuadros indicados de la interfaz. Estas aplicaciones, una vez finalizado su desarrollo, se pueden compartir y exportar como archivos ejecutables o integrarse en otros proyectos de MATLAB.

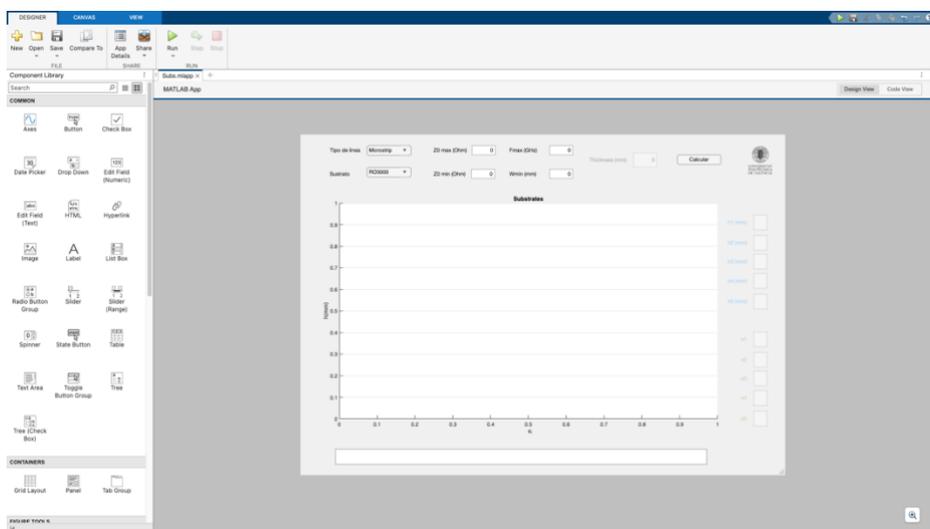


Ilustración 9: Diseño software

Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab

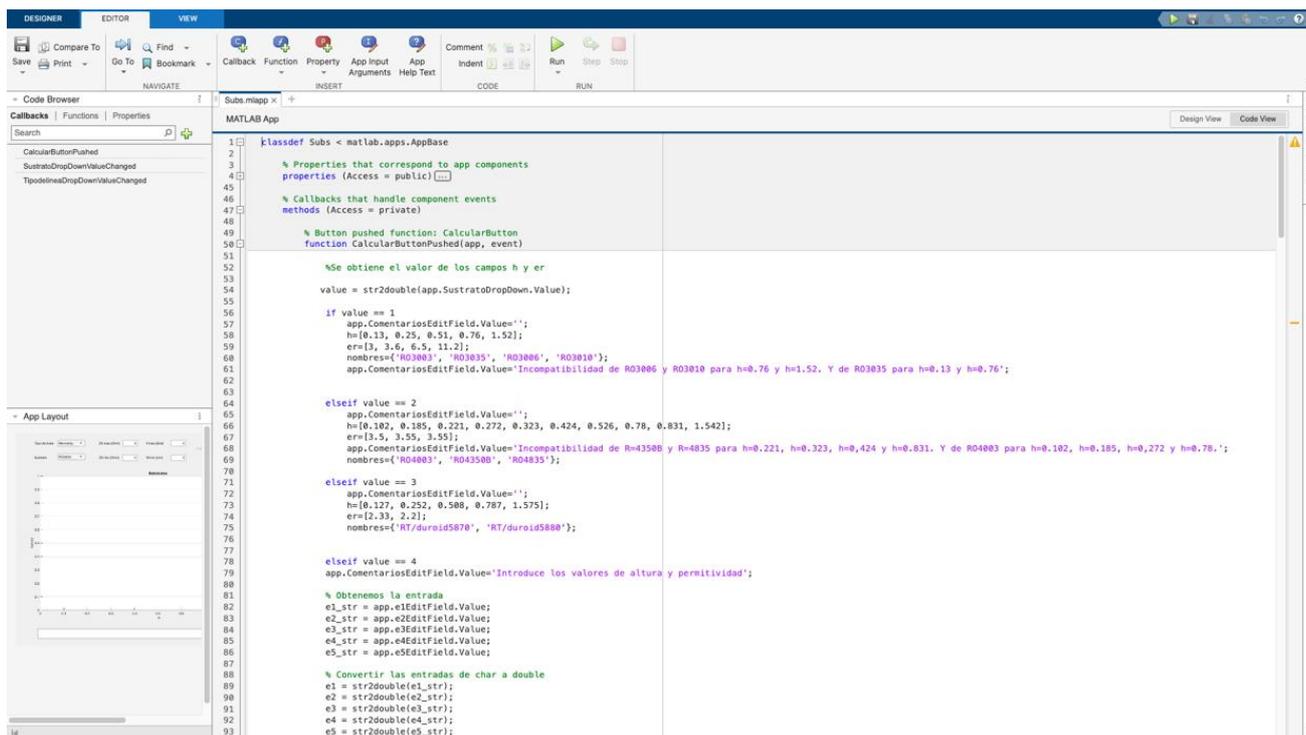


Ilustración 10:Entorno grafico Matlab App Designer

Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab

## 4.4 Código solución

El programa se puede dividir en una serie de secciones para comprender mejor su utilidad.

En primer lugar el software posee en la interfaz gráfica dos desplegables donde elegir si se desea hacer uso del programa para el cálculo de una línea Microstrip o Stripline, y otro donde poder seleccionar los sustratos que se van a comprobar, tanto de algunos de los fabricantes más conocidos o insertar los valores de las alturas y permitividades manualmente.

En segundo lugar la inserción de los datos por partes del usuario se realiza mediante unas casillas donde se indica el nombre del valor a introducir con las unidades correspondientes.

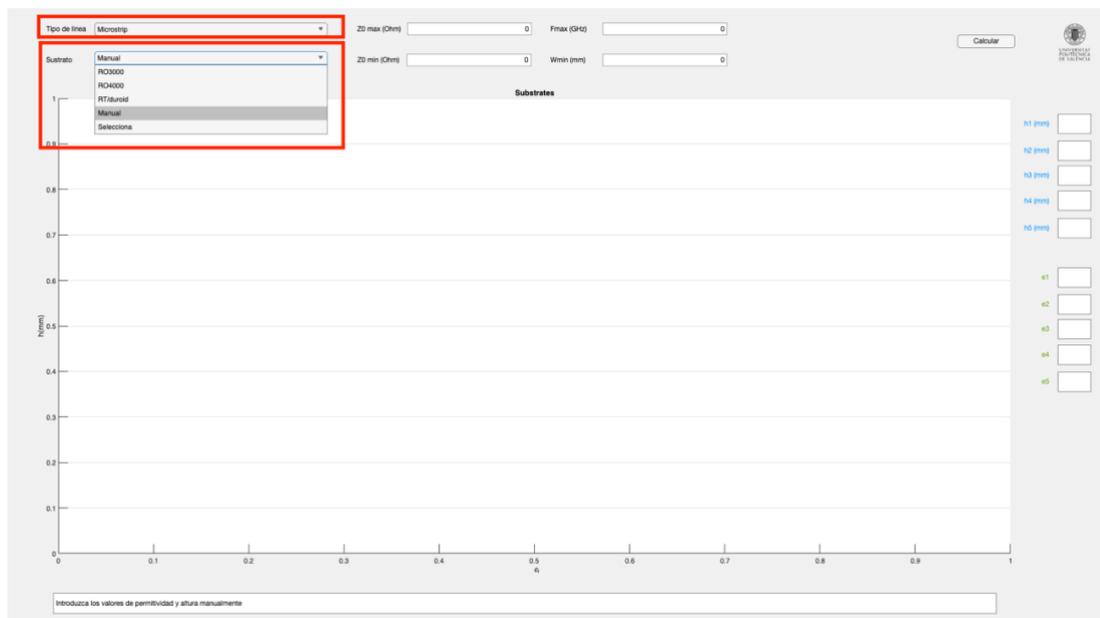


Ilustración 11: Opciones de trabajo del software

Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab

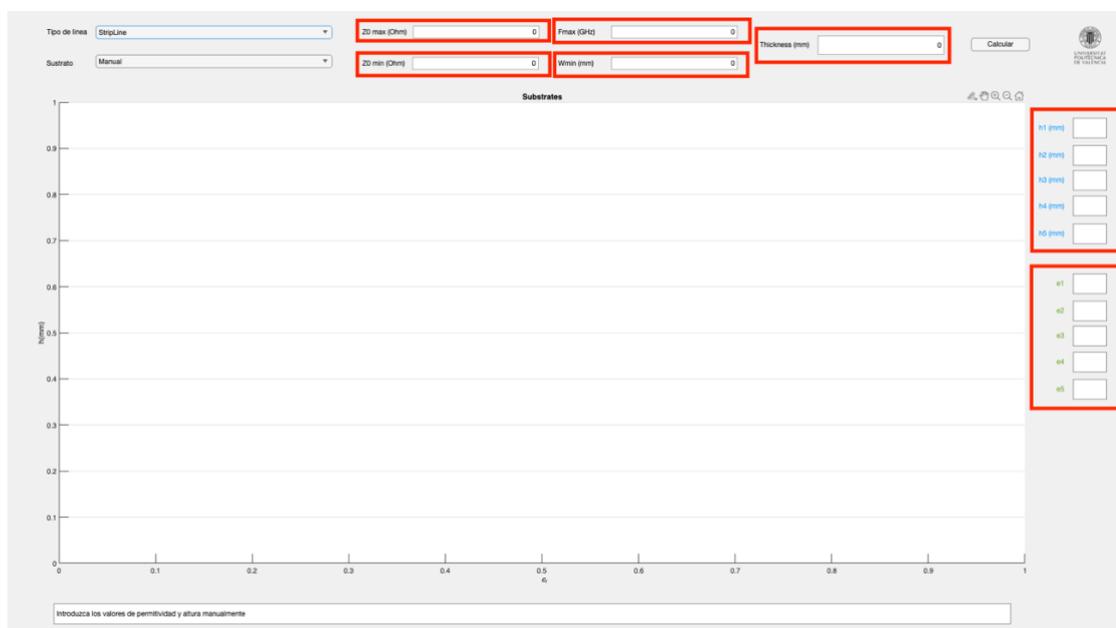


Ilustración 12: Campos a rellenar por el usuario

Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab

Una vez introducidos los distintos valores por parte del usuario, este debería presionar el botón calcular y el programa rellenaría la gráfica que aparece en pantalla con una matriz a color indicando con color verde los sustratos que han pasado los filtros descritos y que podrían ser viables para las funciones del usuario y de rojo los sustratos que no cumplen con los requisitos.

La forma de utilizar los datos dentro del software es la siguiente, en primer lugar los datos de las alturas y permitividades se recogen en dos vectores que se combinarán posteriormente en una matriz que establezca cada posibilidad de altura y permitividad, y poder hacer los cálculos valor a valor. En la imagen siguiente se observan los datos de los sustratos relacionados con el fabricante Rogers y su manera de escribirlo en el software.

```
value = str2double(app.SustratoDropDown.Value);

if value == 1
    app.ComentariosEditField.Value='';
    h=[0.13, 0.25, 0.51, 0.76, 1.52];
    er=[3, 3.6, 6.5, 11.2];
    nombres={'R03003', 'R03035', 'R03006', 'R03010'};
    app.ComentariosEditField.Value='Incompatibilidad de R03006 y R03010 para h=0.76 y h=1.52. Y de R03035 para h=0.13 y h=0.76';
```

*Ilustración 13: Campos de datos de sustratos preinstalados*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

Para calcular si el sustrato es adecuado, se realizan dos procesos distintos, que rellenan cada uno una matriz del mismo tamaño de la generada con todas las combinaciones de sustrato/permitividad, y donde en la misma posición de cada combinación introducen un “1” si cumple la condición y un “0” si no la cumple. En el caso de haber seleccionado una línea Microstrip el código que rige la capacidad de los sustratos de llegar a la impedancia máxima con el ancho mínimo disponible es el siguiente:

```
%Se compara la Zmax calculada con la Zmax pedida al usuario
SubstA=Z0max>=Zomax;

A=Zomin/60*sqrt(1/2*(ER+1)+(ER-1)./(ER+1).*(0.23+0.11./ER));
B=377*pi/2/Zomin./sqrt(ER);

WMAX_H_1=8*exp(A)./(exp(2*A)-2);
WMAX_H_2=2/pi*(B-1-log(2*B-1)+1/2*(ER-1)./ER.*(log(B-1)+0.39-0.61./ER));

WMAX_H=zeros(size(ER));
WMAX_H(logical(WMAX_H_1<=2))=WMAX_H_1(logical(WMAX_H_1<=2));
WMAX_H(logical(WMAX_H_2>2))=WMAX_H_2(logical(WMAX_H_2>2));
```

*Ilustración 14: Código primer filtro para líneas Microstrip*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

En cuanto a la segunda condición de que el ancho máximo necesario para conseguir la  $Z_{min}$  no genere problemas de resonancias transversales queda reflejado en la imagen siguiente.

```
H=h'*ones(1,length(er));

WMAX=H.*WMAX_H;
ERef=1+1/2*(ER-1).*(1+1./sqrt((1+10./WMAX_H)));
LAMBDA=3e8/f/1e9*1e3./sqrt(ERef);
SubstB=WMAX<0.2*LAMBDA;
```

*Ilustración 15: Código segundo filtro para líneas Microstrip*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

Por último se crearía la matriz descrita anteriormente rellena con un 1 si el sustrato se prevé que sea adecuado y con un “0” si no cumple con las características deseadas.

En cuanto a si el usuario desea emplear el sustrato en una línea Stripline el software empleará las siguientes líneas de código. En primer lugar al igual que con las Microstrip se evaluará la capacidad de conseguir la  $Z_{max}$ .

```
%Si la opcion elegida es la de Stripline
elseif valor == 2

%Se duplica la h para obtener la B
B=2*h;

wmin= repmat(wmin,1, length(B));
wmin_B=wmin./B;

[ER,Wmin_B]=meshgrid(er,wmin_B);

%Se calcula la Zmax disponible debido a la h, la T y Wmin
We_B=(Wmin_B-(0.35-Wmin_B).^2);
[ER,BB]=meshgrid(er,B);
We=We_B.*BB;
Zk2=(1/2*We).*(1+(T/pi./We).*(1+log((4*pi/T)*We)+(0.51*pi*(T./We).^2)));
Z0max=(60./sqrt(ER)).*log(4/pi*BB./Zk2);

%Se compara la Zmax calculada con la Zmax pedida al usuario
SubstA=Z0max>=Zomax;
```

*Ilustración 16: Código primer filtro para líneas Stripline*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

Posteriormente se realizará lo explicado tanto en las líneas Microstrip como en la solución del problema consistente en la comprobación de que el ancho máximo al que se va a someter al sistema que coincide con la  $W_{min}$  impresa en el circuito no supere 0,2 veces el valor de la longitud de onda para que la señal se pueda propagar correctamente por la línea. Y se generará la nueva matriz con un 1 en la posición de un sustrato que se considera viable para el usuario y un 0 para los sustratos que no se han considerado viables. Al igual que con las líneas Microstrip esta matriz se dibujará en el grafico que se mostrará al usuario en pantalla pintando en color verde las combinaciones que posean un 1 en la matriz, indicando que esos sustratos podrían ser viables para el propósito del usuario, y en rojo las matrices que posean un 0 indicando que estos no serían interesantes para el usuario

```
% Ahora se calculará el Wmax a partir del Zmin y se comprobará
% que no sea mas grande que 0.2*lambda
Zk1=((2./(1-T./BB)).*log((1./(1-T./BB))+1))-((1./(1-T./BB))-1).*log((1./(1-T./BB).^2)-1));

WMAX_B=(1-(T./BB)).*(94.15./(Zomin*sqrt(ER)))-(1/pi*Zk1);

WMAX=BB.*WMAX_B;
LAMBDA=3e8/f/1e9+1e3./sqrt(ER);
SubstB=WMAX<0.2*LAMBDA;

TT=SubstA.*SubstB;
```

*Ilustración 17: Código segundo filtro para líneas Stripline*

*Fuente: Elaboración propia a partir de Matlab*

## 5. Ejemplo de aplicación

La mejor forma de mostrar el funcionamiento del programa es ver un ejemplo comprobando la utilidad del mismo. Para ésto emplearemos uno de los circuitos típicos en el campo de las líneas de transmisión, los acopladores direccionales. Estos acopladores direccionales se caracterizan por ser elementos que permiten medir separadamente ondas positivas y negativas de manera directa. Para ejemplificar el funcionamiento del programa se diseñará un acoplador direccional. Un primer diseño se realizará a partir de líneas de transmisión ideales, y posteriormente se implementará mediante un líneas Microstrip. Adicionalmente se obtendrá el layout para ver el diseño y se harán pruebas mediante el uso del software para calcular los distintos sustratos que se podrían emplear.

Para esta prueba el acoplador direccional que se ha elegido es un acoplador direccional del tipo Branch-Line de dos etapas. En la Ilustración 18 se muestra el diseño realizado mediante el programa AWR de un acoplador direccional del tipo Branch Line. Este acoplador está adaptado a 50  $\Omega$  donde se busca una constante de acoplo de  $C = 7\text{dB}$ .

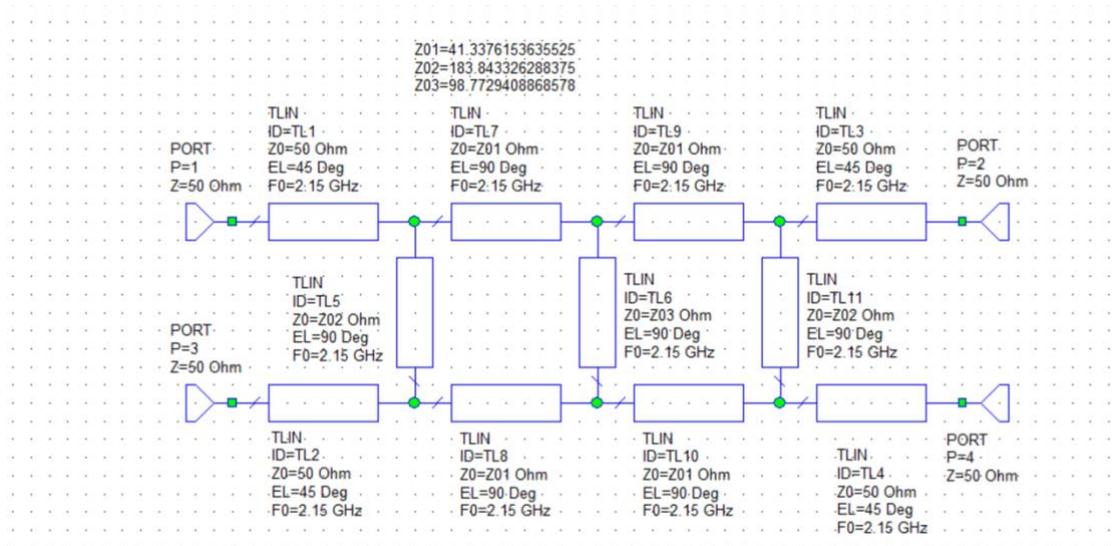


Ilustración 18: Diseño de un acoplador direccional Branch Line de dos etapas con líneas de transmisión ideales

Fuente: Elaboración propia a partir de AWR

Tras la realización de este diseño se han obtenido una serie de impedancias características para las distintas líneas que componen el circuito. Estas impedancias características son las siguientes:

Z01	41,34 $\Omega$
Z02	183,84 $\Omega$
Z03	98,77 $\Omega$

De esta información obtenemos que la impedancia máxima que debe conseguirse es de 183,84  $\Omega$  y la impedancia mínima de 41,34  $\Omega$ . Dada la relación explicada anteriormente, para la impedancia máxima, se requerirá un ancho de línea mínimo mientras que para la impedancia máxima que requerirá un ancho de línea máximo.

Una vez diseñado el circuito con líneas ideales el siguiente paso para el diseño de un acoplador direccional es el implementarlo con las líneas de transmisión que deseemos, como se ha dicho anteriormente el ejemplo se va a hacer con una línea de transmisión Microstrip.

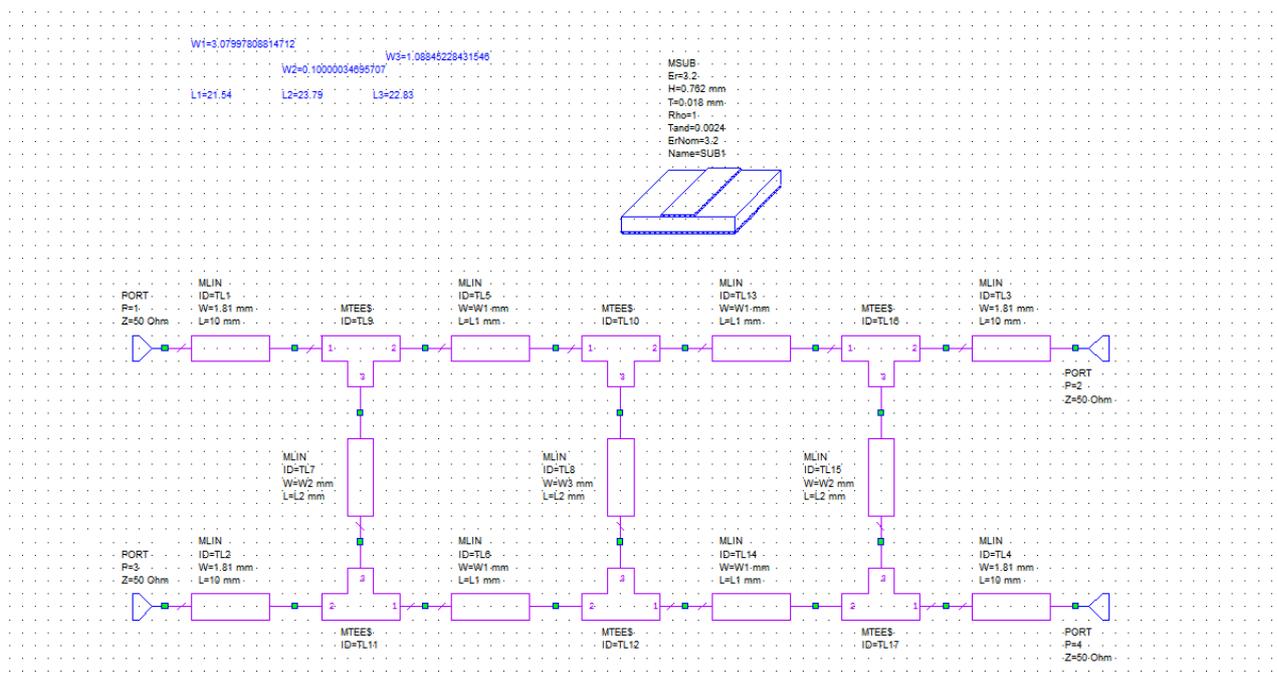


Ilustración 19: Acoplador direccional Branch Line con de dos etapas con línea Microstrip

Fuente: Elaboración propia a partir de AWR

Una vez se ha diseñado el circuito se obtiene el layout con el dibujo que ha de hacerse en el sustrato formando las propias “líneas de transmisión”. En la Ilustración 20 se observa el layout diseñado a partir del diseño del acoplador direccional mostrado anteriormente (habiendo escogido a modo de ejemplo un determinado sustrato), donde se distingue un cambio en el ancho de las líneas coincidiendo más ancho más grande con las impedancias más pequeñas y el ancho más pequeño, casi imperceptible, para la impedancia máxima.

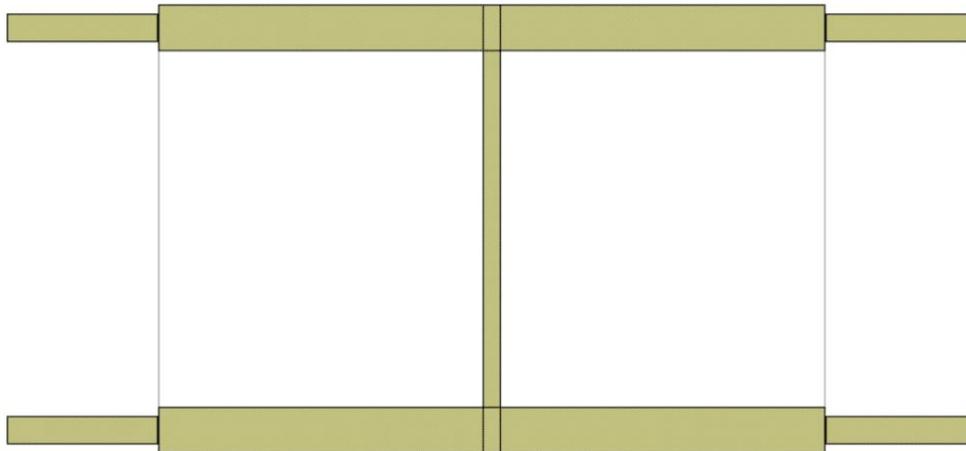


Ilustración 20: Layout del acoplador direccional Branch Line

Fuente: Elaboración propia a partir de AWR

Para las pruebas que vamos a realizar se van a mostrar una serie de resultados que representaran la variación de los sustratos disponibles a medida que varían tanto la frecuencia a la que el usuario pretende utilizar el circuito como el ancho mínimo que el usuario puede conseguir del sustrato.

En primer lugar se va a evaluar la aplicación de este acoplador direccional mediante una línea de transmisión Microstrip. Para todas las pruebas emplearemos los valores correspondientes a los sustratos de Rogers RO3000. La primera frecuencia de trabajo que se va a probar es 2.15GHz. Y para el ancho mínimo vamos a elegir 0.05mm, estos anchos suelen oscilar entre los 0.2mm y los 0.05mm. Por lo tanto en primer lugar introduciríamos en el software los valores de:

- $Z_{\max} = 183,84\Omega$
- $Z_{\min} = 41,34\Omega$
- $f = 2,15\text{GHz}$
- $W_{\min} = 0,05\text{mm}$

Los resultados de esta simulación son los mostrados en la Imagen 19 y muestra que los únicos sustratos disponibles son el RO3003 y RO3035 ambos con un valor de altura de  $h = 1,52\text{mm}$  o  $h = 0,76\text{mm}$ .

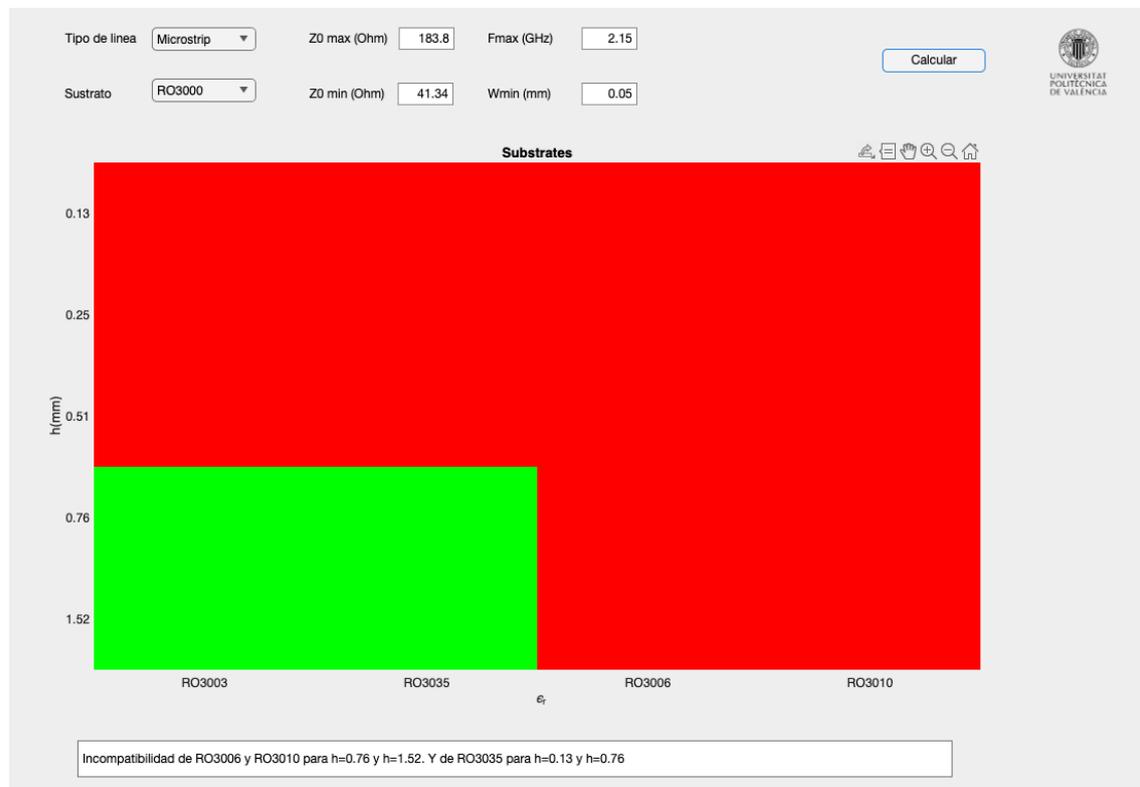


Ilustración 21: Prueba 1 Microstrip  $f=2,15\text{GHz}$  y  $W_{\min}=0,05\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

Tras esta prueba realizaremos otra alternativa que sería si el ancho mínimo que el usuario pudiera conseguir fuera de  $W_{\min}=0,15\text{mm}$  en lugar de los  $0,05\text{mm}$ , planteados en la primera prueba.

Tras introducir este nuevo valor en el software, para líneas Microstrip con el sustrato con la línea de sustratos RO3000 obtenemos la respuesta que se observa en la Ilustración 21 y es que ningún sustrato parece viable para la aplicación planteada y es que al aumentar el ancho mínimo conseguible la impedancia máxima que se puede conseguir disminuye por tanto esta línea no podría llegar a los  $183,84\ \Omega$  necesarios para formar este acoplador direccional Branch Line.



Ilustración 22: Prueba 2 Microstrip  $f=2,15\text{GHz}$  y  $W_{\min}=0,15\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado la frecuencia de trabajo también es importante, ya que como se ha explicado anteriormente el ancho máximo no puede superar el 20% del valor de la longitud de onda, por lo que si la frecuencia de trabajo aumentara la longitud de onda disminuiría linealmente con la frecuencia haciendo más restrictivo la toma de decisión. Debido a esto la siguiente prueba consistirá en aumentar la frecuencia de trabajo hasta los GHz para comprobar que efecto tiene esto en la selección de los sustratos disponibles por parte del software.

Y es que tras esta modificación los datos a introducir para la línea de sustratos RO3000 en líneas Microstrip serían los siguientes:

- $Z_{\max} = 183,84\Omega$
- $Z_{\min} = 41,34\Omega$
- $f = 7,5\text{GHz}$
- $W_{\min} = 0,05\text{mm}$

Tras esta modificación se obtiene el resultado mostrado en la Ilustración 23 y es que al aumentar la frecuencia el sustrato RO3003 a la altura de  $h = 1.52\text{mm}$  deja de ser adecuado ya que el ancho máximo supera el 20% de la longitud de onda que ha pasado de ser 14cm a 4cm.

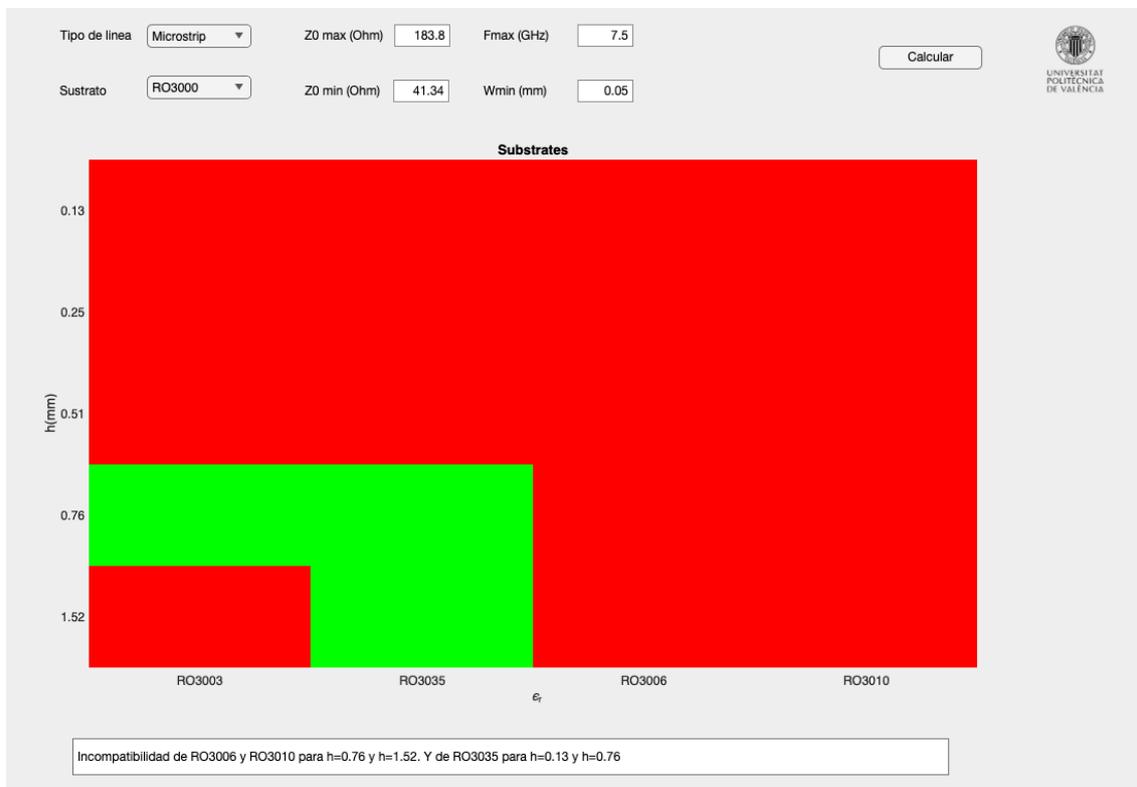


Ilustración 23: Prueba 3 Microstrip  $f=7,5\text{GHz}$  y  $W_{\text{min}}=0,05\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

Lo lógico es que si siguiéramos aumentando la frecuencia dejará de ser adecuado otro sustrato por lo que se hará una segunda prueba a 10GHz de frecuencia de trabajo sin alterar el resto de parámetros.

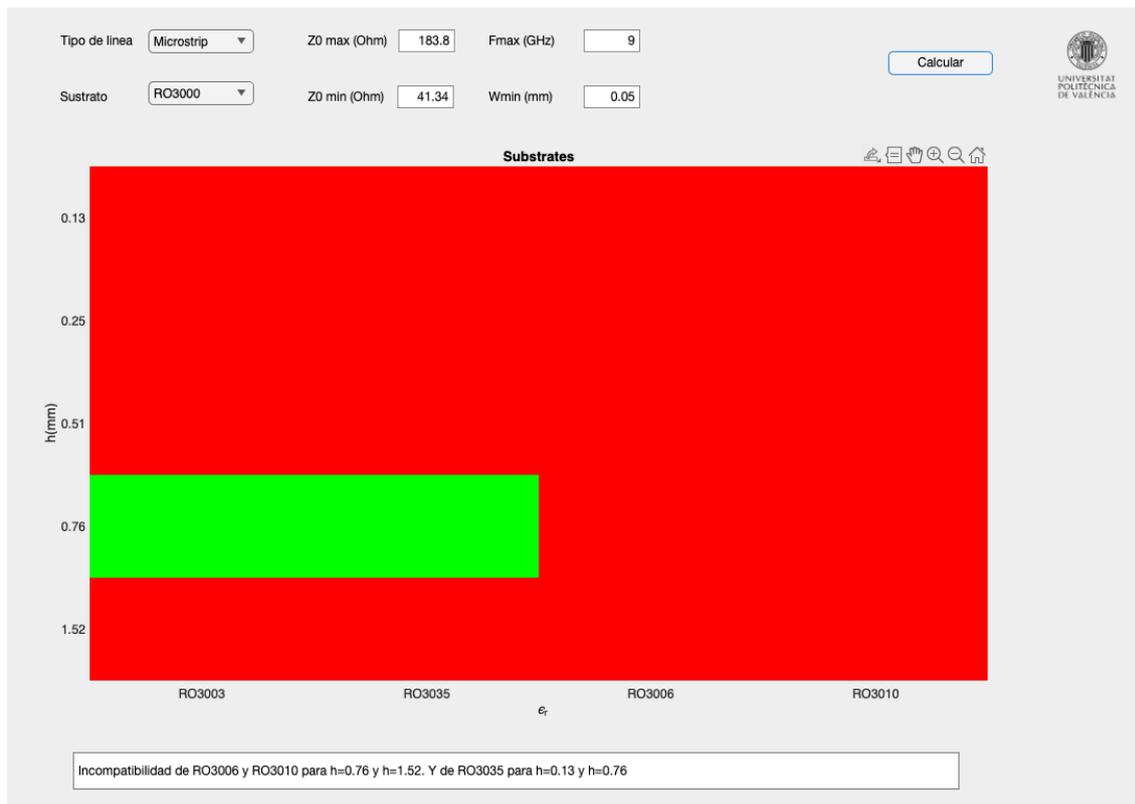


Ilustración 25: Prueba 4 Microstrip  $f=9\text{GHz}$  y  $W_{\min}=0,05\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

Tras este aumento de la frecuencia de trabajo el sustrato RO3035 a la altura de  $h = 0,76\text{mm}$  deja de ser adecuado para el acoplador direccional planteado, ya que no es capaz de conseguir la impedancia mínima requerida, por lo que solo quedarán disponibles de la lista de sustratos el RO3003 y RO3035 a la de altura de  $h = 0,76\text{mm}$ .

Al comparar estos resultados con los obtenidos en la primera prueba, que comparte con esta todos los parámetros a excepción de la frecuencia de trabajo, es lógico que la altura que ha dejado de ser adecuada para ambos sustratos sea la de  $h = 1,52\text{mm}$  y no la de  $h = 0,76\text{mm}$ . La razón es que para conseguir la  $Z_{\min}$  se necesita la relación  $W/h$  máxima, y que este mismo valor de  $W/h$  necesario para que la línea consiga esta impedancia hace que tenga que aumentar la  $W$  proporcionalmente al aumento de  $h$  para mantener su valor, por lo que si la  $h$  es mayor implicaría la necesidad de aplicar un valor mayor de  $W$  para que esta relación se mantenga, esto es lo que hace que esta altura no sea adecuada para la aplicación de este acoplador direccional ya que el ancho  $W$  de la línea sobrepasaría el 20% de la longitud de onda.

Como ejemplo de aplicación del funcionamiento del software en cuanto a las líneas Stripline se empleará otro diseño, debido a que estas líneas de transmisión nos permiten conseguir unas impedancias características menores que las Microstrip, no llegando a más de  $120 \Omega$  para valores realistas de  $W/h$ , por tanto el ejemplo anterior no es representativo.

El circuito elegido es el que se encuentra en la Ilustración 25, se ha escogido este sencillo acoplador direccional Branch Line con una constante de acoplo de 7dB de una etapa, este acoplador direccional consigue unas impedancia más baja que el acoplador anterior de dos etapas y facilita la realización de pruebas donde realmente se ponga a prueba la utilidad de la herramienta ya que para un circuito con mayor impedancia los cambios tanto en la frecuencia como en el ancho mínimo tendrían menor efecto y la demostración sería menos ilustrativa ya que la mayor parte de los sustratos no pueden llegar a una gran impedancia.

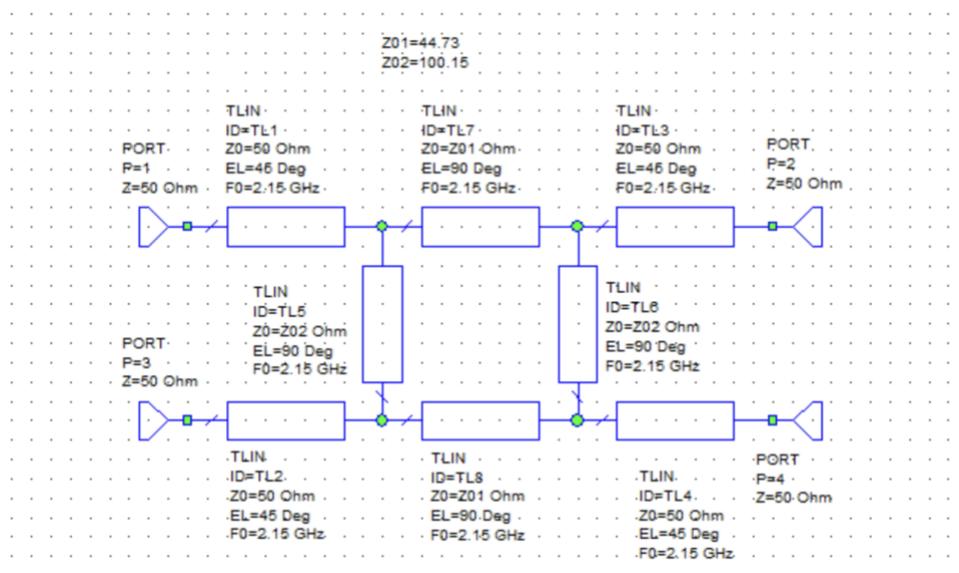


Ilustración 27: Acoplador Direccional Branch Line de una etapa

Fuente: Diapositivas fundamentos de transmisión.

Como primera demostración del programa para una línea Stripline se utilizará un valor de  $t=20 \mu\text{m}$ , estos valores oscilan entre los  $18 \mu\text{m}$  y los  $35 \mu\text{m}$  en los casos más extremos. Si se adapta a  $50 \Omega$  el diseño de la Ilustración 25 se observa que la  $Z_{\text{min}}=44,73 \Omega$  y el  $Z_{\text{max}}=100,15 \Omega$  que son los valores que se introducirán en el software.

Para la primera prueba de introducirán los mismos valores que introducimos en el primer ejemplo de la línea Microstrip, con un ancho mínimo de 0,05 mm y a una frecuencia  $f=2,15$  GHz. Para el grueso de la tira se ha elegido un valor de  $t=0.02$  mm, estos valores oscilan entre los 0,6 mm y los 12 mm, siendo más comunes los más delgados.



Ilustración 29: Prueba 1 Stripline  $f=2,15$ GHz  $W_{min}=0,05$ mm y  $t=0,02$ mm

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar en la Ilustración 26 que se podrían emplear para este acoplador Branch line de una etapa los sustratos RO3003 y RO3035 a todas las alturas que ofrece el fabricante menos la de  $h=0,13$ mm. A continuación se va a disminuir el ancho mínimo que el usuario puede conseguir del sustrato, esto debería hacer más restrictivo y debería dificultar a los valores de las alturas más bajas a conseguir el valor de la impedancia máxima.



Ilustración 27: Prueba 2 Stripline  $f=2,15\text{GHz}$   $W_{\min}=0,2\text{mm}$  y  $t=0,02\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 28 se observa que ha sucedido lo previsto y es que para conseguir la misma impedancia máxima los valores más pequeños de  $h$  necesitan valores más inferiores del ancho  $W$  que está restringido por el valor de  $W_{\min} = 2\text{mm}$ .

La siguiente prueba que se va a realizar es realizar un incremento de la frecuencia, esto hará disminuir el ancho de banda, generando unas limitaciones en los valores más elevados de la altura  $h$  ya que para conseguir un alto valor de  $W/h$  los valores de  $W$  necesariamente deberán ser mayores que en alturas más pequeñas provocando que este ancho sea mayor que 0,2 veces la longitud de onda.



Ilustración 28: Prueba 3 Stripline  $f=10\text{GHz}$   $W_{\min}=0,05\text{mm}$  y  $t=0,02\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

Pese a este aumento de la frecuencia que está reflejada en la Ilustración 29 se puede observar que los sustratos adecuados son los mismos que para el primer ejemplo, lo que indica que la frecuencia no es la variable restrictiva por lo que la impedancia mínima se puede conseguir sin problemas con estas características. Sabiendo esto se va a seguir aumentando la frecuencia para conocer hasta cual estos sustratos funcionan sin problemas para generar este acoplador direccional Branch Line de constante de acoplo  $C=7\text{dB}$ .

Como se observa en la Ilustración 30 a  $15\text{GHz}$  el sustrato RO3003 deja de ser adecuado a la altura de  $h=1.52\text{mm}$ , si continuáramos aumentando la frecuencia a  $16\text{GHz}$  se observan los resultados que se reflejan en la Ilustración 31, que indica que a esta altura de  $h=1.52\text{mm}$  el sustrato RO30035 tampoco estaría disponible, coincidiendo con lo que estaba esperado.



Ilustración 29: Prueba 4 Stripline  $f=15\text{GHz}$   $W_{\text{min}}=0,05\text{mm}$  y  $t=0,02\text{ mm}$

Fuente: Elaboración propia



Ilustración 30: Prueba 5 Stripline  $f=16\text{GHz}$   $W_{\text{min}}=0,05\text{mm}$  y  $t=0,02\text{mm}$

Fuente: Elaboración propia

## 6. Conclusión

En este trabajo de final de grado se puede concluir que se han conseguido completar los objetivos que se tenían. Se ha conseguido diseñar una herramienta capaz de orientar a un usuario acerca de que sustrato puede ser adecuado para el uso que se quiera. Además en esta herramienta se han añadido una serie de sustratos de los fabricantes más conocidos para simplificar la elección al usuario, sin descartar la opción de que el usuario pueda introducir los datos una serie de sustratos de forma manual si así lo prefiriera. Otro uso de este software puede ser educativo ya que es una herramienta que ayuda de una forma bastante intuitiva a entender como varían los distintos parámetros de las líneas de transmisión en función de cómo varia su construcción. Por todo esto se puede concluir que este trabajo ha sido un éxito creando una herramienta útil, practica y sencilla dentro del ecosistema de las líneas de transmisión.

## Bibliografía

1. Diferencias entre Stripline vs. Microstrip en la PCB: Altium  
<https://resources.altium.com/es/p/stripline-vs-microstrip-understanding-their-differences-and-their-pcb-routing-guidelines> (2017).
2. Single microstrip line. <https://qucs.sourceforge.net/tech/node75.html>.
3. Waseem, U. Stripline vs Microstrip: A Comprehensive Comparison.  
<https://www.wevolver.com/article/stripline-vs-microstrip>.
4. Hammood, M. K. Impedance of Stripline. Tikrit Journal of Pure Science 17, (2012).
5. Presentación Fundamentos de transmisión UPV curso 2022/2023
6. Presentaciones Líneas de transmisión UPV curso 2023/2024

## Anexo 1 Código de la herramienta

```
classdef Subs < matlab.apps.AppBase
```

```
% Properties that correspond to app components
```

```
properties (Access = public)
```

```

UIFigure          matlab.ui.Figure
ThicknessmmEditField  matlab.ui.control.NumericEditField
ThicknessmmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
TipodelineaDropDownLabel  matlab.ui.control.Label
TipodelineaDropDown      matlab.ui.control.DropDown
SustratoDropDown      matlab.ui.control.DropDown
SustratoDropDownLabel  matlab.ui.control.Label
ComentariosEditField  matlab.ui.control.EditField
e5EditField          matlab.ui.control.EditField
e5EditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
e4EditField          matlab.ui.control.EditField
e4EditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
e3EditField          matlab.ui.control.EditField
e3EditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
e2EditField          matlab.ui.control.EditField
e2EditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
e1EditField          matlab.ui.control.EditField
e1EditFieldLabel    matlab.ui.control.Label
h5mmEditField        matlab.ui.control.EditField
h5mmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
h4mmEditField        matlab.ui.control.EditField
h4mmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
h3mmEditField        matlab.ui.control.EditField
h3mmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
h2mmEditField        matlab.ui.control.EditField
h2mmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
h1mmEditField        matlab.ui.control.EditField
h1mmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
Image                matlab.ui.control.Image

```

```

CalcularButton      matlab.ui.control.Button
WminmmEditField     matlab.ui.control.NumericEditField
WminmmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
FmaxGHzEditField     matlab.ui.control.NumericEditField
FmaxGHzEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
Z0minOhmEditField    matlab.ui.control.NumericEditField
Z0minOhmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
Z0maxOhmEditField    matlab.ui.control.NumericEditField
Z0maxOhmEditFieldLabel  matlab.ui.control.Label
UIAxes              matlab.ui.control.UIAxes

```

```
end
```

```
% Callbacks that handle component events
```

```
methods (Access = private)
```

```
% Button pushed function: CalcularButton
```

```
function CalcularButtonPushed(app, event)
```

```
%Se obtiene el valor de los campos h y er
```

```
value = str2double(app.SustratoDropDown.Value);
```

```
if value == 1
```

```
    app.ComentariosEditField.Value="";
```

```
    h=[0.13, 0.25, 0.51, 0.76, 1.52];
```

```
    er=[3, 3.6, 6.5, 11.2];
```

```
    nombres={'RO3003', 'RO3035', 'RO3006', 'RO3010'};
```

```
    app.ComentariosEditField.Value='Incompatibilidad de RO3006 y RO3010 para  
h=0.76 y h=1.52. Y de RO3035 para h=0.13 y h=0.76';
```

```
elseif value == 2
```

```
    app.ComentariosEditField.Value="";
```

```
    h=[0.102, 0.185, 0.221, 0.272, 0.323, 0.424, 0.526, 0.78, 0.831, 1.542];
```

```
    er=[3.5, 3.55, 3.55];
```

```
app.ComentariosEditField.Value='Incompatibilidad de R=4350B y R=4835 para  
h=0.221, h=0.323, h=0,424 y h=0.831. Y de RO4003 para h=0.102, h=0.185, h=0,272 y  
h=0.78.';
```

```
nombres={'RO4003', 'RO4350B', 'RO4835'};
```

```
elseif value == 3
```

```
app.ComentariosEditField.Value=";
```

```
h=[0.127, 0.252, 0.508, 0.787, 1.575];
```

```
er=[2.2, 2.33];
```

```
nombres={'RT/duroid5870', 'RT/duroid5880'};
```

```
elseif value == 4
```

```
app.ComentariosEditField.Value=";
```

```
h=[0.25, 0.5, 0.76, 1.52];
```

```
er=3.5;
```

```
nombres={'RF-35'};
```

```
elseif value == 5
```

```
app.ComentariosEditField.Value=";
```

```
h=[0.09, 0.13, 0.19, 0.25, 0.51, 0.76, 0.79, 1.52];
```

```
er=2.2;
```

```
nombres={'TLY-5'};
```

```
elseif value == 6
```

```
app.ComentariosEditField.Value=";
```

```
h=[0.508,0.762, 1.524];
```

```
er=4.5;
```

```
nombres={'AD450'};
```

```
elseif value == 7
```

```
app.ComentariosEditField.Value='Introduce los valores de altura y permitividad';
```

```
% Obtenemos la entrada
```

```
e1_str = app.e1EditField.Value;
```

```
e2_str = app.e2EditField.Value;
```

```
e3_str = app.e3EditField.Value;
```

```
e4_str = app.e4EditField.Value;
```

```
e5_str = app.e5EditField.Value;
```

```
% Convertir las entradas de char a double
```

```
e1 = str2double(e1_str);
```

```
e2 = str2double(e2_str);
```

```
e3 = str2double(e3_str);
```

```
e4 = str2double(e4_str);
```

```
e5 = str2double(e5_str);
```

```
% Crear el vector er con los valores numéricos
```

```
er = [e1, e2, e3, e4, e5];
```

```
% nan_indices = find(isnan(er));
```

```
% er(nan_indices) = [];
```

```
nan_indices = isnan(er);
```

```
er(nan_indices) = [];
```

```
%Repetimos el proceso con las h
```

```
h1_str = app.h1mmEditField.Value;
```

```
h2_str = app.h2mmEditField.Value;
```

```
h3_str = app.h3mmEditField.Value;
```

```
h4_str = app.h4mmEditField.Value;
```

```
h5_str = app.h5mmEditField.Value;
```

```
%Convertir las entradas de char a double
```

```
h1 = str2double(h1_str);
```

```
h2 = str2double(h2_str);
```

```
h3 = str2double(h3_str);
```

```
h4 = str2double(h4_str);
```

```
h5 = str2double(h5_str);
```

```
%Crear el vector h con los valores numéricos
```

```
h = [h1, h2, h3, h4, h5];
```

```
nan_indices = isnan(h);
```

```
h(nan_indices) = [];
```

```
elseif value == 8
    app.ComentariosEditField.Value='Introduzca todos los campos';
```

```
else
    app.ComentariosEditField.Value='Introduzca todos los campos';
end
```

```
Zomax = app.Z0maxOhmEditField.Value;
wmin = app.WminmmEditField.Value;
f = app.FmaxGHzEditField.Value;
Zomin = app.Z0minOhmEditField.Value;
T = app.ThicknessmmEditField.Value*1e-3;
```

```
valor = str2double(app.TipodelineaDropDown.Value);
```

```
if valor == 1
```

```
vwmin=repmat(wmin,1, length(h));
wmin_H=vwmin./h;
```

```
[ER,Wmin_H]=meshgrid(er,wmin_H);
Z0max=zeros(size(ER));
ERef=1+1/2*(ER-1).*(1+1./sqrt((1+10./Wmin_H)));
```

```
Z0max(logical(Wmin_H<1))=60./sqrt(ERef(logical(Wmin_H<1))).*log(8./Wmin_H(logical(Wmin_
H<1))+1/4*Wmin_H(logical(Wmin_H<1)));
```

```
Z0max(logical(Wmin_H>=1))=120*pi./sqrt(ERef(logical(Wmin_H>=1)))./(Wmin_H(logical(Wmin_
H>=1))+1.393+0.667*log(Wmin_H(logical(Wmin_H>=1))+1.444));
```

```
SubstA=Z0max>=Zomax;
```

```
A=Zomin/60*sqrt(1/2*(ER+1))+(ER-1)./(ER+1).*(0.23+0.11./ER);
```

```
B=377*pi/2/Zomin./sqrt(ER);
```

```

WMAX_H_1=8*exp(A)./(exp(2*A)-2);
WMAX_H_2=2/pi*(B-1-log(2*B-1)+1/2*(ER-1))./ER.*(log(B-1)+0.39-0.61./ER));

WMAX_H=zeros(size(ER));
WMAX_H(logical(WMAX_H_1<=2))=WMAX_H_1(logical(WMAX_H_1<=2));
WMAX_H(logical(WMAX_H_2>2))=WMAX_H_2(logical(WMAX_H_2>2));

H=h*ones(1,length(er));

WMAX=H.*WMAX_H;
ERef=1+1/2*(ER-1).*(1+1./sqrt((1+10./WMAX_H)));
LAMBDA=3e8/f/1e9*1e3./sqrt(ERef);
SubstB=WMAX<0.2*LAMBDA;

TT=SubstA.*SubstB;

elseif valor == 2

B=2*h;

vwmin= repmat(wmin, 1, length(B));
wmin_B=vwmin./B;

[~,Wmin_B]=meshgrid(er,wmin_B);

We_B=(Wmin_B-(0.35-Wmin_B).^2);
[ER,BB]=meshgrid(er,B);
We=We_B.*BB;
Zk2=(1/2*We).*(1+(T/pi./We).*(1+log((4*pi/T)*We)+(0.51*pi*(T./We).^2)));
Z0max=(60./sqrt(ER)).*log(4/pi*BB./Zk2);

SubstA=Z0max>=Zomax;

```

```
Zk1=((2./(1-T./BB)).*log((1./(1-T./BB))+1))-((1./(1-T./BB))-1).*log((1./(1-T./BB).^2)-1));
```

```
WMAX_B=(1-(T./BB)).*((94.15./(Zomin*sqrt(ER)))-(1/pi*Zk1));
```

```
WMAX=BB.*WMAX_B;
```

```
LAMBDA=3e8/f/1e9*1e3./sqrt(ER);
```

```
SubstB=WMAX<0.2*LAMBDA;
```

```
TT=SubstA.*SubstB;
```

```
else
```

```
app.ComentariosEditField.Value='Introduzca todos los campos';
```

```
end
```

```
S=sum(TT,"all");
```

```
if S== 0
```

```
    map=[1 0 0];
```

```
else
```

```
    map=[1 0 0; 0 1 0];
```

```
end
```

```
imagesc(app.UIAxes, TT);
```

```
colormap(app.UIAxes, map);
```

```
ax=app.UIAxes;
```

```
vec_h = 1:length(h);
```

```
vec_er = 1:length(er);
```

```
ax.YTick= vec_h;
```

```
ax.XTick=vec_er;
```

```
h_cell = cell(size(h));

for i = 1:length(h)
    h_cell{i} = num2str(h(i));
end

ax.YTickLabel = h_cell;

if exist('nombres', 'var')

    ax.XTickLabel = nombres;
else

    er_cell = cell(size(er));
    for i = 1:length(er)
        er_cell{i} = num2str(er(i));
    end
    ax.XTickLabel = er_cell;
end

end

function SustratoDropDownValueChanged(app, event)
    value = str2double(app.SustratoDropDown.Value);

    if value == 7
```

```
app.e1EditField.Visible = 'on';
app.e1EditFieldLabel.Visible = 'on';
app.e2EditField.Visible = 'on';
app.e2EditFieldLabel.Visible = 'on';
app.e3EditField.Visible = 'on';
app.e3EditFieldLabel.Visible = 'on';
app.e4EditField.Visible = 'on';
app.e4EditFieldLabel.Visible = 'on';
app.e5EditField.Visible = 'on';
app.e5EditFieldLabel.Visible = 'on';
app.h1mmEditField.Visible = 'on';
app.h1mmEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.h2mmEditField.Visible = 'on';
app.h2mmEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.h3mmEditField.Visible = 'on';
app.h3mmEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.h4mmEditField.Visible = 'on';
app.h4mmEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.h5mmEditField.Visible = 'on';
app.h5mmEditFieldLabel.Visible = 'on';
app.ComentariosEditField.Value='Introduzca los valores de permitividad y altura
manualmente';
```

```
else
```

```
app.e1EditField.Visible = 'off';
app.e1EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e2EditField.Visible = 'off';
app.e2EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e3EditField.Visible = 'off';
app.e3EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e4EditField.Visible = 'off';
app.e4EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e5EditField.Visible = 'off';
app.e5EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h1mmEditField.Visible = 'off';
app.h1mmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h2mmEditField.Visible = 'off';
```

```

app.h2mmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h3mmEditField.Visible = 'off';
app.h3mmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h4mmEditField.Visible = 'off';
app.h4mmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h5mmEditField.Visible = 'off';
app.h5mmEditFieldLabel.Visible = 'off';

end

end

function TipodelineaDropDownValueChanged(app, event)
    value = str2double(app.TipodelineaDropDown.Value);

    if value == 2
        app.ThicknessmmEditField.Visible = 'on';
        app.ThicknessmmEditFieldLabel.Visible = 'on';
    else
        app.ThicknessmmEditField.Visible = 'off';
        app.ThicknessmmEditFieldLabel.Visible = 'off';
    end

end

end

end

methods (Access = private)

% Create UIFigure and components
function createComponents(app)

% Get the file path for locating images
pathToMLAPP = fileparts(mfilename('fullpath'));

% Create UIFigure and hide until all components are created
app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');

```

```
app.UIFigure.Position = [96 96 1129 791];
app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';

% Create UIAxes
app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.UIAxes, 'Substrates')
xlabel(app.UIAxes, '\epsilon_r')
ylabel(app.UIAxes, 'h(mm)')
zlabel(app.UIAxes, 'Z')
app.UIAxes.YGrid = 'on';
app.UIAxes.Position = [49 102 910 552];

% Create Z0maxOhmEditFieldLabel
app.Z0maxOhmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.Z0maxOhmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Z0maxOhmEditFieldLabel.Position = [299 745 81 22];
app.Z0maxOhmEditFieldLabel.Text = 'Z0 max (Ohm)';

% Create Z0maxOhmEditField
app.Z0maxOhmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.Z0maxOhmEditField.Position = [391 745 54 22];

% Create Z0minOhmEditFieldLabel
app.Z0minOhmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.Z0minOhmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.Z0minOhmEditFieldLabel.Position = [300 691 77 22];
app.Z0minOhmEditFieldLabel.Text = 'Z0 min (Ohm)';

% Create Z0minOhmEditField
app.Z0minOhmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.Z0minOhmEditField.Position = [390 691 54 22];

% Create FmaxGHzEditFieldLabel
app.FmaxGHzEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.FmaxGHzEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.FmaxGHzEditFieldLabel.Position = [472 745 68 22];
```

```

app.FmaxGHzEditFieldLabel.Text = 'Fmax (GHz)';

% Create FmaxGHzEditField
app.FmaxGHzEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.FmaxGHzEditField.Position = [568 745 54 22];

% Create WminmmEditFieldLabel
app.WminmmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.WminmmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.WminmmEditFieldLabel.Position = [472 691 66 22];
app.WminmmEditFieldLabel.Text = 'Wmin (mm)';

% Create WminmmEditField
app.WminmmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.WminmmEditField.Position = [568 691 54 22];

% Create CalcularButton
app.CalcularButton = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.CalcularButton.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@CalcularButtonPushed, true);
app.CalcularButton.Position = [859 723 100 23];
app.CalcularButton.Text = 'Calcular';

% Create Image
app.Image = uiimage(app.UIFigure);
app.Image.Position = [1015 694 68 78];
app.Image.ImageSource = fullfile(pathToMLAPP,
'marca_UPV_secundaria_negro300.png');

% Create h1mmEditFieldLabel
app.h1mmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.h1mmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.h1mmEditFieldLabel.FontColor = [0.0745 0.6235 1];
app.h1mmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.h1mmEditFieldLabel.Position = [970 580 48 22];
app.h1mmEditFieldLabel.Text = 'h1 (mm)';

```

#### % Create h1mmEditField

```
app.h1mmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.h1mmEditField.FontColor = [0 0 1];  
app.h1mmEditField.Visible = 'off';  
app.h1mmEditField.Position = [1033 573 31 35];
```

#### % Create h2mmEditFieldLabel

```
app.h2mmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.h2mmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.h2mmEditFieldLabel.FontColor = [0.0745 0.6235 1];  
app.h2mmEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.h2mmEditFieldLabel.Position = [970 533 48 22];  
app.h2mmEditFieldLabel.Text = 'h2 (mm)';
```

#### % Create h2mmEditField

```
app.h2mmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.h2mmEditField.FontColor = [0 0 1];  
app.h2mmEditField.Visible = 'off';  
app.h2mmEditField.Position = [1033 526 31 35];
```

#### % Create h3mmEditFieldLabel

```
app.h3mmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.h3mmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.h3mmEditFieldLabel.FontColor = [0.0745 0.6235 1];  
app.h3mmEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.h3mmEditFieldLabel.Position = [970 490 48 22];  
app.h3mmEditFieldLabel.Text = 'h3 (mm)';
```

#### % Create h3mmEditField

```
app.h3mmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.h3mmEditField.FontColor = [0 0 1];  
app.h3mmEditField.Visible = 'off';  
app.h3mmEditField.Position = [1033 483 31 35];
```

#### % Create h4mmEditFieldLabel

```
app.h4mmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.h4mmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.h4mmEditFieldLabel.FontColor = [0.0745 0.6235 1];  
app.h4mmEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.h4mmEditFieldLabel.Position = [970 445 48 22];  
app.h4mmEditFieldLabel.Text = 'h4 (mm)';
```

#### % Create h4mmEditField

```
app.h4mmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.h4mmEditField.FontColor = [0 0 1];  
app.h4mmEditField.Visible = 'off';  
app.h4mmEditField.Position = [1033 439 31 35];
```

#### % Create h5mmEditFieldLabel

```
app.h5mmEditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.h5mmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.h5mmEditFieldLabel.FontColor = [0.0745 0.6235 1];  
app.h5mmEditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.h5mmEditFieldLabel.Position = [970 398 48 22];  
app.h5mmEditFieldLabel.Text = 'h5 (mm)';
```

#### % Create h5mmEditField

```
app.h5mmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.h5mmEditField.FontColor = [0 0 1];  
app.h5mmEditField.Visible = 'off';  
app.h5mmEditField.Position = [1033 391 31 35];
```

#### % Create e1EditFieldLabel

```
app.e1EditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.e1EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.e1EditFieldLabel.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];  
app.e1EditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.e1EditFieldLabel.Position = [993 312 25 22];  
app.e1EditFieldLabel.Text = 'e1';
```

#### % Create e1EditField

```
app.e1EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.e1EditField.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];
app.e1EditField.Visible = 'off';
app.e1EditField.Position = [1033 305 31 35];

% Create e2EditFieldLabel
app.e2EditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.e2EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.e2EditFieldLabel.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];
app.e2EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e2EditFieldLabel.Position = [993 265 25 22];
app.e2EditFieldLabel.Text = 'e2';

% Create e2EditField
app.e2EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.e2EditField.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];
app.e2EditField.Visible = 'off';
app.e2EditField.Position = [1033 258 31 35];

% Create e3EditFieldLabel
app.e3EditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.e3EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.e3EditFieldLabel.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];
app.e3EditFieldLabel.Visible = 'off';
app.e3EditFieldLabel.Position = [993 222 25 22];
app.e3EditFieldLabel.Text = 'e3';

% Create e3EditField
app.e3EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');
app.e3EditField.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];
app.e3EditField.Visible = 'off';
app.e3EditField.Position = [1033 215 31 35];

% Create e4EditFieldLabel
app.e4EditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.e4EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
```

```
app.e4EditFieldLabel.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];  
app.e4EditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.e4EditFieldLabel.Position = [993 177 25 22];  
app.e4EditFieldLabel.Text = 'e4';
```

#### % Create e4EditField

```
app.e4EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.e4EditField.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];  
app.e4EditField.Visible = 'off';  
app.e4EditField.Position = [1033 170 31 35];
```

#### % Create e5EditFieldLabel

```
app.e5EditFieldLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.e5EditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.e5EditFieldLabel.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];  
app.e5EditFieldLabel.Visible = 'off';  
app.e5EditFieldLabel.Position = [993 130 25 22];  
app.e5EditFieldLabel.Text = 'e5';
```

#### % Create e5EditField

```
app.e5EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.e5EditField.FontColor = [0.4667 0.6745 0.1882];  
app.e5EditField.Visible = 'off';  
app.e5EditField.Position = [1033 123 31 35];
```

#### % Create ComentariosEditField

```
app.ComentariosEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'text');  
app.ComentariosEditField.Position = [80 35 847 36];
```

#### % Create SustratoDropDownLabel

```
app.SustratoDropDownLabel = uilabel(app.UIFigure);  
app.SustratoDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';  
app.SustratoDropDownLabel.Position = [63 691 50 22];  
app.SustratoDropDownLabel.Text = 'Sustrato';
```

#### % Create SustratoDropDown

```

app.SustratoDropDown = uidropdown(app.UIFigure);
app.SustratoDropDown.Items = {'RO3000', 'RO4000', 'RT/duroid', 'RF-35', 'TLY-5',
'AD450', 'Manual', 'Selecciona'};
app.SustratoDropDown.ItemsData = {'1', '2', '3', '4', '5', '6', '7', '8'};
app.SustratoDropDown.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@SustratoDropDownValueChanged, true);
app.SustratoDropDown.Position = [152 694 101 23];
app.SustratoDropDown.Value = '8';

```

#### % Create TipodelineaDropDown

```

app.TipodelineaDropDown = uidropdown(app.UIFigure);
app.TipodelineaDropDown.Items = {'Microstrip', 'StripLine', 'Selecciona'};
app.TipodelineaDropDown.ItemsData = {'1', '2', '3'};
app.TipodelineaDropDown.ValueChangedFcn = createCallbackFcn(app,
@TipodelineaDropDownValueChanged, true);
app.TipodelineaDropDown.Position = [152 744 101 23];
app.TipodelineaDropDown.Value = '3';

```

#### % Create TipodelineaDropDownLabel

```

app.TipodelineaDropDownLabel = xlabel(app.UIFigure);
app.TipodelineaDropDownLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.TipodelineaDropDownLabel.Position = [63 745 74 22];
app.TipodelineaDropDownLabel.Text = 'Tipo de linea';

```

#### % Create ThicknessmmEditFieldLabel

```

app.ThicknessmmEditFieldLabel = xlabel(app.UIFigure);
app.ThicknessmmEditFieldLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.ThicknessmmEditFieldLabel.Visible = 'off';
app.ThicknessmmEditFieldLabel.Position = [655 723 89 22];
app.ThicknessmmEditFieldLabel.Text = 'Thickness (mm)';

```

#### % Create ThicknessmmEditField

```

app.ThicknessmmEditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.ThicknessmmEditField.Visible = 'off';
app.ThicknessmmEditField.Position = [759 717 54 33];

```

```
% Show the figure after all components are created
app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

% App creation and deletion
methods (Access = public)

% Construct app
function app = Subs

% Create UIFigure and components
createComponents(app)

% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.UIFigure)

if nargin == 0
    clear app
end
end

% Code that executes before app deletion
function delete(app)

% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end
```

## Anexo 2 Objetivos de desarrollo sostenible

	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. <b>Fin de la pobreza.</b>				X
ODS 2. <b>Hambre cero.</b>				X
ODS 3. <b>Salud y bienestar.</b>				X
ODS 4. <b>Educación de calidad.</b>	X			
ODS 5. <b>Igualdad de género.</b>				X
ODS 6. <b>Agua limpia y saneamiento.</b>				X
ODS 7. <b>Energía asequible y no contaminante.</b>		X		
ODS 8. <b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>		X		
ODS 9. <b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>	X			
ODS 10. <b>Reducción de las desigualdades.</b>		X		
ODS 11. <b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>			X	
ODS 12. <b>Producción y consumo responsables.</b>			X	
ODS 13. <b>Acción por el clima.</b>				X
ODS 14. <b>Vida submarina.</b>				X
ODS 15. <b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				X
ODS 16. <b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				X
ODS 17. <b>Alianzas para lograr objetivos.</b>	X			

Durante la realización de este trabajo de fin de grado han tenido presencia algunos de los ODS en mayor o menos medida, los objetivos de desarrollo sostenible que más presencia tienen en este trabajo son el ODS 4 correspondiente a educación de calidad, el ODS 9, correspondiente a Industria Innovación e infraestructuras y el ODS 17 alianzas para conseguir objetivos.

**Educación de calidad (ODS 8):** el objetivo de esta herramienta de software es tanto para orientar a ciertos desarrolladores de circuitos como educativa ya que dada la simpleza de su interfaz gráfica es idónea para el aprendizaje en el ecosistema de los circuitos planares. Esta herramienta será publicada en la lista de aplicaciones de uso público en el apartado de Matlab App Designer.

**Industria Innovación e infraestructuras (ODS 9):** el objetivo final de la herramienta es poder orientar a diseñadores de circuitos para facilitarles la elección del sustrato y que este circuito pueda llegar a materializarse, por tanto ayuda a poder llevar una idea a un proceso industrial.

**Alianzas para conseguir objetivos (ODS 17):** este trabajo esta hilado a este objetivo de desarrollo sostenible más que por su contenido por lo que se pretende hacer con el software y es hacerlo público y compartirlo con aquellas universidades o centros de educación que lo quieran usar con fines educativos además de con cualquiera interesado en evaluar un sustrato para crear su circuito planar por lo que al igual que se ha mencionado en el ODS 8 el programa será de dominio público y cuyo uso estará permitido a cualquiera que este interesado.