

**Manuel Sellés Armendia**

## **Prácticas de la asignatura Ondas Electromagnéticas**

### **Práctica 6: Guía Rectangular**

**Profesores:** José Miguel Fuster (responsable de prácticas), María Morant y Luis Máñez

Recordad que tenéis que subir la memoria de la práctica a vuestro espacio compartido de Poliformat de la asignatura, dentro de la carpeta “Prácticas”. La memoria de la práctica consta de un único fichero pdf con todas las tareas que se soliciten en el guion de la práctica. El nombre de dicho documento pdf es “primerapellido\_segundoapellido\_Px.pdf”, donde x es el número de la práctica. Por ejemplo, para esta práctica 6, en mi caso, el nombre del fichero es “fuster\_escuder\_P6.pdf”.

Para la parte de simulación se utiliza el software “Matlab”, que podéis instalar en vuestros ordenadores con la licencia de la UPV. Además, disponéis de dicho software en los ordenadores del laboratorio de radiocomunicaciones. En la sección de “Recursos” de Poliformat, dentro de la carpeta correspondiente a la práctica actual, tenéis algunos scripts de Matlab que os servirán como punto de arranque para realizar las diferentes tareas que se solicitan. Si tenéis alguna duda sobre la práctica, o bien alguna sugerencia de mejora para años sucesivos, podéis contactarme en [jfuster@com.upv.es](mailto:jfuster@com.upv.es). Muchas gracias.

En esta sexta práctica vamos a utilizar Matlab para ilustrar la propagación de una onda electromagnética por una guía rectangular. Además, en la parte de instrumentación utilizaremos los bancos de microondas para hacer algunas medidas del nivel de señal en el interior de una guía rectangular.

#### **Parte I. Determinar los modos que se propagan a través de una guía rectangular**

Para ayudaros en esta parte de la práctica, tenéis que descargar el script de ayuda “calculadora\_modos.m” (Poliformat 7 Recursos 7 Prácticas 2024 7 Práctica 6).

Al ejecutar dicho script, obtendréis los modos que se propagan por una guía rectangular a partir de diferentes parámetros de la misma, como son la frecuencia de la onda electromagnética que se propaga ( $f$ ), las dimensiones de la guía ( $a$ ,  $b$ ) o el material dieléctrico con el que está rellena ( $\epsilon_r$ ,  $\mu_r$ ). Para modificar estos parámetros, podéis cambiar los valores de las siguientes líneas de código:

```
% Dimensiones de la guía
a=6e-2;
b=3e-2;
L=12e-2;

f=15*1e9; % Frecuencia de la onda electromagnética

% Permitividad y permeabilidad relativas del medio
epsr=1;
mur=1;
```

El listado de los modos que se propagan está ordenado por frecuencia de corte y se muestra en la ventana “Command Window” de Matlab. Para adjuntar el listado de los modos en la tarea 1 podéis utilizar una captura de pantalla.

**Tarea 1:** Calcular los modos que se propagan en una guía rectangular con dimensiones  $a = 6$  cm y  $b = 3$  cm y adjuntar un listado con los mismos en los siguientes supuestos:

- supuesto A [medio ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 10$  GHz]

```

Command Window

>> calculadora_modos
Modo TE_{10} - fc =2.5 GHz
Modo TE_{01} - fc =5 GHz
Modo TE_{20} - fc =5 GHz
Modo TE_{11} - fc =5.5902 GHz
Modo TM_{11} - fc =5.5902 GHz
Modo TE_{21} - fc =7.0711 GHz
Modo TM_{21} - fc =7.0711 GHz
Modo TE_{30} - fc =7.5 GHz
Modo TE_{31} - fc =9.0139 GHz
Modo TM_{31} - fc =9.0139 GHz
El número total de modos propagados por la guía rectangular a la frecuencia de f=10GHz es N=10

```

- supuesto B [medio ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 2,4$  GHz]

```

>> calculadora_modos
No se propaga ningún modo por la guía rectangular

```

- supuesto C [medio ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 2,5$  GHz]

```

>> calculadora_modos
No se propaga ningún modo por la guía rectangular

```

- supuesto D [medio ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 2,6$  GHz]

```

>> calculadora_modos
Modo TE_{10} - fc =2.5 GHz
El número total de modos propagados por la guía rectangular a la frecuencia de f=2.6GHz es N=1

```

- supuesto E [medio ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 6$  GHz]

```

>> calculadora_modos
Modo TE_{10} - fc =2.5 GHz
Modo TE_{01} - fc =5 GHz
Modo TE_{20} - fc =5 GHz
Modo TE_{11} - fc =5.5902 GHz
Modo TM_{11} - fc =5.5902 GHz
El número total de modos propagados por la guía rectangular a la frecuencia de f=6GHz es N=5

```

- supuesto F [medio ( $\epsilon_r = 5$ ,  $\mu_r = 1$ ),  $f = 6$  GHz]

```

>> calculadora_modos
Modo TE_{10} - fc =1.118 GHz
Modo TE_{01} - fc =2.2361 GHz
Modo TE_{20} - fc =2.2361 GHz
Modo TE_{11} - fc =2.5 GHz
Modo TM_{11} - fc =2.5 GHz
Modo TE_{21} - fc =3.1623 GHz
Modo TM_{21} - fc =3.1623 GHz
Modo TE_{30} - fc =3.3541 GHz
Modo TE_{31} - fc =4.0311 GHz
Modo TM_{31} - fc =4.0311 GHz
Modo TE_{02} - fc =4.4721 GHz
Modo TE_{40} - fc =4.4721 GHz
Modo TE_{12} - fc =4.6098 GHz
Modo TM_{12} - fc =4.6098 GHz
Modo TE_{22} - fc =5 GHz
Modo TM_{22} - fc =5 GHz
Modo TE_{41} - fc =5 GHz
Modo TM_{41} - fc =5 GHz
Modo TE_{32} - fc =5.5902 GHz
Modo TM_{32} - fc =5.5902 GHz
Modo TE_{50} - fc =5.5902 GHz
El número total de modos propagados por la guía rectangular a la frecuencia de f=6GHz es N=21

```

**Tarea 2:** Indicar si cada uno de los siguientes enunciados es verdadero o falso para propagación en guía rectangular.

- El número de modos que se propagan disminuye al aumentar la permitividad del material dieléctrico que rellena la guía.

Falso, el número de modos aumenta al aumentar la permitividad del material dieléctrico.

- Un modo se propaga siempre y cuando la frecuencia del corte de dicho modo sea menor que la frecuencia de la onda electromagnética. Verdadero.
- Los modos TE y TM del mismo orden tienen la misma frecuencia de corte. Verdadero.
- Siempre que se propaga un modo TE, se propaga un modo TM del mismo orden. Falso, no siempre.

## Parte II. Visualización de las componentes transversales de campo eléctrico y magnético para los diferentes modos que se propagan en una guía rectangular

Para ayudaros en esta parte de la práctica, tenéis que descargar el script de ayuda “campo\_transversal.m” (Poliformat 7 Recursos 7 Prácticas 2024 7 Práctica 6). Este archivo muestra el corte transversal de una guía de onda rectangular, donde se pueden visualizar las componentes transversales de los campos eléctrico y magnético para cualquier modo. Hay un par de flags en el programa que se utilizan para especificar algunas opciones. El flag “flagmode” indica si el modo a visualizar es el modo TE (flagmode = 1) o el modo TM (flagmode = 2). El flag “flagvis” se utiliza para indicar cómo visualizar el modo en pantalla. Se puede elegir entre visualizar únicamente una imagen con un mapa de color (flagvis = 2) que corresponde a la magnitud del campo transversal eléctrico/magnético, visualizar únicamente los vectores (flagvis = 3) que corresponden al campo transversal eléctrico (magenta) y magnético (negro), o bien visualizar simultáneamente el mapa de color y los vectores (flagvis = 1). Los diferentes flags los podéis modificar, comentándolos y descomentándolos, en esta sección de código:

```
% Programa para visualizar los campos transversales de los diferentes modos
% que se pueden transmitir por una guíaonda rectangular

f=7.2*1e9; % Frecuencia de la onda

% Orden del modo

m=1;
n=0;

% Modo a visualizar (flagmode = 1 para modo TE, flagmode = 2 para modo TM)

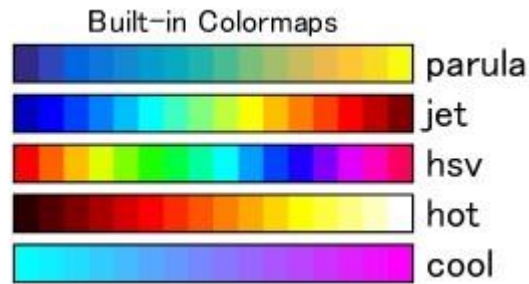
flagmode=1; % flagmode = 1 para modo TE
%flagmode=2; % flagmode = 2 para modo TM

% Visualizar mapa de color, vectores o ambos

flagvis=1; % Visualiza mapa de color y vectores
%flagvis=2; % Visualiza solamente el mapa de color
%flagvis=3; % Visualiza solamente los vectores
```

Además, en la figura anterior también podéis observar los parámetros “m” y “n”, con los que podréis indicar el orden del modo que queréis visualizar.

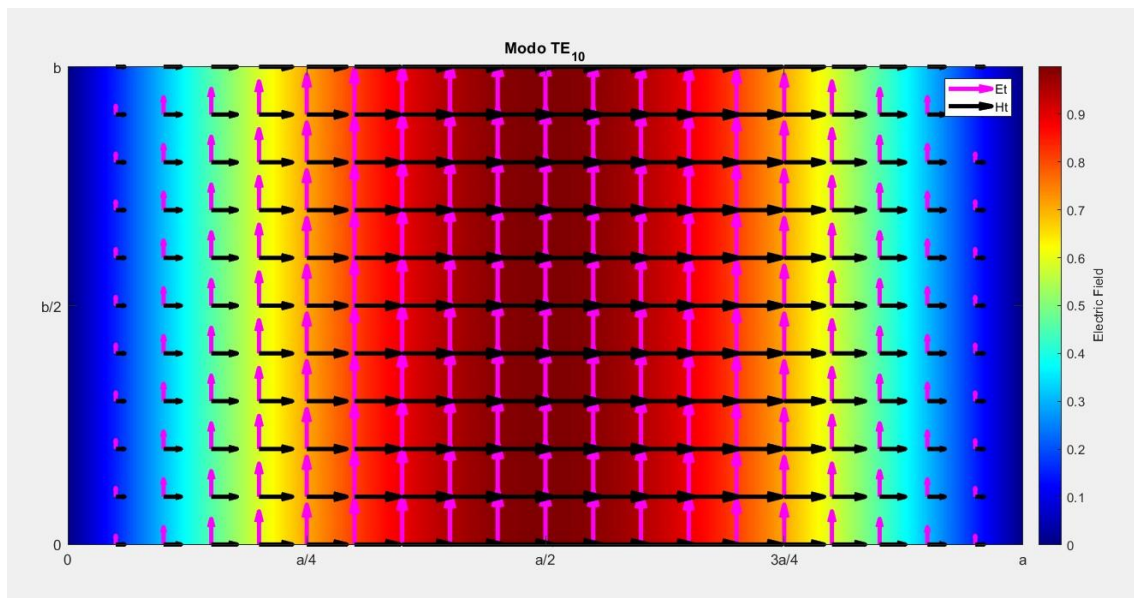
El mapa de color está normalizado al valor máximo y por tanto es el mismo para la componente transversal del campo eléctrico o magnético. Aunque hay que indicar, que en el caso de los modos TE, el campo eléctrico solamente tiene componente transversal, por lo que el campo eléctrico transversal coincide con el campo eléctrico total que se propaga por la guía. De la misma forma, en el caso de los modos TM, el campo magnético tiene únicamente componente transversal, por lo que en estos modos el mapa de color que se muestra también coincide con el campo magnético total que se propaga por la guía rectangular. Se utiliza el mapa de color “jet”, y por tanto los valores máximos están en color rojo, mientras que los valores mínimos están en color azul.



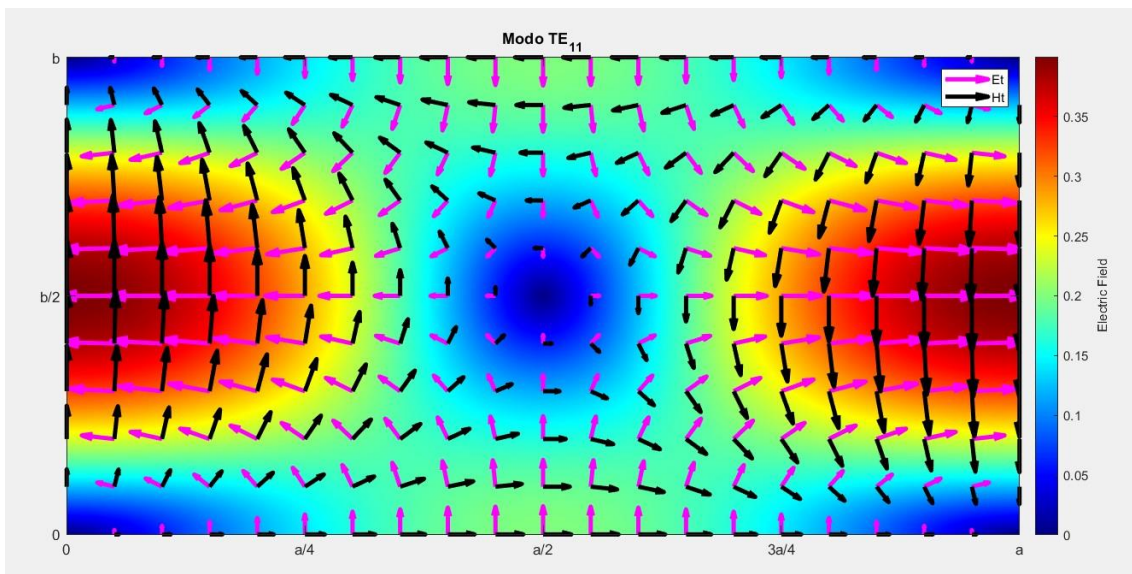
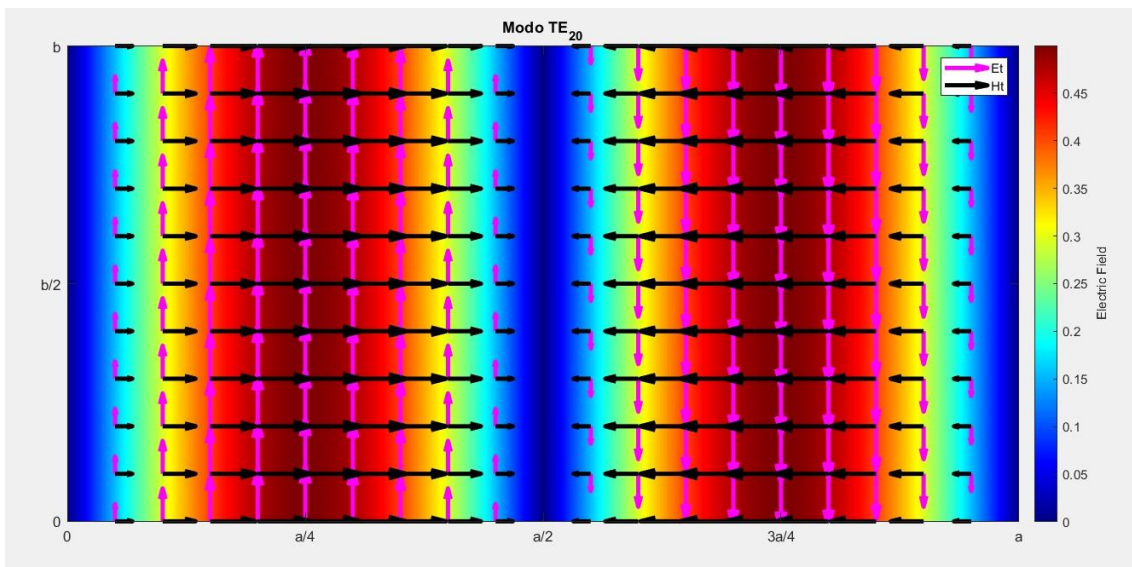
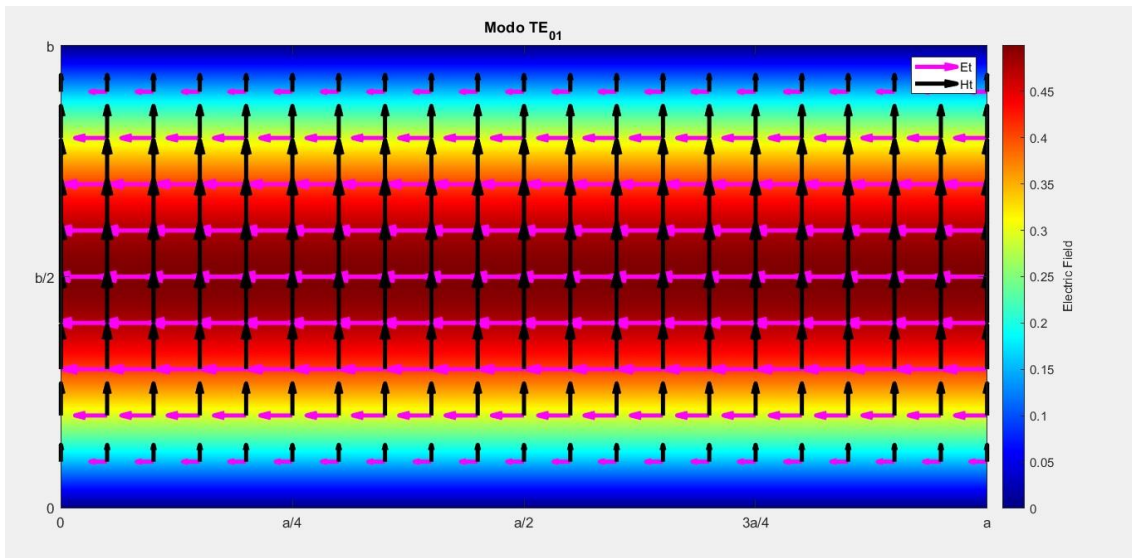
Este script está preparado para visualizar estos modos con independencia de que se puedan propagar por la guía rectangular o no. En el caso de que el modo no se pueda propagar por la guía, nos aparecerá un mensaje en la ventana del “Coman Window” de Matlab indicándolo así.

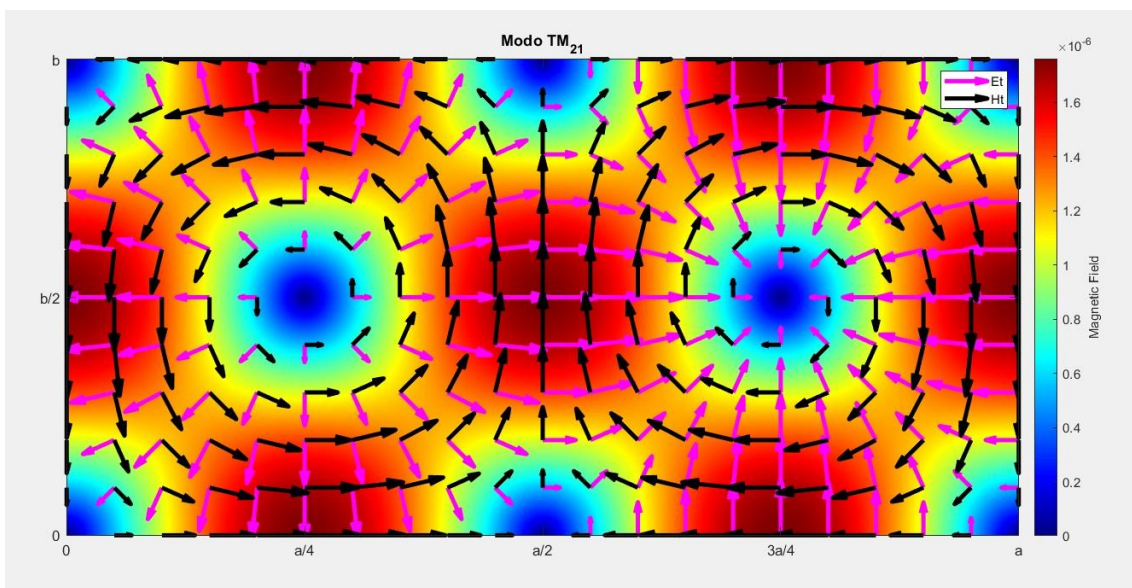
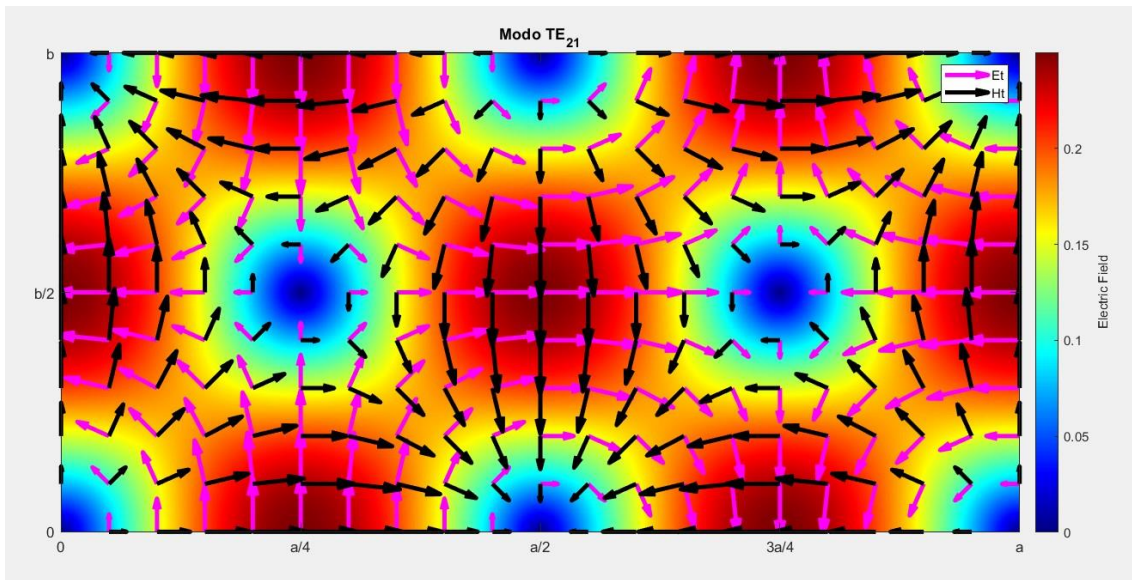
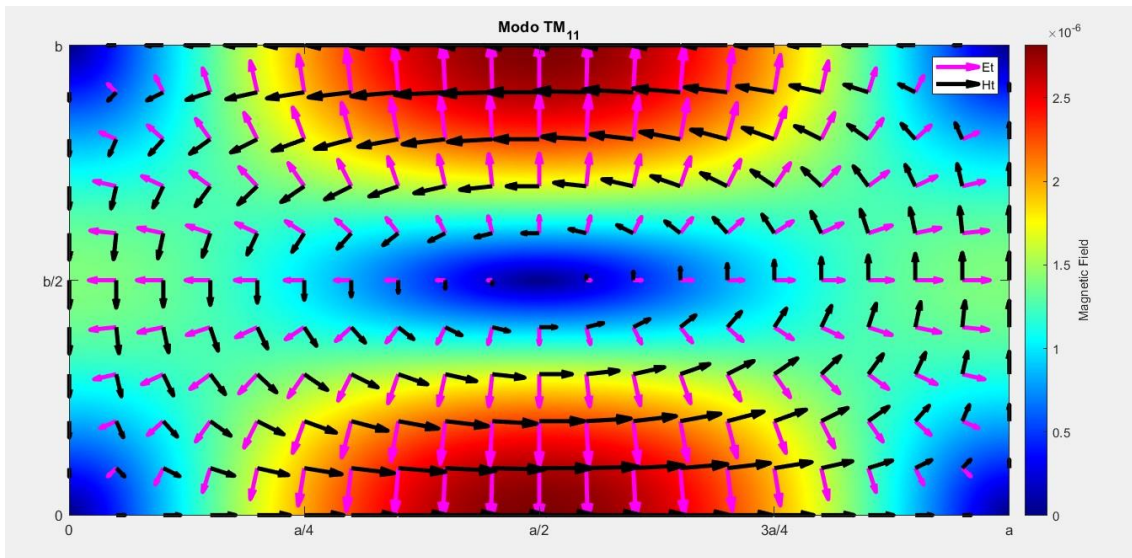
**Tarea 3:** Visualizar los campos transversales eléctrico y magnético (con flagvis = 1) para los modos que se propagan en una guía rectangular de dimensiones  $a = 6$  cm y  $b = 3$  cm que está rellena de aire ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ), para una frecuencia de la onda electromagnética de 7,2 GHz. Adjuntar una captura de pantalla en el archivo pdf de la práctica para cada uno de dichos modos. Para identificar los modos que se propagan por la guía se recomienda utilizar el script “calculadora\_modos.m” que habéis usado previamente en la tarea 1.

```
>> calculadora_modos
Modo TE_{10} - fc =2.5 GHz
Modo TE_{01} - fc =5 GHz
Modo TE_{20} - fc =5 GHz
Modo TE_{11} - fc =5.5902 GHz
Modo TM_{11} - fc =5.5902 GHz
Modo TE_{21} - fc =7.0711 GHz
Modo TM_{21} - fc =7.0711 GHz
El número total de modos propagados por la guía rectangular a la frecuencia de f=7.2GHz es N=7
```











### Parte III. Propagación de los modos a lo largo de la guía rectangular

Para ayudaros en esta parte de la práctica, tenéis que descargar el script de ayuda “propagación\_en\_z.m” (Poliformat 7 Recursos 7 Prácticas 2024 7 Práctica 6). Este archivo simula la propagación de un modo por la guía longitudinal. En la simulación se muestran dos gráficas. La superior corresponde al corte transversal de la guía (plano xy), mientras que la inferior corresponde al corte longitudinal de la misma (plano yz). Se puede elegir la posición del corte longitudinal mediante la variable “corte” que indica el valor de la coordenada x en el plano del corte. Además, se sigue utilizando el flag “flagmode” para indicar si se quiere visualizar un modo TE (flagmode = 1) o un modo TM (flagmode = 2). Además, también podéis modificar en el script el orden del modo que se propaga y las dimensiones de la guía. A continuación, tenéis una captura de pantalla con la sección del script donde tenéis los diferentes parámetros que tendréis que modificar en la tarea que se propone en esta parte.

```
% Programa para visualizar la propagación de un modo por una guía
% rectangular

% Dimensiones de la guía

a=6e-2;
b=3e-2;
L=12e-2;

% Frecuencia de la onda electromagnética

f=7.2e9;
%f=3.535534*1e9;
%f=1e9;

% Modo a propagar (flagmode = 1 para modo TE, flagmode = 2 para modo TM)

flagmode=1; % flagmode = 1 para modo TE
%flagmode=2; % flagmode = 2 para modo TM

% Orden del modo

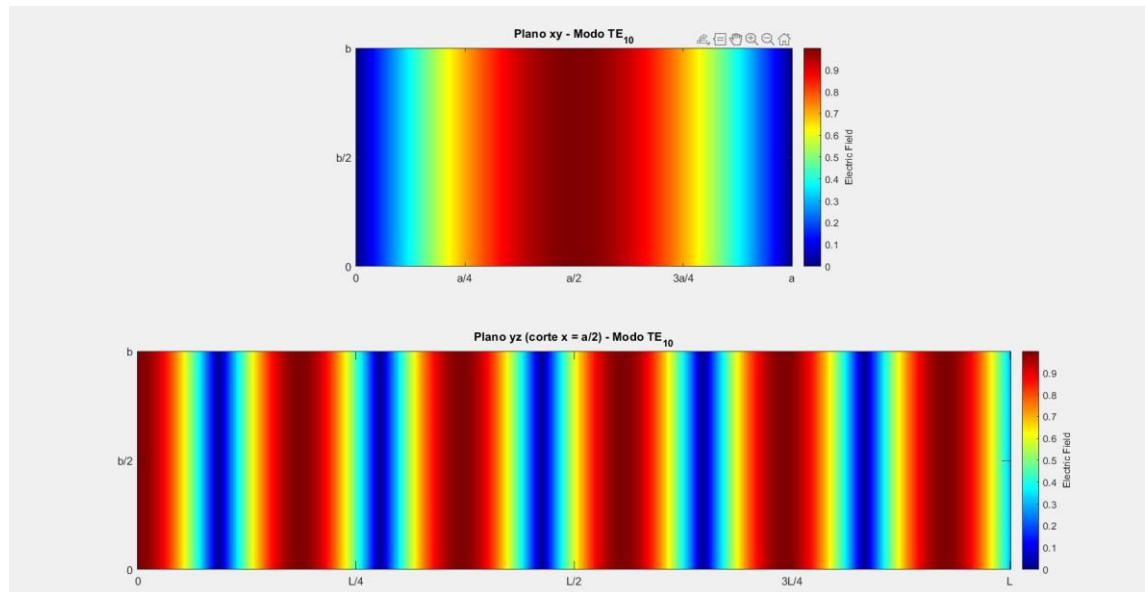
m=1;
n=0;

corte=a/2; % Valor de x para el corte del plano yz
```

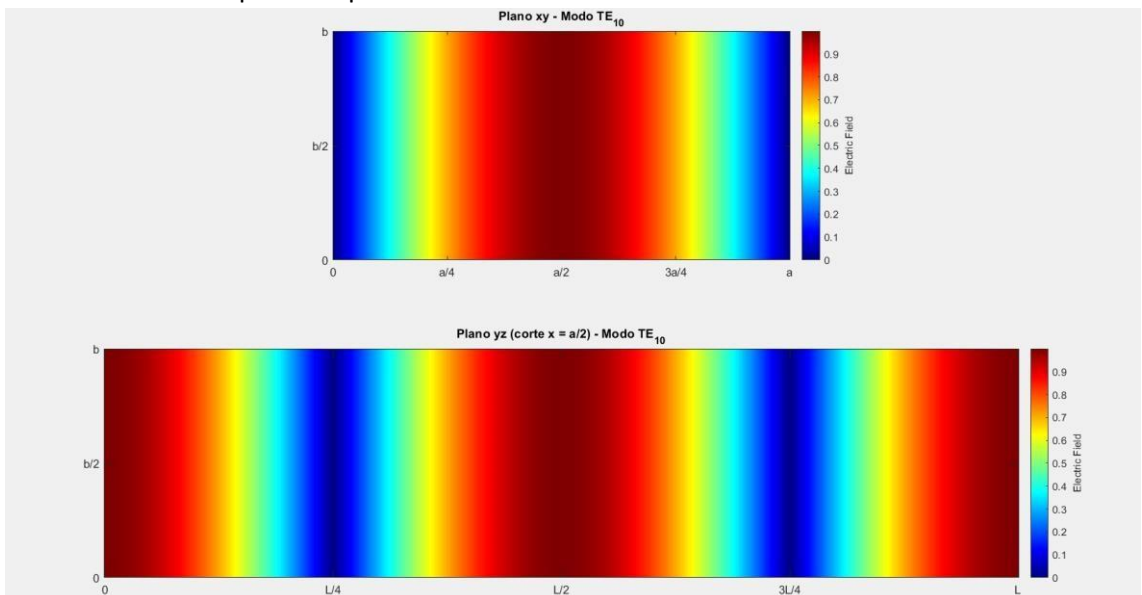
En esta parte podéis comprobar que un modo solamente se propaga por la guía cuando su frecuencia de corte es inferior a la frecuencia de la onda electromagnética. Las imágenes en ambos planos se representan con el mapa de color “jet” igual que en el caso anterior, y la magnitud que se visualiza corresponde a la magnitud del campo eléctrico/magnético transversal normalizado.

**Tarea 4:** Simular la propagación de diferentes modos a lo largo de una guía rectangular de dimensiones  $a = 6 \text{ cm}$ ,  $b = 3 \text{ cm}$  y  $L = 12 \text{ cm}$  que está rellena de aire ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ). En cada supuesto se especifica el modo, el plano yz a mostrar especificando su coordenada x, y la frecuencia de la onda electromagnética. Adjuntar las capturas de pantalla de la imagen que os queda al final de cada simulación.

- supuesto A [modo  $TE_{10}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 7,2 \text{ GHz}$ ]

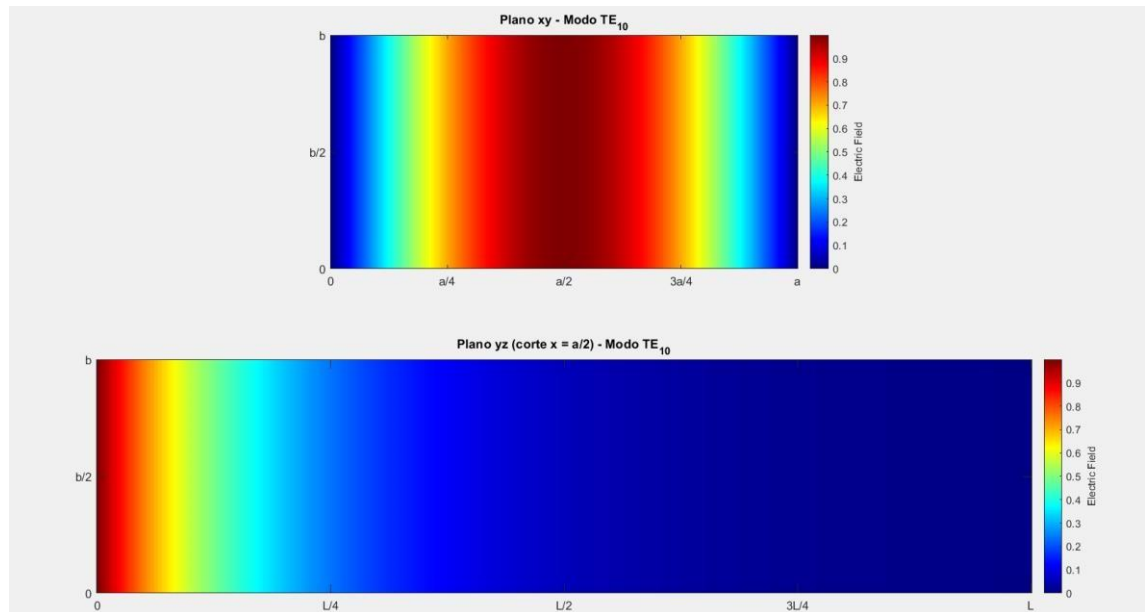


- supuesto B [modo  $TE_{10}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 3,535534$  GHz]. En este supuesto la longitud de la guía  $L$  coincide con la longitud de onda de la guía ( $\lambda_g$ ) para el modo fundamental como podréis apreciar en la simulación.

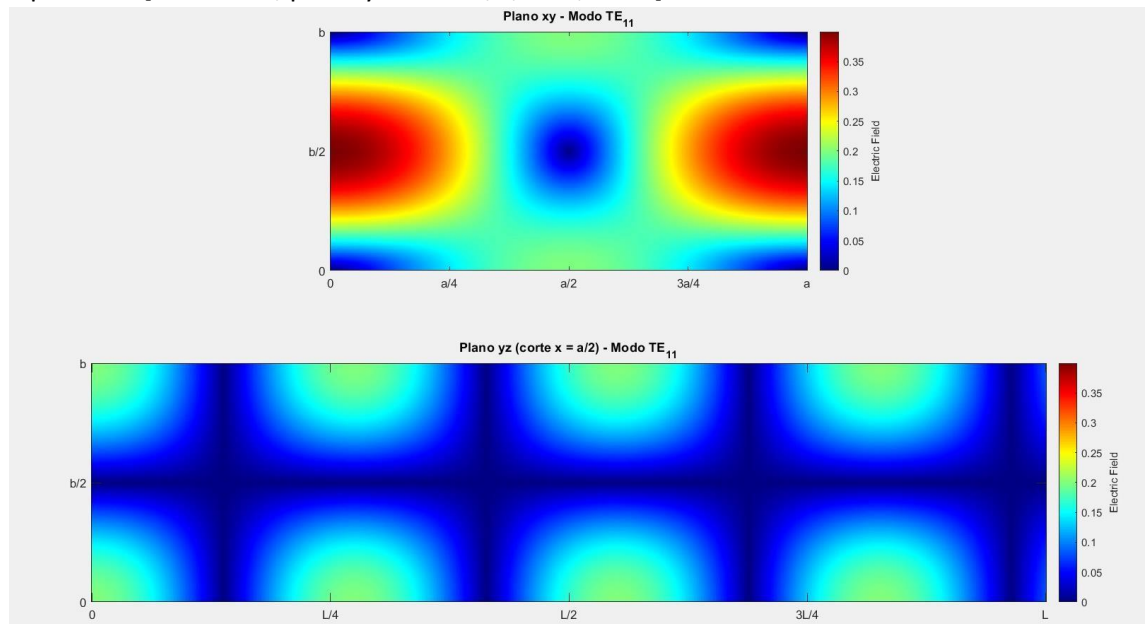


- supuesto C [modo  $TE_{10}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 1$  GHz]. En este supuesto el modo fundamental está en corte y no se propaga.

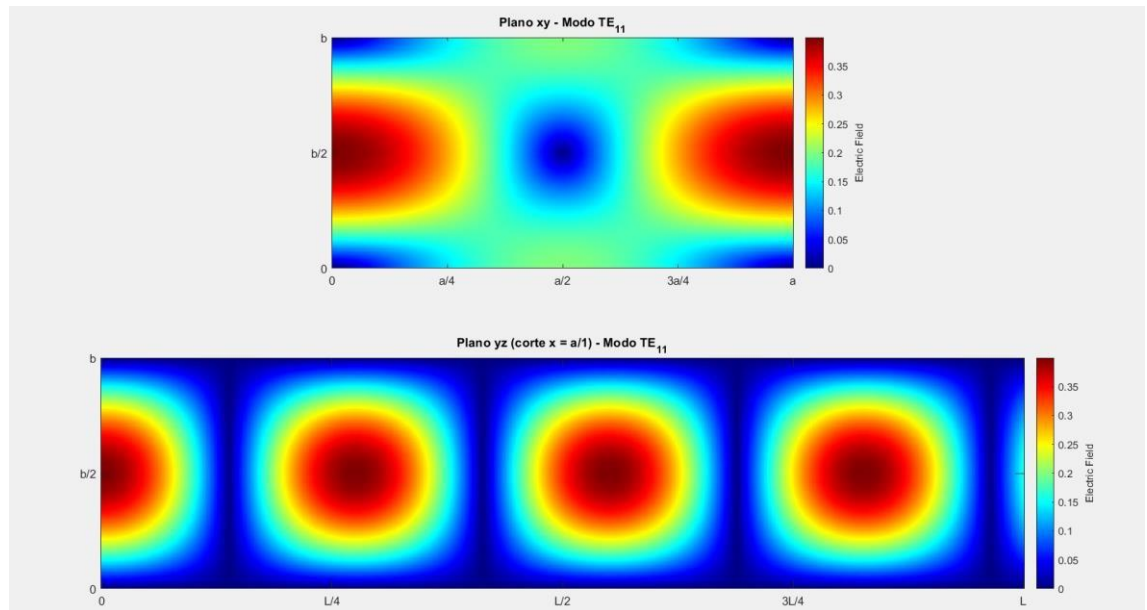




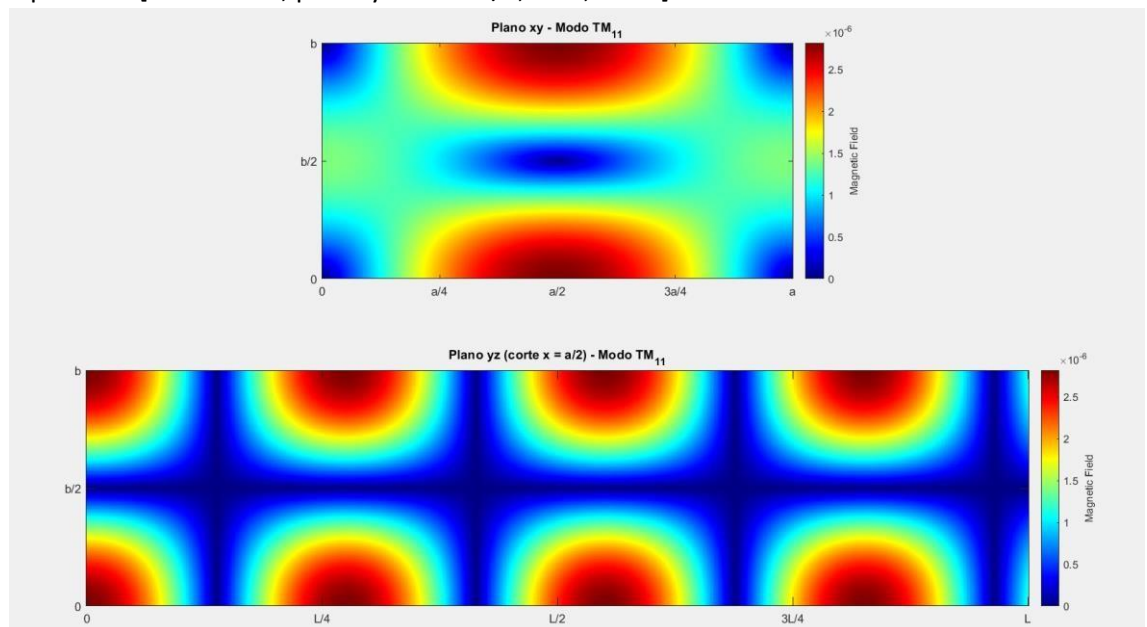
- supuesto D [modo  $TE_{11}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 7,2$  GHz]



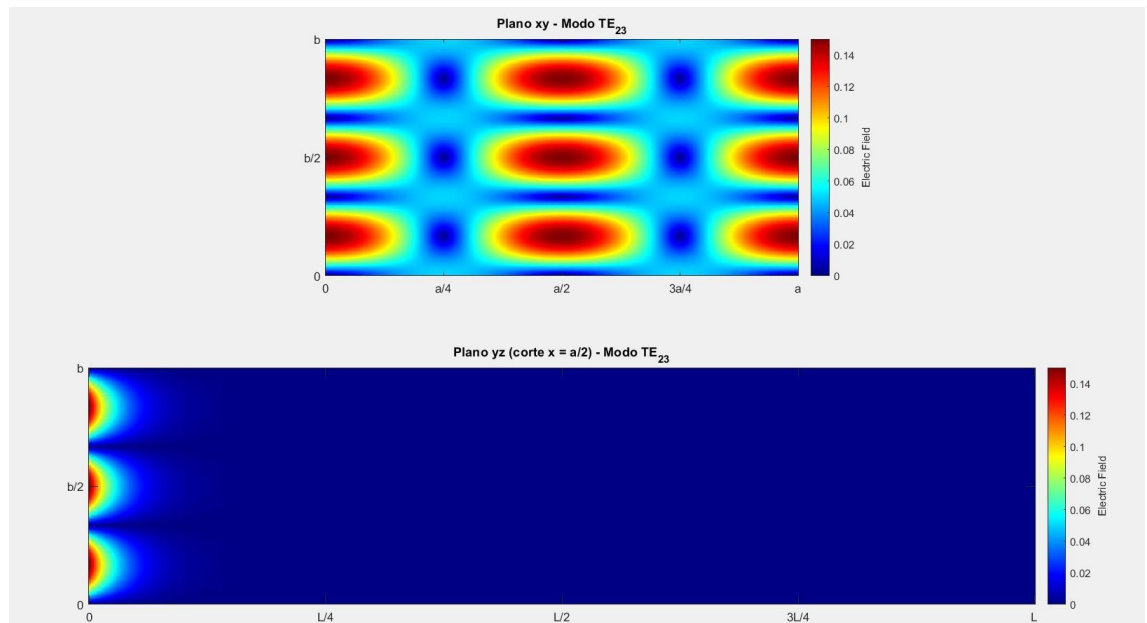
- supuesto E [modo  $TE_{11}$ , plano yz en  $x = a$ ,  $f = 7,2$  GHz]



- supuesto F [modo  $TM_{11}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 7,2$  GHz]



- supuesto G [modo  $TE_{23}$ , plano yz en  $x = a/2$ ,  $f = 7,2$  GHz]



#### Parte IV. Medida experimental de la longitud de onda de la guía en la guía rectangular

**Tarea 5:** En el banco de medida de microondas, sintonice el elemento encargado de generar la portadora de radiofrecuencia a la frecuencia aproximada de  $f = 9$  GHz. Deslice la guía ranurada (elemento que se encuentra conectado al medidor de ROE y que permite mover el detector de campo) hasta la posición más cercana a la carga (cortocircuito). Encienda el montaje y vaya desplazando la guía ranurada visualizando en el medidor de ROE el nivel de potencia relativa. Encuentre dos mínimos relativos anotando sus posiciones en la siguiente tabla,

Posición del Mínimo 1 (mm)	56
Posición del Mínimo 2 (mm)	80.7
Distancia entre mínimos (mm)	$80.7 - 56 = 24.7$

**Tarea 6:** Utilizando los datos obtenidos en la Tarea 5, obtenga la expresión de la longitud de onda, así como la frecuencia de operación sabiendo que la guía de onda utilizada corresponde con la guía estándar WR90 de anchura  $a = 22.68$  mm y altura  $b = 10.16$  mm.

	Valor
Longitud de onda de la guía ( $\lambda_g$ )	49.4 mm
Frecuencia de operación ( $f$ )	8.97GHz

**Tarea 7:** Compruebe que se está trabajando en el rango monomodo calculando las frecuencias de corte del modo fundamental y del siguiente modo con frecuencia de corte más baja.

	Modo	Frecuencia de corte ( $f_c$ )
Modo fundamental	TE10	6.6138 GHz

Siguiente modo	TE20	13.2275 GHz

Efectivamente se está trabajando en el modo fundamental porque nuestra frecuencia no llega a alcanzar la frecuencia de corte del siguiente modo.