

# **TREBALL DE FI DE CARRERA**

**TÍTOL DEL TFC : Eines de Simulació Numèrica per Problemes Electromagnetics**

**TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació**

**AUTOR: Laura Val Ibort**

**DIRECTOR: Rubén Otín Fortuño**

**SUPERVISOR: Francisco Javier Mora Serrano**

**DATA: 7 de mayo de 2007**



**Títol :** Eines de Simulació Numèrica per Problemes Electromagnetics

**Autor:** Laura Val Ibort

**Director:** Rubén Otín Fortuño

**Supervisor:** Francisco Javier Mora Serrano

**Data:** 7 de mayo de 2007

## Resum

Nuestro principal objetivo es ampliar y validar una herramienta de simulación numérica para resolver problemas electromagnéticos en el dominio de la frecuencia.

Para ello contamos con dos herramientas genéricas de cálculo ya realizadas. Una de ellas es el programa de pre y postproceso GiD. GiD es un programa gráfico destinado a la definición y preparación de los datos de entrada necesarios en una simulación numérica, así como a la visualización de sus resultados. La otra es el módulo de cálculo ERMES (acrónimo proveniente de: Electric field with Regularized Maxwell Equations and Singular elements), el cual resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos (MEF).

Con estas herramientas lo primero que haremos será modificar el programa ERMES que se integrará en GiD. Añadiremos nuevas funcionalidades a la interface que nos permitan observar resultados como las gráficas de parámetros S de un dispositivo. Además, ilustraremos las nuevas funciones de ERMES con varios ejemplos de validación y demostración que verifiquen su adecuada implementación. Por último, se creará una documentación asociada que, más allá de su uso por profesionales del sector, también proporcionará tutoriales básicos que los estudiantes pueden utilizar como herramienta de aprendizaje.

Como resultado final se dispondrá de un módulo de cálculo desarrollado para poder realizar simulaciones electromagnéticas en tres dimensiones para el modelado de sistemas basados en microondas.



**Title :** Numerical Simulation Tools for Electromagnetics Problems

**Author:** Laura Val Iborat

**Director:** Rubén Otín Fortuño

**Supervisor:** Francisco Javier Mora Serrano

**Date:** 7th May 2007

## Overview

Our principal objective is to create a simulation computer tool for frequency domain electromagnetic propagation problems in three dimensions.

We dispose of two generic tools. One of them is the pre- and postprocess program GiD. This is a graphic program, created for the definition and preparation of dates that will be used for numerical simulations, and also for the visualization of its results. In the other hand, we have a FEM (finite elements method) code called ERMES (Electric field with Regularized Maxwell Equations and Singular elements). ERMES has been implemented with the goal of provide a computing tool for the analysis, design and test of electromagnetic devices, like transformers, motors, switches, phones, speakers, monitors, etc.

With all these, we get several results: first of all, we modify ERMES that we integrate in GiD. We add new functionalities to the interface that shows results as the S parameters. Next, we illustrate the new functions of ERMES with examples that verify its good implementation. And, finally, we create an associated documentation that provides basic tutorials to learn and improve in electromagnetism, very useful for students and professionals of this area.

To sum up, we have a software package developed that can be able of electromagnetic simulations in three dimensions for the model of microwave systems.



## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Michael Mattes (Laboratory of Electromagnetics and Acoustics (LEMA), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Switzerland), por ofrecernos los resultados de las simulaciones del iris inductivo, transición de guía de ondas de altura constante, iris capacitivo y T-junction, que han sido usadas como referencia en este trabajo.

Los autores también desean agradecer a Luis E. García Castillo (Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad Carlos III de Madrid), por ofrecernos los resultados de la simulación de los seis iris inductivos, usada como referencia en este trabajo.

Todas las simulaciones realizadas por los autores de este trabajo se realizaron con el código ERMES, desarrollado por el investigador Rubén Otín. No se ha utilizado ningún otro programa de simulación, y las comparaciones realizadas para validar el código se han realizado directamente con los resultados publicados o suministrados directamente por otros autores.

En particular, las simulaciones realizados con el programa de simulación FEST3D presentados en este documento fueron proporcionados por el Dr. Michael Mattes, autor del código. FEST3D ha sido desarrollado bajo un contrato de la ESA. FEST3D has been developed under ESA Contract.

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los estudios realizados por el investigador Rubén Otín para su tesis doctoral, y de los desarrollos para los proyectos MIDAS (Modelos de Inmunidad electromagnética Distribuida en Automóviles: Estudio Numérico y Experimental con Fuentes Múltiples) financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia, y PROFIT SANTTRA (Sistema de ANTenas para Transceptores de Radio) parcialmente financiado por Ministerio de Industria Turismo y Comercio y basado en el proyecto PIDEA-EUREKA SMART (SMart Antennas system for Radio Transceivers).

# ÍNDICE GENERAL

<b>CAPÍTULO 1.MOTIVACIÓN</b> . . . . .	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 2.OBJETIVOS</b> . . . . .	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 3.ESTADO DEL ARTE.</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>3.1. Guías de onda.</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>3.2. Introducción al electromagnetismo.</b> . . . . .	<b>17</b>
3.2.1. Campos electromagnéticos y ecuación de ondas. . . . .	17
3.2.2. Modos TE . . . . .	19
3.2.3. Modos guiados y en corte . . . . .	20
3.2.4. Modo fundamental $TE_{10}$ . . . . .	21
<b>3.3. Métodos numéricos</b> . . . . .	<b>21</b>
3.3.1. Método de los Elementos Finitos . . . . .	22
<b>3.4. Herramientas existentes</b> . . . . .	<b>23</b>
3.4.1. GID . . . . .	23
3.4.2. ERMES . . . . .	24
<b>CAPÍTULO 4.ESPECIFICACIONES DEL PROBLEMA</b> . . . . .	<b>25</b>
<b>4.1. PREPROCESO</b> . . . . .	<b>26</b>
4.1.1. Materiales . . . . .	26
4.1.2. Coeficientes de contorno . . . . .	26
4.1.3. Condiciones eléctricas y de contorno . . . . .	26
4.1.4. Modos de proyección . . . . .	27
4.1.5. Estrategia de resolución . . . . .	27
4.1.6. Resultados . . . . .	28
4.1.7. Mallado . . . . .	29
4.1.8. Cálculo . . . . .	30
<b>4.2. POSTPROCESO</b> . . . . .	<b>30</b>
4.2.1. Visualización de resultados . . . . .	30
4.2.2. Parámetros de Scattering . . . . .	31
<b>CAPÍTULO 5.PROPUESTA DE EJEMPLOS</b> . . . . .	<b>33</b>

5.1. Inductive Iris . . . . .	33
5.2. TJuntion . . . . .	33
5.3. Guía de onda con una transición de altura constante . . . . .	34
5.4. Guía de onda con seis iris inductivos . . . . .	34
5.5. Capacitive Iris . . . . .	35
<b>CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA . . . . .</b>	<b>37</b>
6.1. Ampliación de ERMES . . . . .	37
6.2. Validación de los ejemplos . . . . .	39
6.2.1. Inductive Iris . . . . .	39
6.2.2. TJuntion . . . . .	45
6.2.3. Guía de onda con una transición de altura constante . . . . .	47
6.2.4. Guía de onda con seis iris inductivos . . . . .	50
6.2.5. Capacitive Iris . . . . .	52
6.2.6. Tabla de resultados . . . . .	54
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>APÉNDICE A. Análisis teórico . . . . .</b>	<b>1</b>
A.1. Obtención del modo $TE_{10}$ . . . . .	1
<b>APÉNDICE B. Inductive Iris . . . . .</b>	<b>3</b>
B.1. Objetivos de la simulación . . . . .	3
B.2. Descripción del ejemplo . . . . .	3
B.3. Construcción del ejemplo . . . . .	3
B.3.1. PreProceso . . . . .	3
B.3.2. Simulación . . . . .	8
B.3.3. PostProceso . . . . .	9
<b>APÉNDICE C. TJuntion . . . . .</b>	<b>11</b>
C.1. Objetivos de la simulación . . . . .	11

<b>C.2. Descripción del ejemplo</b>	<b>11</b>
<b>C.3. Construcción del ejemplo</b>	<b>11</b>
C.3.1. Creación del rectángulo	11
C.3.2. Asignación de materiales	12
C.3.3. Asignación de condiciones de contorno	12
C.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema	13
C.3.5. Creación de la malla	14

## **APÉNDICE D. Guía de onda con una transición de altura constante 15**

<b>D.1. Objetivos de la simulación</b>	<b>15</b>
<b>D.2. Descripción del ejemplo</b>	<b>15</b>
<b>D.3. Construcción del ejemplo</b>	<b>15</b>
D.3.1. Creación del rectángulo	15
D.3.2. Asignación de materiales	15
D.3.3. Asignación de condiciones de contorno	16
D.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema	17
D.3.5. Creación de la malla	17

## **APÉNDICE E. Guía de onda con seis iris inductivos 19**

<b>E.1. Objetivos de la simulación</b>	<b>19</b>
<b>E.2. Descripción del ejemplo</b>	<b>19</b>
<b>E.3. Construcción del ejemplo</b>	<b>19</b>
E.3.1. Creación del rectángulo	19
E.3.2. Asignación de materiales	19
E.3.3. Asignación de condiciones de contorno	20
E.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema	21
E.3.5. Creación de la malla	22

## **APÉNDICE F. Capacitive Iris 23**

<b>F.1. Objetivos de la simulación</b>	<b>23</b>
<b>F.2. Descripción del ejemplo</b>	<b>23</b>
<b>F.3. Construcción del ejemplo</b>	<b>23</b>
F.3.1. Creación del rectángulo	23
F.3.2. Asignación de materiales	23
F.3.3. Asignación de condiciones de contorno	24

F.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema . . . . .	25
F.3.5. Creación de la malla . . . . .	25
<b>APÉNDICE G. Código TCL . . . . .</b>	<b>27</b>



# CAPÍTULO 1. MOTIVACIÓN

Actualmente, el electromagnetismo presenta una serie de aplicaciones que abarcan todo tipo de facetas de nuestra vida cotidiana. Una de estas aplicaciones es la propagación de ondas, cuyo medio más común es el espacio, debido a sus ventajas en cuanto a coste e infraestructuras. Sin embargo, este tipo de propagación requiere del uso de antenas que emitan y reciban la información y de sistemas para su alimentación basados en guías de ondas y líneas de transmisión. El amplio desarrollo de la telefonía móvil y la transmisión por satélite ha provocado un aumento en la complejidad de dichas antenas y sistemas.

Disponemos de programas de simulación electromagnética dedicados a prever diagramas de radiación y modelar dispositivos de microondas que son muy útiles a la hora de construir antenas y sistemas asociados. Son aplicaciones que requieren gran potencia de cálculo, ya que deben representarse las condiciones en las que la onda es recibida o emitida por la antena o se propaga en el interior de la guía de onda, y esto implica que el modelo del dispositivo debe disponer de suficientes puntos de cálculo como para recoger fielmente su comportamiento.

Los análisis realizados implican la formulación de las ecuaciones de Maxwell para alta frecuencia. De entre los diferentes métodos empleados predominan el Método de los Momentos (MoM), el Método de los Elementos Finitos (FEM), el método de las Diferencias Finitas en el Dominio del Tiempo (FDTD) y los métodos asintóticos de alta frecuencia (GTD, UTP, PO).

El método de los elementos finitos se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio del problema en una serie de subdominios o elementos finitos. Estos elementos se componen de una serie de puntos de cálculo llamados nodos, los cuales están separados entre sí por una distancia inferior a  $\frac{\lambda}{10}$ . Por tanto, como la distancia de los nodos depende de la frecuencia, si aumenta la frecuencia de trabajo, también aumenta el número de puntos de cálculo necesarios. Estas técnicas tienen numerosas aplicaciones y se emplean con éxito en el estudio de otros dispositivos de telecomunicación. Ejemplos ilustrativos vendrían a ser las cavidades de microondas o la propagación por cable.

El tema del proyecto interesa por múltiples factores, por un lado, profundizar en el electromagnetismo que es la base de la mayoría de medios de telecomunicación, por otro lado, la simulación por ordenador, un gran avance que nos supone un gran ahorro de tiempo y, por último, la creación de una documentación que pueda ayudar a otros estudiantes de la materia a comprenderla mejor.



## CAPÍTULO 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este TFC es la ampliación y validación de una herramienta de simulación por ordenador para problemas tridimensionales de propagación electromagnética en el dominio de la frecuencia y la creación de una documentación asociada para su manejo.

De entre la amplia gama de problemas a resolver, este trabajo de fin de carrera se enfocará al estudio de los filtros de microondas.

El trabajo parte de dos herramientas genéricas de cálculo ya realizadas:

a) el programa de pre y postproceso GiD:

- es un programa gráfico, destinado a la definición y preparación de los datos destinados a realizar una simulación numérica, así como a la visualización de sus resultados;
- permite la definición de la geometría a estudiar, materiales que la componen, las condiciones de contorno, y otros parámetros, como por ejemplo la estrategia de resolución;
- realiza la creación de malla (para elementos finitos, diferencias finitas u otros métodos) y transferencia de los datos asociados a la geometría;
- permite la ejecución del análisis desde el propio GiD, como si todo fuese un paquete único;
- dispone de comandos de postproceso, para la visualización de los resultados de modo que sean fácilmente interpretables (por colores, curvas de nivel, etiquetas, vectores, gráficas, animaciones, etc.);
- es posible la extensión de la interface GiD mediante la creación de ventanas propias usando el lenguaje Tcl/Tk.

b) ERMES, implementa las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos (MEF):

- permiten resolver problemas de propagación de ondas en el dominio de la frecuencia;
- está en fase de estudio incluir el tratamiento de singularidades;

Así, el objetivo del trabajo dadas las condiciones de partida puede desglosarse en varios puntos:

1. Realización de mejoras en la interface de ERMES. Añadimos una nueva funcionalidad que nos permitirá visualizar las gráficas de parámetros S de la estructura que estemos estudiando;
2. Validación de una serie de ejemplos que verifiquen la adecuada implementación de ERMES;

3. creación de la documentación asociada que, además de su uso para profesionales del sector, también proporciona tutoriales básicos que lo convierten en una herramienta de aprendizaje y prueba para estudiantes de electromagnetismo;

Traduciendo dichos objetivos al plan de trabajo, que también se corresponde en buena medida con el índice de esta memoria, se tienen los siguientes puntos:

1. definición de los datos de entrada, es decir, las especificaciones del problema sobre el que se aplicará el programa;
2. creación de las ventanas de entrada de datos con GiD;
3. elaboración y selección de una serie de ejemplos de validación (con soluciones teóricas bien conocidas, ya sean analíticas o provenientes de otros paquetes de cálculo suficientemente contrastados) como son los ejemplos propuestos en los anexos C, D y E, así como algún otro ejemplo de demostración para ilustrar las posibilidades del paquete como el ejemplo del anexo B (que también sirve como manual de uso del programa) o el ejemplo del anexo F;
4. desarrollo y aplicación del bloque de cálculo sobre los ejemplos anteriormente señalados;
5. presentación de los resultados obtenidos y elaboración de la documentación asociada;
6. conclusiones finales que incluirán comparativa de los objetivos propuestos y logros obtenidos, posibles aplicaciones de la herramienta en función del perfil de usuario y futuras líneas de actuación;

Como resultado final se dispondrá de un módulo de cálculo desarrollado para poder realizar simulaciones electromagnéticas en tres dimensiones para el modelado de sistemas basados en microondas.

## CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE.

En este capítulo realizaremos primero un breve estudio de la teoría electromagnética y su aplicación a las guías de onda. Seguidamente veremos las bases teóricas del método numérico empleado para obtener los campos y los parámetros de interés que caracterizan las estructuras analizadas. Finalmente explicaremos las dos herramientas utilizadas en el proyecto: GiD y ERMES.

### 3.1. Guías de onda.

Una guía de onda se puede definir como una estructura destinada a la propagación dirigida y acotada de radiación electromagnética. El medio dieléctrico en el que esta propagación se produce puede estar limitado por un material conductor (microondas) u otro dieléctrico (fibra óptica). Desde el punto de vista geométrico, las formas más comunes de guía de onda tienen secciones rectangulares o cilíndricas.

Por lo general, el objetivo de las guías de onda es transmitir señales de información de elevada frecuencia y que no podrían ser transmitidas por otros medios, debido a que la transmisión no sería eficiente (para transmitir señales ópticas a grandes distancias es necesario emplear fibra óptica ya que por la atmósfera no sería viable), o bien porque producirían interferencias en otros equipos, como es el caso de las ondas microondas (frecuencias entre 0,3 y 300GHz).

Entre las principales ventajas de emplear guías de onda se encuentran el blindaje total de la guía (lo que elimina las pérdidas por radiación), la ausencia de pérdidas en el dieléctrico al no haber aisladores dentro, las menores pérdidas debidas al conductor al utilizarse únicamente uno, la mayor capacidad para llevar señales de alta potencia y su simple construcción (más sencilla que la de un coaxial por ejemplo).

Por el contrario, las principales desventajas asociadas a las guías de onda se deben a que la instalación y operación es más compleja. Por ejemplo, se requieren radios de curvatura mayores a una longitud de onda para evitar la atenuación. Además se debe sujetar mediante soportes especiales para tener en cuenta la dilatación y contracción con la temperatura. Finalmente, también se tienen que presurizar para mantener las condiciones de uniformidad del medio interior.

### 3.2. Introducción al electromagnetismo.

#### 3.2.1. Campos electromagnéticos y ecuación de ondas.

Los fenómenos electromagnéticos se describen a nivel macroscópico mediante las ecuaciones de Maxwell. La forma de estas ecuaciones cuando suponemos que los campos tienen una dependencia temporal sinusoidal se pueden escribir de forma fasorial. La notación fasorial consiste en asumir que la dependencia en tiempo es armónica de tal modo

que todos los campos toman la forma de vectores complejos con un término  $e^{j\omega t}$  implícito para describir la dependencia temporal. De este modo, un campo eléctrico sinusoidal tomará la forma:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \Re\{\vec{E}(x, y, z)e^{j\omega t}\} = A(x, y, z) \cos(\omega t + \phi(x, y, z)) \quad (3.1)$$

con  $\vec{E}(x, y, z, t)$  la expresión del campo eléctrico en tiempo y espacio y  $\vec{E}(x, y, z)$  el fasor complejo asociado. El campo eléctrico tendrá una amplitud  $A(x, y, z)$  y una fase  $\phi(x, y, z)$  que se pueden obtener fácilmente a través de la parte real e imaginaria del fasor

$$A = \sqrt{E_R^2 + E_C^2} \quad (3.2)$$

$$\phi = \arctan(E_C/E_R) \quad (3.3)$$

Las expresiones de las ecuaciones de Maxwell en notación fasorial en un medio dieléctrico lineal, homogéneo e isótropo perfecto sin fuentes, como es el caso de la guía de ondas que vamos a emplear, son las siguientes:

$$\nabla \cdot \vec{E}(x, y, z) = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla \times \vec{E}(x, y, z) = -j\omega\mu\vec{H}(x, y, z) \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H}(x, y, z) = j\omega\epsilon\vec{E}(x, y, z) \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{H}(x, y, z) = 0 \quad (3.7)$$

Siendo  $\vec{E}$  el campo eléctrico,  $\vec{H}$  el campo magnético,  $\epsilon$  la permitividad eléctrica del medio,  $\mu$  la permeabilidad magnética del medio y  $\omega$  la frecuencia en rad/s. Manipulando matemáticamente las ecuaciones de Maxwell se obtienen las ecuaciones de onda de los campos eléctrico y magnético:

$$\nabla^2 \vec{E}(x, y, z) = -K^2 \vec{E}(x, y, z) \quad (3.8)$$

$$\nabla^2 \vec{H}(x, y, z) = -K^2 \vec{H}(x, y, z) \quad (3.9)$$

Siendo  $K = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$  un valor denominado número de onda. Para hallar la solución de estas ecuaciones tomaremos el eje Z como dirección de propagación de las ondas en el interior de la guía. Las direcciones X e Y serán por tanto las direcciones transversales a la propagación. El tipo de soluciones que buscamos para las ecuaciones anteriores toman la forma:

$$\vec{E}(x, y, z) = \vec{E}(x, y)e^{-j\beta z} \quad (3.10)$$

$$\vec{H}(x, y, z) = \vec{H}(x, y)e^{-j\beta z} \quad (3.11)$$

donde  $\beta$  es la llamada *constante de propagación*. La solución del tipo 3.10-3.11 se caracteriza porque su fase depende linealmente de la coordenada en la dirección de propagación mientras que su amplitud es independiente de la misma. Sustituyendo 3.10 y 3.11 en las respectivas ecuaciones de onda resulta:

$$\nabla_t^2 \vec{E}(x, y) + (K^2 - \beta^2) \vec{E}(x, y) = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla_t^2 \vec{H}(x, y) + (K^2 - \beta^2) \vec{H}(x, y) = 0 \quad (3.13)$$

Donde el símbolo  $\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$  es la laplaciana transversal [7]. Al término  $K^2 - \beta^2$  se le denomina  $K_c^2$  y representa el número de onda de corte. Este valor es muy importante porque determinará a partir de que frecuencias se puede producir la propagación en la guía de onda.

Por otro lado, manipulando matemáticamente las ecuaciones de Maxwell se pueden obtener las relaciones entre las componentes transversales y longitudinales de los campos en el interior de la guía de onda, lo que permite encontrar todas las componentes de los campos en la guía a partir de las componentes longitudinales ( $E_z, H_z$ ). La determinación de estas componentes longitudinales se realiza a partir de las ecuaciones de ondas 3.12 y 3.13 aplicadas únicamente a las componentes longitudinales. Las nuevas ecuaciones de onda obtenidas están completamente desacopladas:

$$\nabla_t^2 E_z(x, y) + (K^2 - \beta^2) E_z(x, y) = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla_t^2 H_z(x, y) + (K^2 - \beta^2) H_z(x, y) = 0 \quad (3.15)$$

A la hora de resolver 3.14 y 3.15 existen tres tipos de soluciones que pueden satisfacerlas. En el primer caso se puede imponer  $E_z(x, y) = 0$ , en todos los puntos del interior de la guía y obtener  $H_z(x, y)$  a partir de 3.15. Las soluciones obtenidas se denominan ondas de tipo *transversal eléctrico (TE)* puesto que el campo eléctrico en el interior de la guía sólo tiene componentes transversales a la dirección de propagación. En el segundo caso tomamos  $H_z(x, y) = 0$  en el interior de la guía y obtenemos  $E_z(x, y)$  a partir de 3.14. Las ondas resultantes ahora son de tipo *transversal magnético (TM)*. Finalmente, si eligiésemos simultáneamente que  $E_z = 0$  y  $H_z = 0$  tendríamos ondas de tipo *transversal eléctrico y magnético (TEM)*, solución inviable en guías rectangulares que es el caso que nos ocupa.

Es importante añadir que para que las soluciones de 3.14 y 3.15 sean únicas y físicamente posibles, se han de cumplir también las condiciones de contorno sobre la superficie conductora de la guía de onda. Dichas condiciones de contorno se obtienen a partir de las ecuaciones de Maxwell en forma integral y nos dicen que el campo eléctrico tangencial y el campo magnético normal a la superficie de un conductor perfecto han de ser nulos.

### 3.2.2. Modos TE

Consideramos una guía de onda rectangular en dirección Z con unas dimensiones a y b en los ejes X e Y respectivamente. Resolviendo la ecuación de ondas 3.15 sujeta a las condiciones de contorno (Ver anexo A) se obtiene el siguiente resultado para la componente longitudinal del campo magnético:

$$H_z(x, y) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (3.16)$$

Esta solución corresponde a un modo genérico  $TE_{mn}$ , donde los subíndices se relacionan con el ritmo de variación transversal de los campos, en X e Y respectivamente. Además,

se obtiene el valor para el número de onda de corte:

$$K_c^2 = K^2 - \beta_{mn}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \rightarrow \beta_{mn} = \sqrt{\omega^2\mu\epsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (3.17)$$

Esta expresión, que relaciona la *constante de propagación* de cada modo con la frecuencia nos indica cual es la frecuencia mínima necesaria para que se produzca propagación en la guía, ya que para ello es necesario que  $\beta$  sea real.

La principal conclusión hasta ahora es que dentro de la guía de ondas existen varias soluciones posibles en forma de modos de propagación. Esos modos forman un conjunto discreto de soluciones que se obtienen individualmente dando valores enteros a  $m$  y  $n$ . La constante de propagación  $\beta_{mn}$  es diferente para cada uno de estos modos.

### 3.2.3. Modos guiados y en corte

De la ecuación 3.17 podemos comprobar que la constante de propagación se mantendrá real siempre que:

$$\omega^2\mu\epsilon \geq \pi^2\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \rightarrow f > \frac{v_p}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (3.18)$$

Siendo  $f$  la frecuencia de la señal en Hertzios y  $v_p = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$  la velocidad de propagación en el dieléctrico. Esta expresión nos indica que para unos valores de  $m$  y  $n$ , la frecuencia de la señal ha de estar por encima de una determinada frecuencia de corte para que se produzca la propagación de la onda. Si no se satisface esta condición, la constante de propagación  $\beta_{mn}$  tomará un valor imaginario puro y el término de propagación del modo  $e^{-j\beta z}$  se convierte en un término de atenuación  $e^{-\alpha z}$ . Como consecuencia, la onda no se podrá propagar por la guía sino que se irá amortiguando en la dirección Z y se extinguirá. Por lo tanto, para un modo cualquiera determinado por sus valores  $m$  y  $n$ , existirá una frecuencia mínima,  $f_{c_{mn}}$ , llamada *frecuencia de corte*, por debajo de la cual  $\beta_{mn}$  pasa a ser imaginaria, y el modo no podrá propagarse. A un modo en estas condiciones se le llamará *modo en corte*. En cambio, aquellos modos cuya  $\beta_{mn}$  sea real permiten transmitir la señal a lo largo de la guía y se llaman *modos guiados*.

La frecuencia de corte de un modo puede escribirse como:

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \left[ \frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.19)$$

Otro parámetro de interés es la *longitud de onda de la guía*, que se define como la distancia entre dos planos de fase consecutivos. Todas las componentes no nulas de campo eléctrico o magnético repiten su fase cada distancia recorrida igual a:

$$\lambda_{mn} = \frac{2\pi}{\beta_{mn}} \quad (3.20)$$

### 3.2.4. Modo fundamental TE<sub>10</sub>

Se denomina modo fundamental o modo dominante a aquel cuya frecuencia de corte es menor. Si partimos de una frecuencia elevada con numerosos modos excitados en la guía, y vamos disminuyendo paulatinamente la frecuencia, será el último modo en desaparecer (en entrar en corte). A partir de la ecuación (3.19), y si asumimos que las dimensiones transversales de la guía cumplen la relación  $a > b$ , podemos ver que el último modo en entrar en corte es el  $m=1, n=0$ . Por lo tanto el modo fundamental es el TE<sub>10</sub>.

La forma de los campos en el interior de la guía de ondas para el modo TE<sub>10</sub> se obtiene a partir de las ecuaciones para obtener los campos transversales a partir de los longitudinales del anexo A y de las ecuaciones 3.1, 3.10, 3.11 y 3.16:

$$H_z(x, y, z, t) = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - \beta_{10}z) \quad (3.21)$$

$$E_y(x, y, z, t) = \frac{j\omega\mu H_0}{(\omega^2\mu\epsilon - \beta^2)} \frac{\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - \beta_{10}z) \quad (3.22)$$

$$H_x(x, y, z, t) = \frac{j\beta H_0}{(\omega^2\mu\epsilon - \beta^2)} \frac{\pi}{a} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos(\omega t - \beta_{10}z) \quad (3.23)$$

De estas ecuaciones se desprenden varias conclusiones importantes:

1. El campo eléctrico solo tiene componente en el eje Y.
2. Todos los valores dependen únicamente de x para un z y t fijos.
3. El máximo del campo eléctrico se obtendrá en el punto medio de la guía (valor máximo del seno), siendo nulo en los extremos.

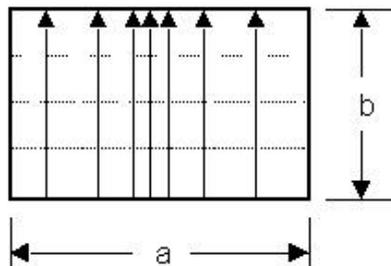


Figura 3.1: Forma de propagación del modo TE<sub>10</sub>

Para ampliar conocimientos sobre electromagnetismo son muy útiles los libros que se indican en la bibliografía [7] y [8].

## 3.3. Métodos numéricos

La tecnología moderna está, en gran medida, basada en sistemas electromagnéticos. Las telecomunicaciones (antenas, guías de onda) o el campo de la diagnosis médica

(resonancia magnética) son sólo algunos ejemplos de áreas que se han beneficiado de nuestro conocimiento de electromagnetismo.

Pero aunque los principios del electromagnetismo son bien conocidos, sus aplicaciones a situaciones prácticas siguen estando aún poco desarrollados y pocas veces pasan de los métodos analíticos. Estas complicaciones vienen, muchas veces, debidas a geometrías intrincadas o materiales de composición compleja. Afortunadamente, estas dificultades pueden superarse con la ayuda del electromagnetismo computacional, una rama de la simulación numérica dedicada al estudio de las ecuaciones de Maxwell.

El rango de aplicaciones del electromagnetismo (desde campo estáticos hasta radiación) se ve reflejado en la amplia variedad de métodos numéricos disponibles. La clasificación principal sería la que nos muestra el cuadro 3.1.

Métodos diferenciales	Rápido, preciso y fácil de implementar pero limitado cuando se tratan geometrías complejas	FDTD-Finite Difference Time Domain FDFD-Finite Difference Frequency Domain
Métodos varacionales	Preciso y excelente con geometrías complejas pero costoso computacionalmente	MoM-Method of Moments BEM-Boundary Element Method FEM-Finite Element Method
Métodos asintóticos	Los más rápidos y que menos carga computacional necesitan pero se basan en aproximaciones	GO-Geometric Optics GTD-Geometric Theory of Diffraction UTD-Uniform Theory of Diffraction UAT-Uniform Asymptotic Theory PTD-Physical Theory of Diffraction
Métodos híbridos	Mezcla de dos o más métodos, cuentan con las ventajas de aunar las partes más características de cada método y minimizar sus puntos débiles	FEM-MoM FDTD-FEM GTD-FEM

Cuadro 3.1: Métodos numéricos

Estos son sólo algunos de los métodos numéricos más usados en electromagnetismo. En la actualidad, se están desarrollando otros métodos más rápidos y eficientes. Nosotros nos centraremos en el Método de los Elementos Finitos (MEF, en español o FEM, en inglés), que es el que utiliza nuestro programa para resolver los problemas.

### 3.3.1. Método de los Elementos Finitos

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de tal forma que:

- El continuo se divide en un número finito de partes, “*elementos*”, cuyo compor-

tamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “*nodos*”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes. Al conjunto de todos estos nodos lo llamaremos malla.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamble de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos.

El MEF, por lo tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación<sup>1</sup> de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Una importante propiedad del método es la convergencia, si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

Podemos ampliar conocimientos sobre los métodos numéricos en el libro [9] de la bibliografía, y respecto al MEF, consultar el capítulo 5 (“El método de los elementos finitos”) de [12].

## 3.4. Herramientas existentes

En este apartado vamos a explicar en qué consisten y como se utilizan las herramientas ya existentes que usamos en el proyecto.

### 3.4.1. GiD

GiD es un programa gráfico, destinado a la definición y preparación de los datos destinados a realizar una simulación numérica, así como a la visualización de sus resultados.

La creación de los datos implica la definición de la geometría a estudiar, los materiales que la componen, las condiciones de contorno, y otros parámetros, como por ejemplo la estrategia de resolución.

---

<sup>1</sup>Interpolación: calcular el valor aproximado de una magnitud en un intervalo cuando se conocen algunos de los valores que toma a uno y otro lado de dicho intervalo

El programa se encarga de crear una malla (para elementos finitos, diferencias finitas u otros métodos) y transferirle los datos asociados a la geometría. La ejecución del análisis puede realizarse desde el propio GiD, como si todo fuese un paquete único.

El postproceso consiste en la visualización de los resultados de modo que sean fácilmente interpretables. Pueden hacerse visualizaciones por colores, curvas de nivel, etiquetas, vectores, gráficas, animaciones, etc. Una característica esencial de GiD es que no está especializado en un tipo de análisis, a priori GiD no conoce ningún material o condición, hasta que no se carga un "tipo de problema".

Cualquier usuario puede crear su "tipo de problema" particular, de modo que GiD conozca la sintaxis de su programa de simulación particular.

Además un usuario avanzado puede extender la interface de GiD creando sus propias ventanas mediante el lenguaje Tcl/Tk y personalizar el aspecto de GiD.

### **3.4.2. ERMES**

ERMES es un paquete de simulación electromagnética que usa el método de los elementos finitos (MEF).

Está dirigido a aquellos estudiantes, ingenieros o investigadores que necesitan una plataforma computacional robusta tal que, por un lado, ayude a entender la teoría electromagnética viendo qué sucede y, por otro lado, les permita superar los límites del cálculo analítico, consiguiendo fácilmente la resolución de un problema real complejo.

Sin embargo, ERMES está lejos de ser una herramienta compleja por su integración en GiD, programa que le permite asignar fácilmente los parámetros requeridos por una geometría concreta.

## CAPÍTULO 4. ESPECIFICACIONES DEL PROBLEMA

Nuestro objetivo final es modelar una estructura física desde un punto de vista electro-magnético. Dicho modelado consiste en el estudio de la propagación de los campos en la estructura y la obtención de los parámetros S de la misma. Estos parámetros permiten caracterizarla como un dispositivo con un puerto de entrada y uno o varios de salida.

Nuestro problema consta de una serie de parámetros que hemos de especificar, como son la geometría, los materiales de que está compuesto y las condiciones de contorno, que le iremos asignando con GiD. Por último, habrá que aplicar en la estructura el modo de resolución escogido.

En este capítulo, explicaremos de forma genérica que parámetros tendremos que aplicar en un caso general y como resolverlo. En caso de duda, podemos mirar el anexo B en el que se desarrolla un ejemplo paso a paso a modo de tutorial.

Para empezar a trabajar con GiD primero tenemos que cargar la geometría del problema y su "Problem type" asociado, en este caso ERMES, como se indica en la figura 4.1. En esta figura, vemos la barra de herramientas del programa, formada por una serie de botones que son los que tendremos que ir usando, en sentido descendente, para aplicar los parámetros del problema y su forma de resolución. Por si fuera necesaria, ERMES cuenta con una pequeña ayuda y soporte web.

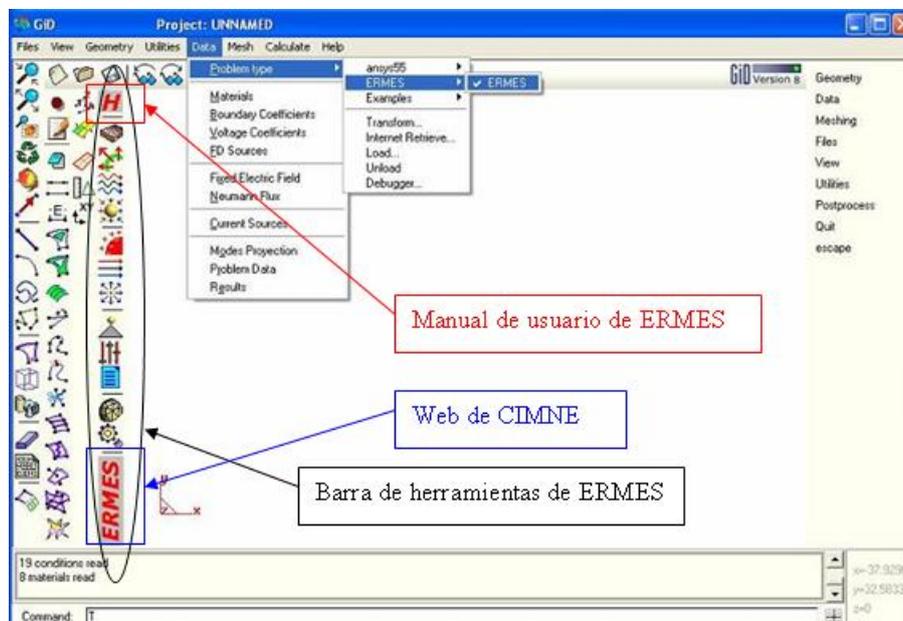


Figura 4.1: Como cargar el "problem type"

## 4.1. PREPROCESO

Se entiende por preproceso al conjunto de etapas previas al cálculo en sí de las ecuaciones físicas a resolver por el simulador y que se corresponden con la entrada de datos del problema.

### 4.1.1. Materiales

Aplicamos los diferentes materiales que correspondan a las distintas partes de la pieza, indicando los coeficientes de “Conductividad eléctrica”, “Permitividad eléctrica” y “Permeabilidad magnética”.

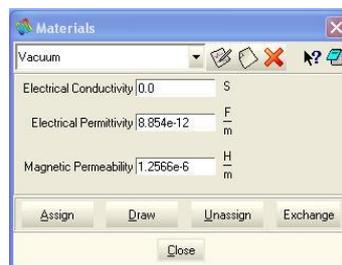


Figura 4.2: Ventana de asignación de materiales

### 4.1.2. Coeficientes de contorno

Asignamos una serie de coeficientes que indican los puertos, el modo de transmisión y la forma de transmisión. A cada puerto le otorgamos un número para distinguir unos de otros así como las coordenadas de tres puntos que definen la superficie de cada puerto. Uno que tomaremos como referencia, otro que indique la altura del puerto y un tercero que indique su anchura. Gracias a estos puntos el programa sabrá como se transmiten los modos.

### 4.1.3. Condiciones eléctricas y de contorno

En este apartado asignamos las condiciones de contorno necesarias para que el método de elementos finitos pueda resolver las ecuaciones de onda de forma única. Dichas ecuaciones de contorno se obtienen a partir de las ecuaciones de Maxwell en forma integral cuando se aplican sobre un conductor eléctrico o magnético perfecto. Así, si estamos ante una guía de onda ideal, la superficie metálica de la misma se podrá tratar como un conductor eléctrico perfecto (PEC: Perfect Electric Conductor). Por su parte, los puertos de la estructura se considerarán que son conductores magnéticos perfectos (PMC: Perfect Magnetic Conductor). En el caso PEC, se cumple que la componente del campo eléctrico tangente y la componente de campo magnético normal a la superficie de la guía serán

nulas, mientras que en el caso PMC la componente de  $\vec{E}$  y  $\vec{H}$  que se anulan son la perpendicular y tangente al puerto respectivamente. Esto, en notación matemática sería:

$$\begin{aligned} PEC &\equiv \hat{n} \times \vec{E} = 0 \\ PEC &\equiv \hat{n} \cdot \vec{H} = 0 \\ PMC &\equiv \hat{n} \cdot \vec{E} = 0 \\ PMC &\equiv \hat{n} \times \vec{H} = 0 \end{aligned}$$

(4.1)

Si no queremos emplear estos casos ideales pero si que conocemos alguna de las componentes del campo eléctrico, fijaremos el valor conocido en la geometría ( $E_x$ ,  $E_y$  y  $E_z$ ).

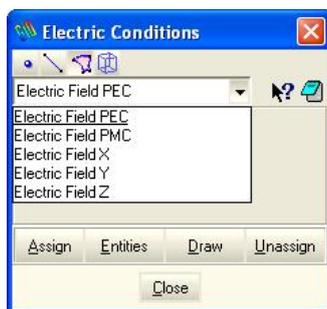


Figura 4.3: Condiciones eléctricas

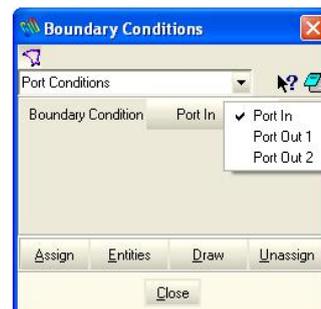


Figura 4.4: Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno o *Boundary conditions* permiten definir los puertos de entrada y salida además de las componentes de campo lejano (*Far Field Condition*) en las superficies que lo definan, cuando éstas sean necesarias.

#### 4.1.4. Modos de proyección

En esta ventana indicamos el plano en el que observaremos los resultados obtenidos. Estos planos no tienen porqué coincidir con los puertos de entrada y salida del dispositivo, si no que pueden estar desplazados para poder ver el campo eléctrico en el interior de la estructura.

#### 4.1.5. Estrategia de resolución

Para resolver el problema necesitamos conocer varios parámetros como los siguientes:

Frecuencia del problema:(Hz): indica la frecuencia usada en el problema. En caso de que esté activada la opción *Frequency sweep* el problema realizará un barrido entre las frecuencias que nosotros le indiquemos.

Solvers:



Figura 4.5: Frecuencias

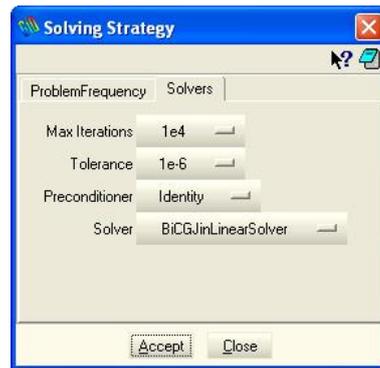


Figura 4.6: Solvers

Los campos siguientes tienen relación con la resolución de las ecuaciones lineales obtenidas con el método de los elementos finitos y, básicamente, definen la precisión de las magnitudes físicas buscadas (el campo eléctrico) y el número máximo de iteraciones permitidas para obtenerlas. Esto se debe a que los métodos iterativos parten de una solución inicial aproximada que, si todo va bien, converge en la solución real en sucesivas iteraciones.

*Max Iterations:* indican el número máximo de iteraciones que realiza el algoritmo para resolver el sistema de ecuaciones. Seleccionando la opción ``Custom``, este valor puede modificarse manualmente. Pese a que no hay límites para este valor, un problema mal definido puede acarrear excesivas iteraciones y, por tanto, que el programa emplee demasiado tiempo en resolverlo.

*Tolerance:* indica el valor del error relativo permitido. Como en el caso anterior, seleccionando la opción ``Custom``, este valor puede ser modificado. ERMES resuelve un sistema de ecuaciones lineales iterativamente minimizando el error  $\frac{\|Ax-b\|}{\|b\|}$  hasta que alcanza un valor por debajo de la tolerancia especificada.

#### 4.1.6. Resultados

Podemos obtener distintos resultados que hay que indicar al programa previamente a la simulación. Por ejemplo, marcaremos la opción de campo eléctrico en el dominio temporal si, después, queremos animar la propagación de dicho campo en el tiempo.

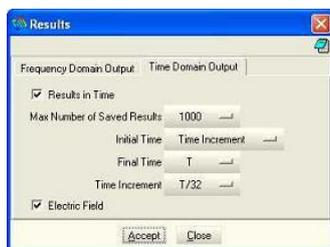


Figura 4.7: Resultados en el dominio del tiempo

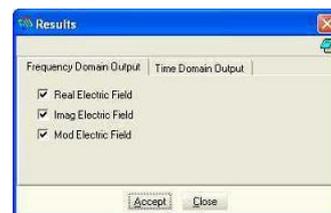


Figura 4.8: Resultados en el dominio de la frecuencia

### 4.1.7. Mallado

El método de elementos finitos, que es en el que está basado nuestro programa, se basa en una discretización de la figura en nodos unidos entre sí por una malla (mirar capítulo 3). En este apartado explicaremos diversas formas de generar dicha malla y diversos factores ha tener en cuenta antes de hacerlo.

El programa intentará usar el menor número de elementos para encajar en la geometría con un error menor del 1 %, pero esto depende completamente del modelo geométrico así que debe ser verificado. Usar un gran número de elementos aumenta el tiempo necesario para generar la malla así como el tiempo de computación. Por esta razón, el usuario puede modificar, tanto el tamaño medio de los elementos, como definir ciertas áreas con elementos de diferentes tamaños (asignados sobre entidades geométricas).

A la hora de elegir el tamaño de los elementos de la malla, hemos de tener en cuenta que el programa debe disponer de suficientes puntos de cálculo como para poder resolver el problema. Atendiendo a las consideraciones geométricas, estos puntos deben encontrarse a una distancia típica menor que  $\frac{\lambda}{10}$  para que el modelado de la estructura por la malla sea adecuado.

Los detalles concretos sobre la generación de la malla se pueden encontrar en la ayuda de GiD, pero es importante recordar dos parámetros importantes:

1. tamaño medio de los elementos: valor necesario para crear la malla;
2. tamaño específico de los elementos: tamaño aplicado sobre diferentes entidades geométricas (puntos, líneas, superficies) o por criterio adaptativo (By geometry, By cordal error, Correct sizes);

Además, también podemos refinar el mallado en los puntos, líneas o superficies que nos interese. De esta forma, podemos mejorar la precisión de nuestros cálculos.

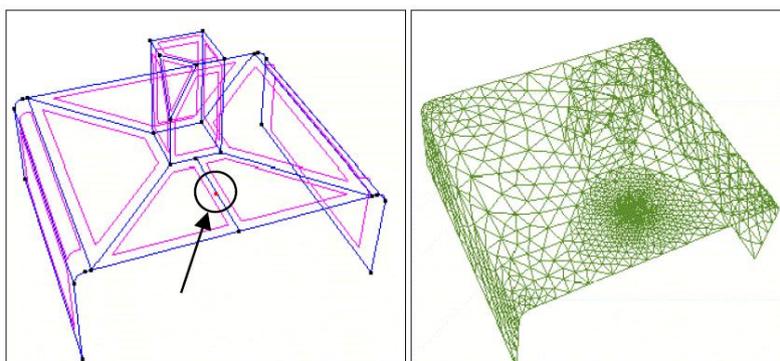


Figura 4.9: Malla con concentración de elementos alrededor de un punto

El número de nodos será mucho mayor en la zona donde hemos seleccionado las líneas con un tamaño de elementos menor y el cálculo será más preciso en dicha zona.

Para ver un ejemplo detallado de cómo mallas distintas zonas con tamaños de elementos

distintos, ir al ejemplo del anexo B, el cual, además, está explicado a modo de manual para ver paso a paso todo el proceso de simulación y su resultado.

#### 4.1.8. Cálculo

Una vez el problema está definido (geometría, condiciones, etc), el programa tiene que resolver las correspondientes ecuaciones a través del módulo ERMES.

Todo el proceso puede ser monitorizado usando la ventana `Calculate` → `Calculate window`. En el `Process window` aparece listado el problema que se está desarrollando. Mientras que, en `View process info` aparecen mensajes informando sobre el desarrollo del problema (datos leídos, iteraciones, progreso computacional, etc.). Esta ventana es especialmente útil para identificar situaciones anormales (no convergencia, resultados no esperados o incorrectos).

Si aparece algún mensaje de error, quiere decir que ha habido algún problema que impide realizar la simulación, y todos los datos (materiales asignados, condiciones de contorno) deben ser revisados, ya que un error típico es definir mal el problema. Si el problema persiste y no converge, esto también puede ser debido a que el número máximo de iteraciones siguen siendo pocas o a que la tolerancia que le hemos indicado es muy estricta y el número de iteraciones necesarias es demasiado elevado.

## 4.2. POSTPROCESO

En este apartado veremos cómo visualizar distintos resultados una vez realizados los cálculos por ERMES y resuelto el problema. Este postproceso se realiza desde el propio GiD.

### 4.2.1. Visualización de resultados

Hay muchas posibilidades de visualización y la explicación de todas ellas las podemos encontrar en la ayuda de GiD [3].

Las ventanas más útiles para visualizar resultados son las que nos muestran las figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

La primera ventana (`View Style`) muestra la composición del modelo usando la definición de capas y la interpretación del estilo (contorno, líneas, cuerpo). La segunda (`View Results`) muestra las magnitudes físicas a visualizar, por ejemplo, en el caso de ERMES:

- Componente real del campo eléctrico;
- Componente imaginaria del campo eléctrico;

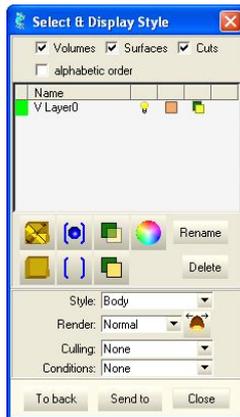


Figura 4.10: Estilo

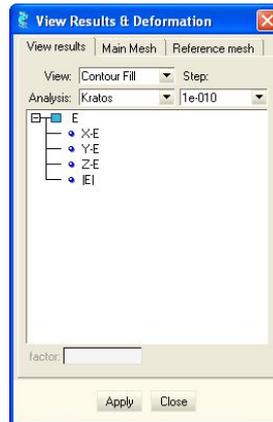


Figura 4.11: Vista de los resultados

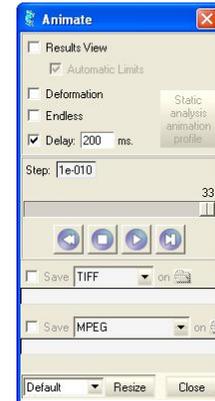


Figura 4.12: Animación de los resultados

- Módulo del campo eléctrico;

Estos resultados solo se pueden visualizar si el tiempo seleccionado es cero. Si queremos ver los resultados en función del tiempo, tenemos que seleccionar un tiempo distinto de 0 y podremos ver, en el caso de ERMES:

- Campo eléctrico en el dominio temporal;

Solo en este caso es útil la tercera ventana (''Animate''). Ésta ventana permite al usuario animar los resultados y ver su variación a lo largo del tiempo.

#### 4.2.2. Parámetros de Scattering

Los parámetros  $S_{ij}$  nos muestran la relación entre las amplitudes de las ondas transmitidas o reflejadas y las amplitudes de las ondas incidentes.

Por ejemplo,  $S_{11}$  y  $S_{21}$  indican cuanta señal se refleja en el puerto 1 y cuanta se transmite al puerto 2 cuando incide una señal en el puerto 1 y el puerto 2 está perfectamente adaptado (no hay reflexiones tras él ni fuentes). Respectivamente,  $S_{22}$  y  $S_{12}$  indican cuanta señal se refleja en el puerto 2 y cuanta se transmite al puerto 1 cuando incide una señal en el puerto 2 y el puerto 1 está perfectamente adaptado (no hay reflexiones tras él ni fuentes).

Finalmente, cuando los dispositivos presentan elevadas simetrías (como es el caso de los que hemos analizado en este trabajo), algunos de los parámetros de scattering coincidirán entre ellos.

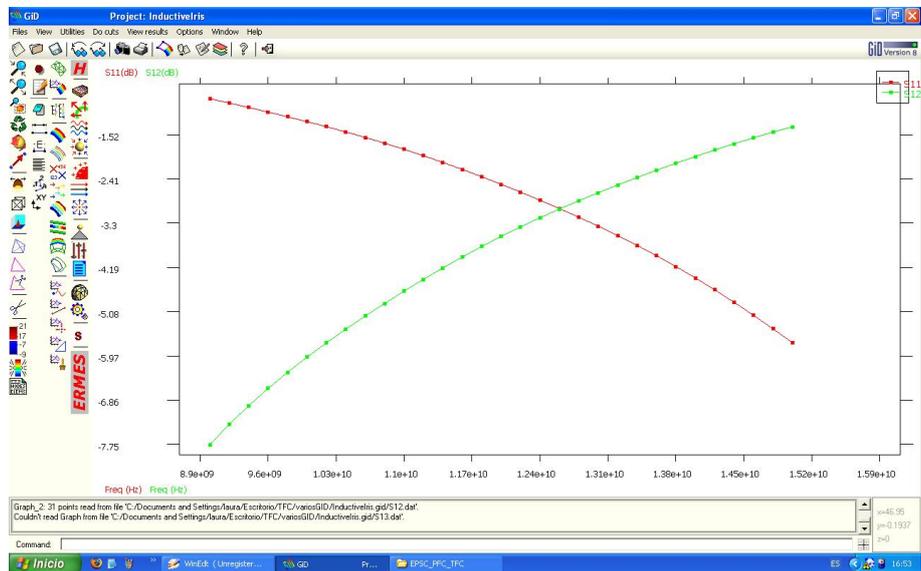


Figura 4.13: Gràfica de los parámetro S

## CAPÍTULO 5. PROPUESTA DE EJEMPLOS

En este capítulo, propondremos una serie de ejemplos sobre los que aplicar el programa y observar los resultados. Estos ejemplos se basan en guías de onda de sección rectangular sobre los que estudiaremos la propagación del campo eléctrico en su interior y las gráficas de parámetros S en posteriores capítulos.

Estos ejemplos son:

### 5.1. Inductive Iris

Se trata de una guía de onda rectangular con un estrechamiento en el centro llamada iris. Este primer ejemplo nos puede servir para demostrar que la solución de campo eléctrico proporcionada por el programa se corresponde con las soluciones analíticas. Además, veremos cómo afecta este iris al comportamiento de la guía y cómo un cambio en la geometría o en el tamaño de los elementos de la malla puede modificar los resultados.

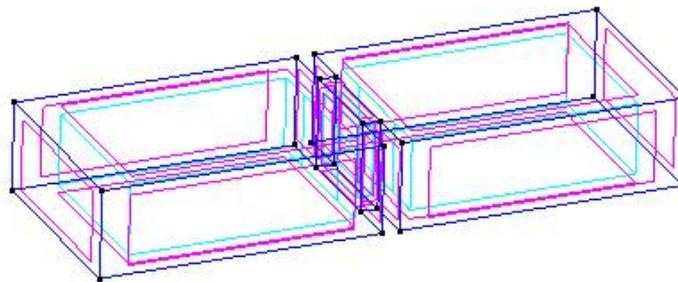


Figura 5.1: Inductive Iris

Este ejemplo está desarrollado paso a paso en el anexo B para que pueda servir también de tutorial.

### 5.2. TJunction

Este caso es una guía de onda rectangular con un puerto de entrada y dos de salida. Aquí veremos qué sucede en los diferentes puertos cuando excitamos uno de ellos con el modo fundamental. Este ejemplo también nos sirve para verificar que la gráfica de parámetros S obtenida por ERMES coincide con las soluciones obtenidas por otros programas.

Aunque veremos los resultados en el capítulo 6, tenemos el ejemplo completo en el anexo C.

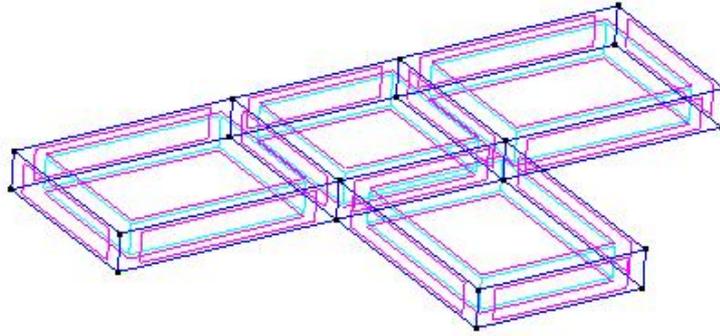


Figura 5.2: TJunction

### 5.3. Guía de onda con una transición de altura constante

Este ejemplo muestra también una guía de onda rectangular pero con una discontinuidad diferente, en este caso la guía sufre un ensanchamiento. Además, estudiaremos los casos en el que los puertos de entrada y salida estén más cerca y más lejos del momento en que se produce el ensanchamiento. En este caso podremos observar la influencia de los modos evanescentes en las gráficas de los parámetros S.

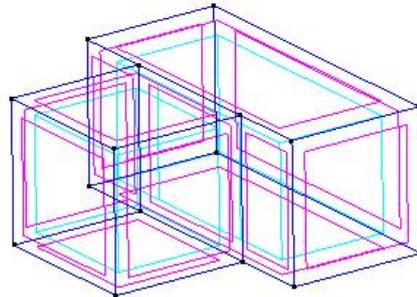


Figura 5.3: Transición de altura constante

De nuevo podemos ir a los anexos (al anexo D en este caso) para ver el ejemplo desarrollado.

### 5.4. Guía de onda con seis iris inductivos

Esta guía es una estructura con seis iris inductivos. Estos iris le darán unas características muy especiales a la guía que provocarán resonancias en la misma. Este ejemplo nos puede servir para validar las gráficas de parámetros S del programa que se corresponden con las gráficas obtenidas por otro programa. Para ver el ejemplo completo ir al anexo E.

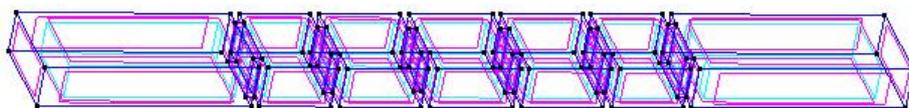


Figura 5.4: Guía de onda con seis iris inductivos

## 5.5. Capacitive Iris

Éste es un caso particular de guía de onda en el que se produce un estrechamiento en la parte central de la misma pero, al contrario que en el Inductive Iris que mantenía la altura constante, en este caso lo que no cambia es el ancho de la guía. En este ejemplo, lo que veremos es un caso que no podemos solucionar.

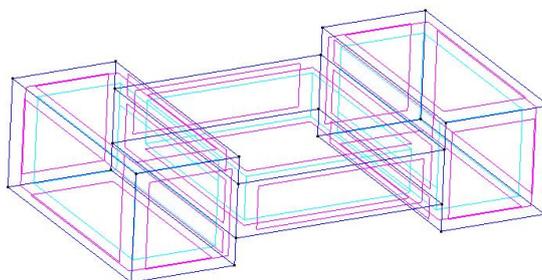


Figura 5.5: Capacitive Iris

Para ver el desarrollo completo de este ejemplo ir al anexo F.



## CAPÍTULO 6. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA

En este capítulo exponemos el núcleo principal del trabajo, que contiene la principal contribución de la autora a este programa de simulación, que es la ampliación de la interface del programa ERMES y la validación de los ejemplos propuestos en el capítulo 5.

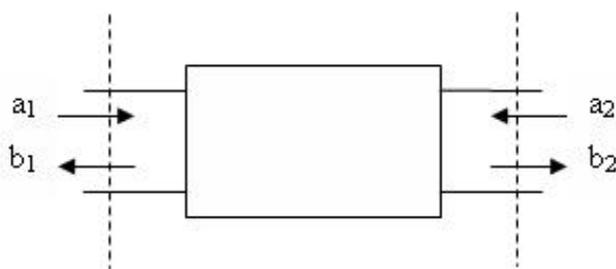
### 6.1. Ampliación de ERMES

Hemos realizado algunas mejoras en la interfaz de ERMES que le permitan obtener nuevos resultados. Se trata de la obtención de las gráficas de parámetros S. Hagamos primero una pequeña introducción a estos parámetros para saber qué son.

#### Parámetros S:

Los parámetros de scattering (también conocidos como parámetros de dispersión, de distribución o simplemente parámetros S) son una serie de parámetros presentados en forma matricial que permiten modelar un dispositivo de N puertas. La ventaja de estos parámetros es que permiten ver de forma intuitiva el comportamiento del dispositivo respecto a ondas incidentes, transmitidas y reflejadas. Otra ventaja de emplear estos parámetros para caracterizar un dispositivo es la posibilidad de obtenerlos a partir de medidas en frecuencia, puesto que se pueden conseguir a partir de relaciones de onda estacionaria, medidas de máximos y mínimos de campo eléctrico y de potencia.

En la figura 6.1. vemos un dispositivo de dos puertas que queremos modelar mediante parámetros S. Para ello consideramos que sobre el dispositivo se aplican unas ondas de potencia incidentes en los puertos. Estas ondas incidentes ( $a_i$ ) producirán ondas reflejadas y ondas transmitidas ( $b_i$ ). La relación entre estas ondas reflejadas/transmitidas y las ondas incidentes constituyen los parámetros S.



La matriz de parámetros de scattering asociada a la figura anterior tendrá la forma:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

Con  $S_{11}$  indicando la relación entre la onda reflejada en el puerto 1 ( $b_1$ ) y la onda incidente en el mismo ( $a_1$ ) cuando el puerto 2 está perfectamente adaptado ( $a_2 = 0$ ),  $S_{21}$  la relación

entre la onda transmitida en el puerto 2 ( $b_2$ ) y la onda incidente en el puerto 1 ( $a_1$ ) cuando el puerto 2 está perfectamente adaptado ( $a_2 = 0$ ),  $S_{12}$  la relación entre la onda transmitida en el puerto 1 ( $b_1$ ) y la onda incidente en el puerto 2 ( $a_2$ ) cuando el puerto 1 está perfectamente adaptado ( $a_1 = 0$ ) y  $S_{22}$  la relación entre la onda reflejada en el puerto 2 ( $b_2$ ) y la onda incidente en el mismo puerto ( $a_2$ ) y el puerto 1 está perfectamente adaptado ( $a_1 = 0$ ).

Dicho de otro modo,  $S_{11}$  y  $S_{21}$  indican cuanta señal se refleja en el puerto 1 y cuanta se transmite al puerto 2 cuando incide una señal en el puerto 1 y el puerto 2 está perfectamente adaptado (no hay reflexiones tras él ni fuentes). Respectivamente,  $S_{22}$  y  $S_{12}$  indican cuanta señal se refleja en el puerto 2 y cuanta se transmite al puerto 1 cuando incide una señal en el puerto 2 y el puerto 1 está perfectamente adaptado (no hay reflexiones tras él ni fuentes).

Finalmente, cuando los dispositivos presentan elevadas simetrías (como es el caso de los que hemos analizado en este trabajo), algunos de los parámetros de scattering coincidirán entre ellos.

Una de las tareas llevadas a cabo en el proyecto a sido la modificación de la interfaz de ERMES de tal modo que, en el postproceso, aparezca un nuevo botón que nos muestre las gráficas de parámetros S tal y como muestra la figura 6.1. Este proceso está desarrollado en lenguaje TCL/TK y el código completo se encuentra en el anexo G.

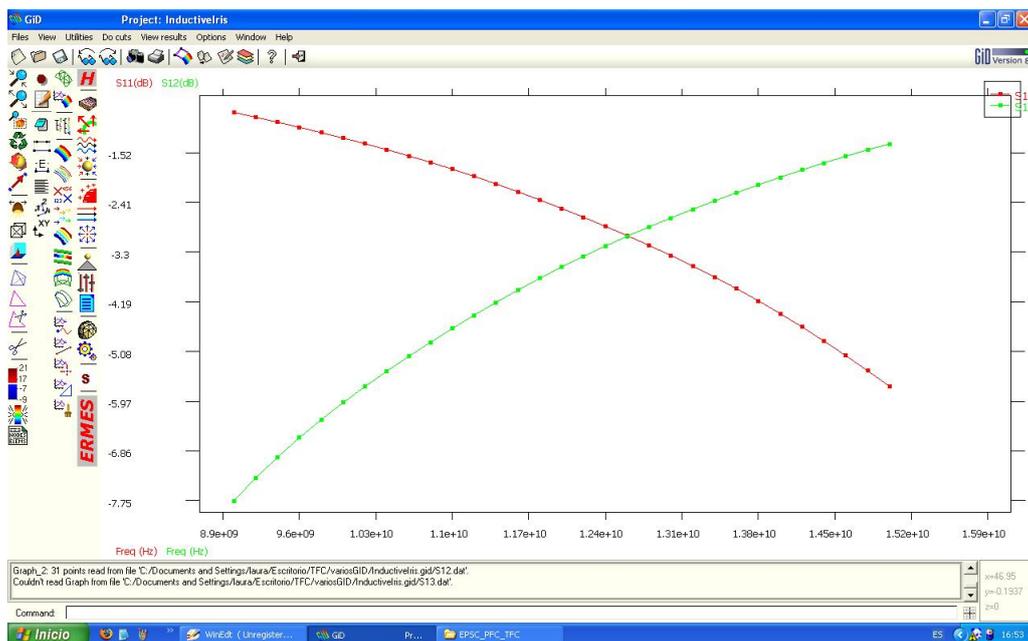


Figura 6.1: Gráfica de los parámetro S

También hemos creado paralelamente la ayuda del programa en lenguaje html.

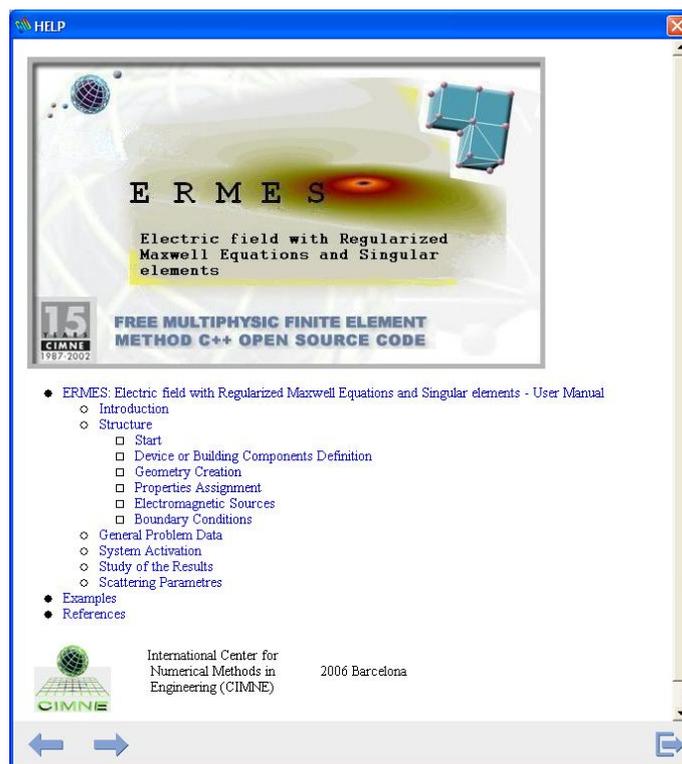


Figura 6.2: Página principal de la ayuda de ERMES

## 6.2. Validación de los ejemplos

En este apartado vamos a validar los ejemplos propuestos en el capítulo 5. En esta validación comprobaremos dos cosas: por un lado, cómo se propaga el campo eléctrico a lo largo de la guía de onda, y por otro, analizaremos las gráficas de parámetros S, que nos darán información sobre el dispositivo que estamos estudiando. Además, compararemos los resultados obtenidos por ERMES con los que obtenemos de otro software llamado FEST3D cuyos resultados nos servirán de referencia. FEST (Fullwave Electromagnetic Simulation tool) es una herramienta de software enfocada al diseño y simulación de circuitos de microondas.

### 6.2.1. Inductive Iris

En este ejemplo, medimos el campo eléctrico en  $f = 13\text{GHz}$ , que es una frecuencia ligeramente superior a la frecuencia de corte, y escogemos un tamaño máximo de los elementos de la malla de  $0,001\text{m}$  (valor inferior a  $\lambda/10$ ). Observamos el resultado obtenido en la figura 6.3. También podemos ver como varía ese resultado si alejamos los puertos al doble de distancia (figura 6.4), es decir, que si la distancia entre los puertos antes era de  $66\text{mm}$  ahora será de  $130\text{mm}$ , o si los acercamos reduciendo esa distancia a la mitad (figura 6.5, nueva distancia entre los puertos= $33\text{mm}$ ).

Observamos como el modo que se propaga a lo largo de la guía es el modo fundamental  $\text{TE}_{10}$ . Podemos comprobar como la forma del campo coincide con lo dicho en la teoría

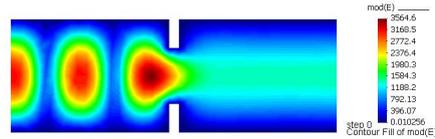
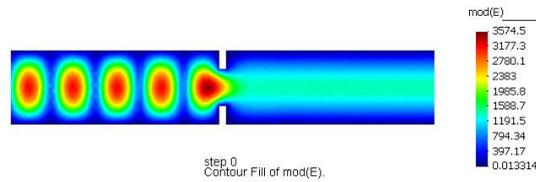
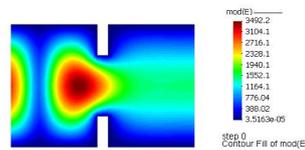


Figura 6.3: Variación del campo eléctrico

Figura 6.4:  $|E|$  si alejamos los puertosFigura 6.5:  $|E|$  si acercamos los puertos

(Capítulo 3) para el modo fundamental. Dicho campo tiene una forma senoidal que podemos ver si hacemos un corte transversal en la guía porque éste se anula en los bordes de la guía y alcanza su máximo valor en el centro. La forma de los campos es idéntica para todas las longitudes de guía probadas.

Ahora hacemos el barrido de frecuencias entre 9 y 15GHz para ver las gráficas de parámetros S y las comparamos con los resultados del FEST que tomamos como referencia. Con el mallado anterior (todos los elementos igual) no nos da buenos resultados, como se ve en la figura 6.7, así que mallamos más fino las líneas que forman el iris puesto que ésta es la zona problemática. En este caso el tamaño de los elementos en las líneas que forman el iris será 0,0001m y en el resto será 0,001m.

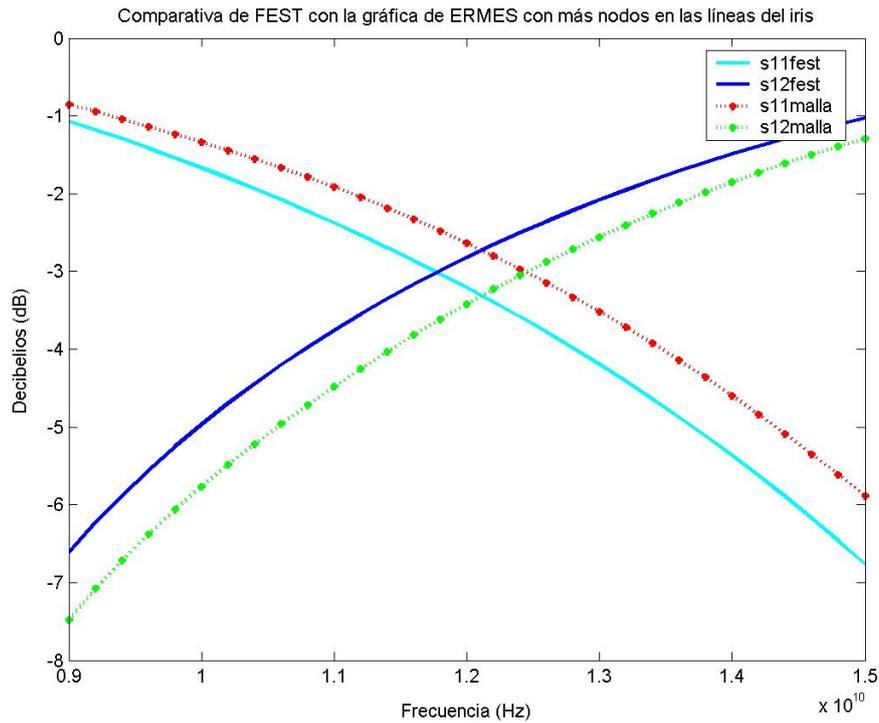


Figura 6.6: Comparativa de las gráficas de parámetros S con mallado grueso

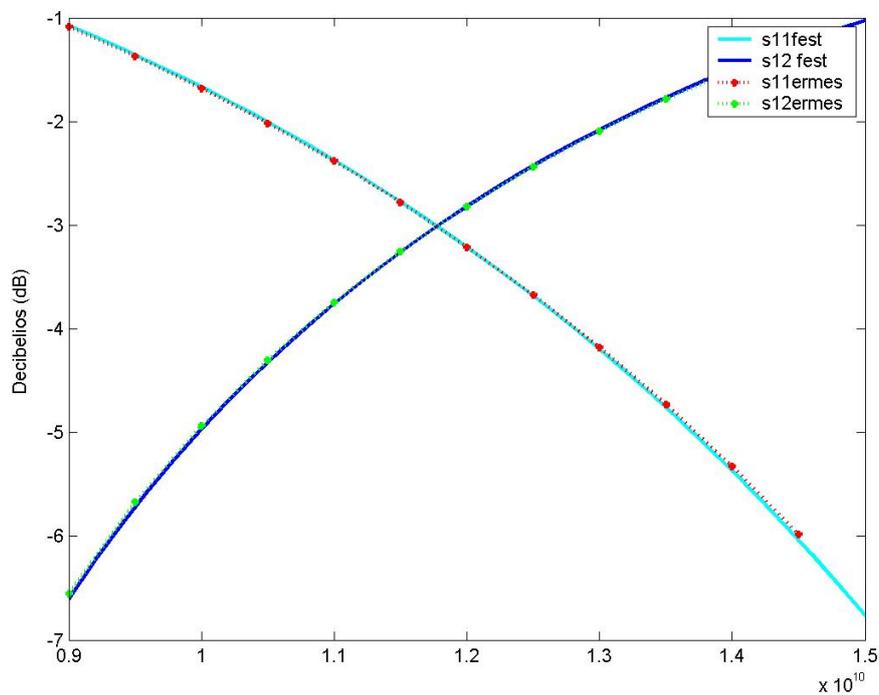


Figura 6.7: Comparativa de las gráficas de parámetros S, resolvemos el mismo ejemplo con ERMES y FEST (figura 6.3)

Todas las gráficas son idénticas, esto quiere decir que hemos resuelto bien el problema.

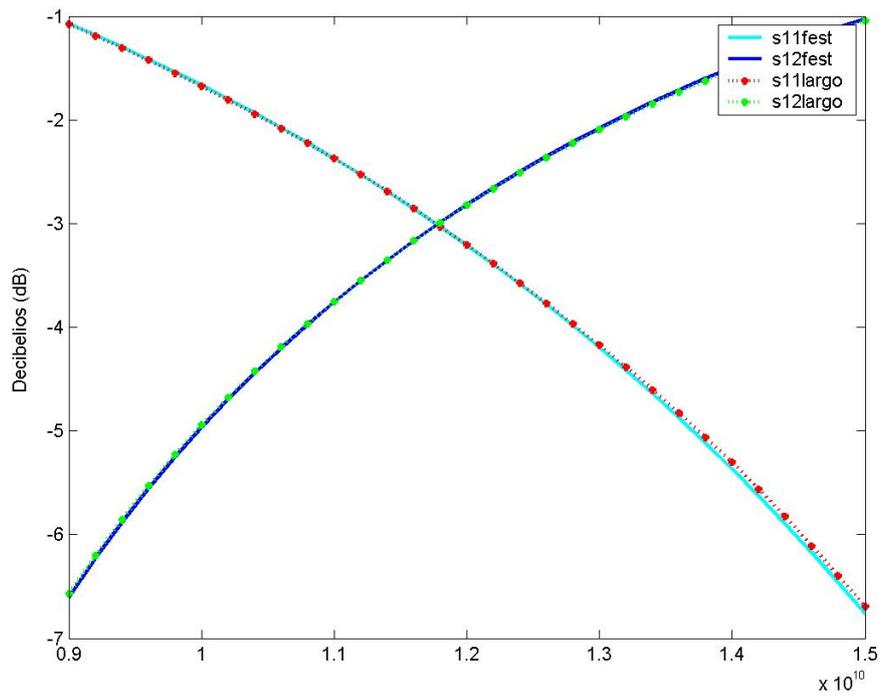


Figura 6.8: Comparativa de las gráficas de parámetros S de FEST con la figura 6.4

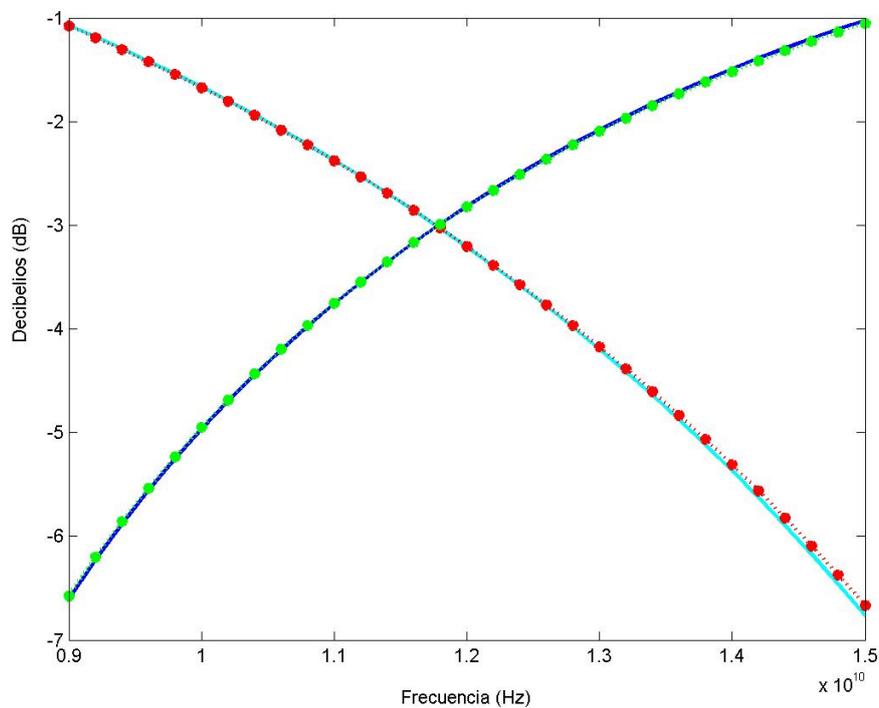


Figura 6.9: Comparativa de las gráficas de parámetros S de FEST con la figura 6.5

También comprobamos que una de las claves de este resultado es que hemos escogido un tamaño para los elementos lo suficientemente pequeño puesto que, si no, nuestra

gráfica ya no se parece tanto a la de FEST. El hecho de que  $S_{11}$  disminuya con la frecuencia y  $S_{12}$  aumente nos permite ver claramente el comportamiento inductivo del iris, que corresponde a un filtrado paso alto.

Debido a la simetría que presenta el modo  $TE_{10}$ , podemos comprobar como se obtienen los mismo resultados si partimos la guía a través del eje Z y consideramos que la componente tangente del campo eléctrico es cero en la nueva “pared” de la guía. Esto se puede realizar debido a que el modo  $TE_{10}$  cumple las condiciones de contorno en el plano medio (paralelo a la dirección de propagación) de la guía, es decir, las componentes normales de campo eléctrico son nulas. Además, este corte nos permitirá ver mejor como se propaga el modo fundamental a lo largo de la guía y reducirá el tiempo de cálculo al contar con la mitad de incógnitas. El resultado lo podemos ver en la gráfica 6.10.

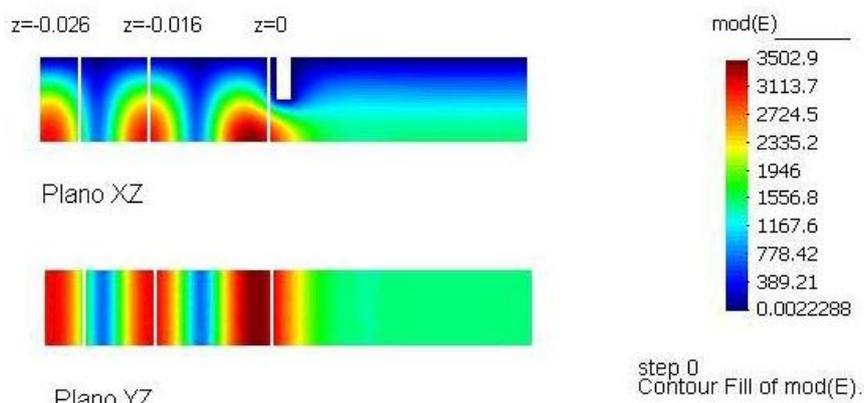


Figura 6.10: Cortes simétricos de la guía en los planos XZ e YZ, siendo Z la dirección de propagación

Podemos ver como se propaga el campo en el interior de la guía haciendo cortes perpendiculares a la dirección de propagación (Z), en el plano XY. En la figura 6.11 podemos ver el campo en en  $z=-0.026$ ,  $z=-0.016$  y  $z=0$ .

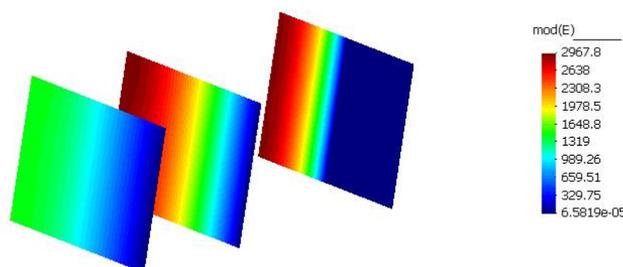


Figura 6.11: Cortes simétricos de la guía en el plano XY, siendo Z la dirección de propagación

Otra forma de ver el campo es mediante vectores. En el caso de la gráfica 6.12 podemos ver la parte real del campo eléctrico.

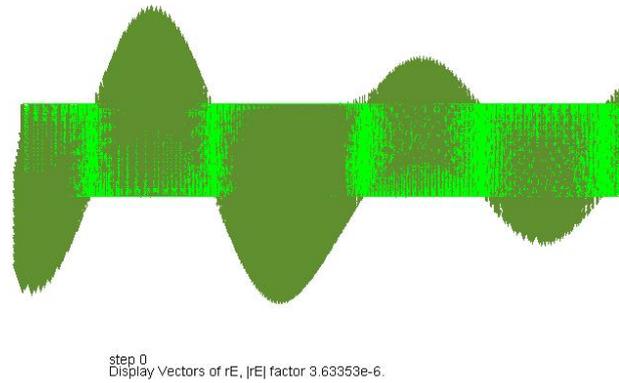


Figura 6.12: Representación mediante vectores del campo eléctrico en el plano YZ

En resumen, las conclusiones de este ejemplo son:

- El aumentar el mallado en la zona conflictiva nos ofrece variaciones significativas de los resultados, lo que indica que el mallado original no aproximaba bien la estructura a analizar.
- Respecto a la propagación del campo eléctrico vemos cómo se propaga el modo fundamental a lo largo de la guía.
- Según los parámetros  $S$ , vemos que para frecuencias bajas el dispositivo a penas transmite la señal, mientras que para frecuencias altas la transmite casi en su totalidad. Es aproximadamente a 12.5GHz cuando  $S_{11}$  se iguala a  $S_{12}$  y la potencia transmitida es igual a la reflejada y corresponde a la mitad de la potencia de entrada. Por lo tanto, el estrechamiento actúa como filtro paso alto.

Para ver el ejemplo completo acudir al anexo B.

## 6.2.2. TJuntion

En este caso la geometría es una T, es decir, se trata de un dispositivo de 3 puertos (puerto 0, puerto 1 y puerto 2). Excitaremos al puerto 0 con el modo  $TE_{10}$  y veremos la transmisión al puerto 2, al 1 y la reflexión en el propio puerto 0.

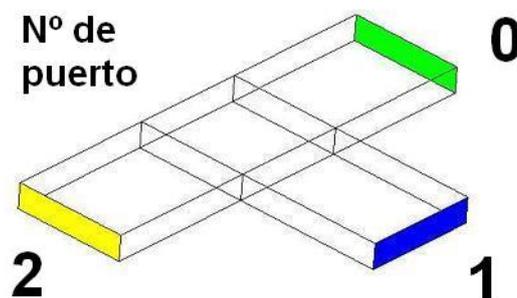


Figura 6.13: N° de puertos

Medimos el campo eléctrico en  $f = 9\text{GHz}$  (la frecuencia de corte es de  $6,5\text{ GHz}$ ). El tamaño máximo de los elementos de la malla será de  $0.001\text{m}$ .

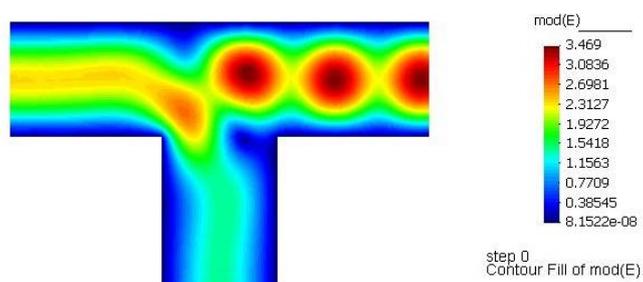


Figura 6.14: Variación del campo eléctrico

En la gráfica podemos observar como  $|E|$  se transmite del puerto 0 al 2, aunque una pequeña parte de la onda se propaga al puerto 1.

Respecto a los parámetro S, nos interesa  $S_{11}$ , porque es la potencia reflejada,  $S_{13}$ , que es la potencia que se transmite del puerto 1 al 3, y  $S_{12}$  que es la potencia que se transmite del puerto 1 al 2 y que, en este caso, es mucho menor. Vemos que las gráficas de FEST y ERMES son iguales.

Este tipo de estructura en forma de T es una red de tres puertos que puede utilizarse para dividir o combinar potencia. En nuestro caso se usará para transmitir señal principalmente del puerto 0 al 2 a una frecuencia entre  $7$  y  $12\text{ GHz}$ .

Para ver el ejemplo completo acudir al anexo C.

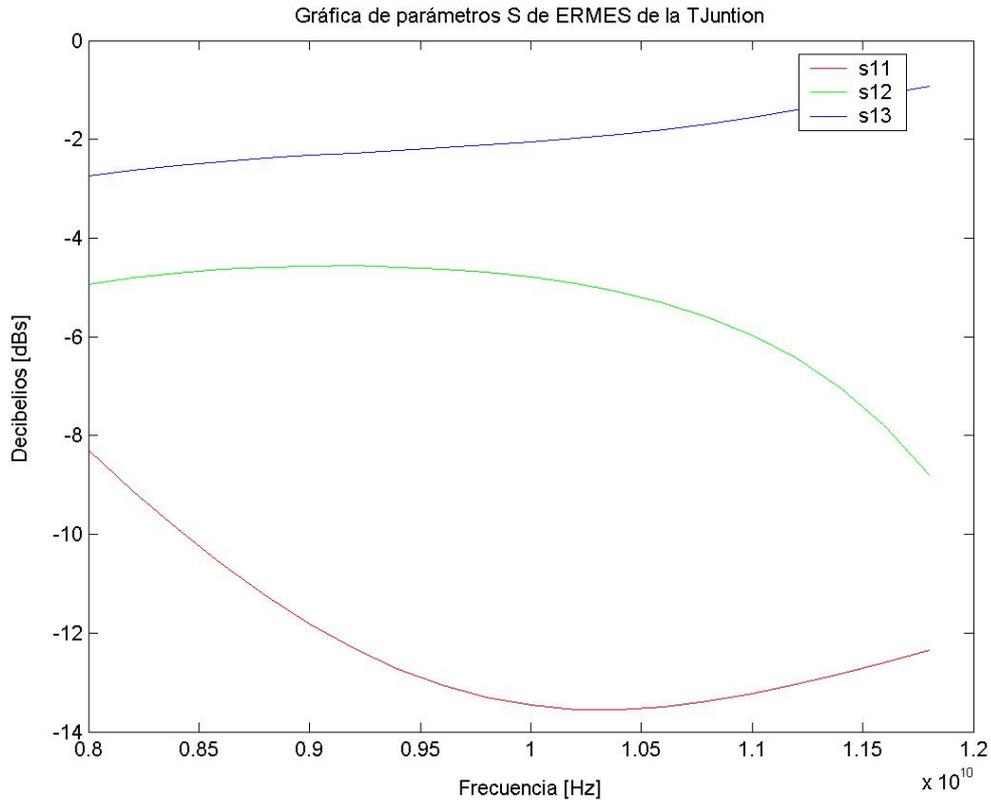


Figura 6.15: Gráfica de parámetros S de ERMES, TJunction

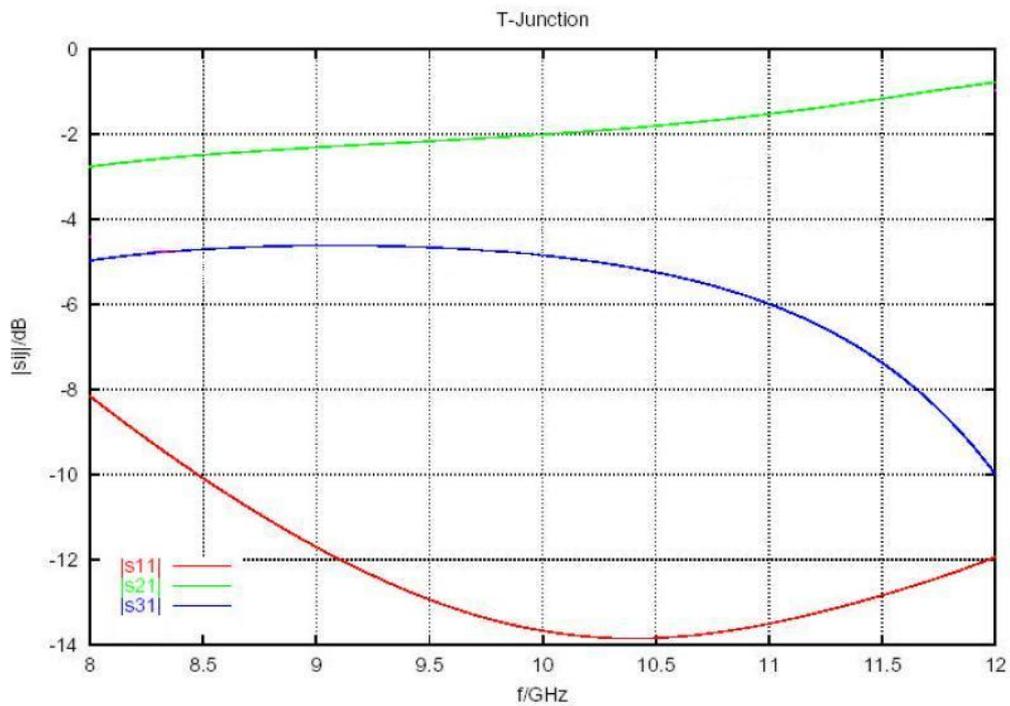


Figura 6.16: Gráfica de parámetros S de FEST, TJunction

### 6.2.3. Guía de onda con una transición de altura constante

En este ejemplo, medimos el campo eléctrico en  $f = 15\text{GHz}$ , que es una frecuencia ligeramente superior que la frecuencia de corte, y escogemos un tamaño máximo de los elementos de la malla de  $0,002\text{m}$  (valor inferior a  $\lambda/10$ ). Indicamos en la figura 6.17 qué puerto es el de entrada y cual el de salida.

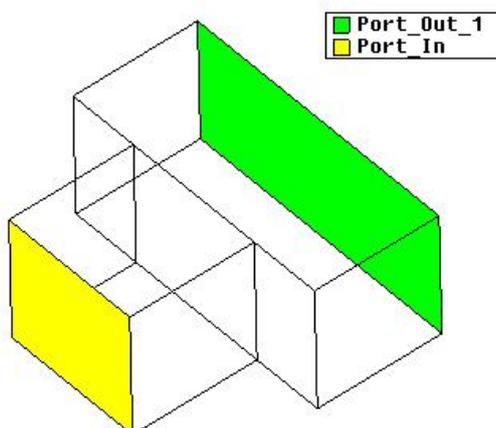


Figura 6.17: Puertos de entrada y salida

Observamos el campo obtenido en la figura 6.18. También podemos ver como varía este campo si alejamos los puertos al doble de distancia (figura 6.19), o si los acercamos reduciendo esa distancia a la mitad (figura 6.20).

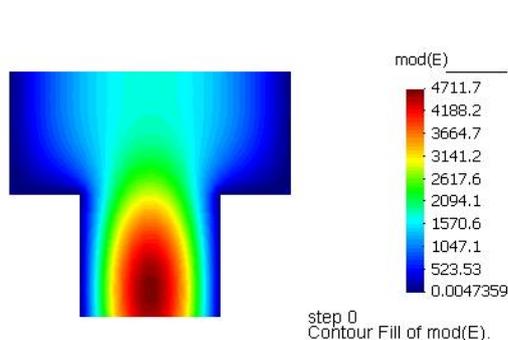


Figura 6.18: Variación del campo eléctrico

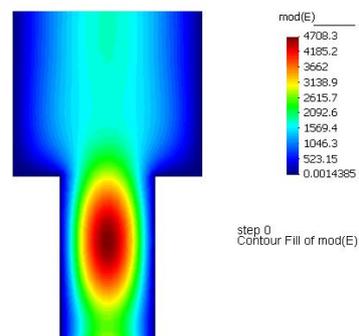


Figura 6.19:  $|E|$  si alejamos los puertos

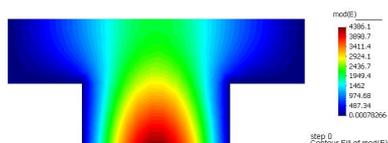


Figura 6.20:  $|E|$  si acercamos los puertos

Tomamos de nuevo la gráfica de parámetros S de FEST como referencia y la comparamos con los resultados de ERMES en el caso general (figura 6.21), en el caso en que

alejamos el puerto de salida al doble de distancia (en este caso, solo alargamos el puerto de salida, no el de entrada, así, los puertos pasarán de estar a una distancia de 20mm a una de 30mm), y en el caso en que acerquemos los puertos a la mitad de distancia (figura 6.23).

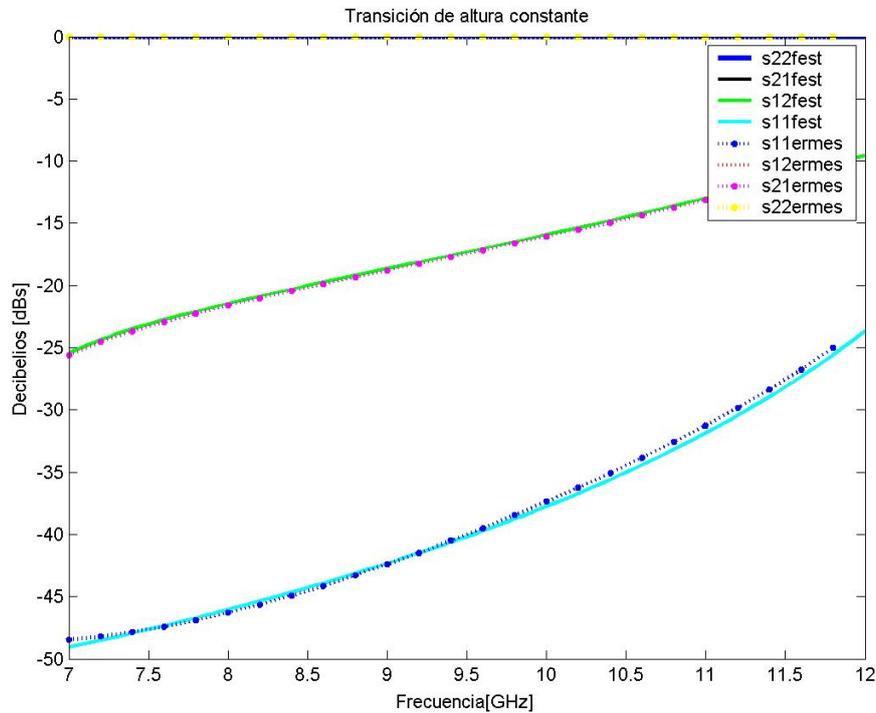


Figura 6.21: Comparativa de las gráficas de parámetros S, resolvemos el mismo ejemplo con ERMES y FEST (figura 6.18)

En el caso de las gráficas de parámetro S vemos que en los casos en que la estructura tiene la misma longitud en ERMES y FEST, y en el caso en que alejamos el puerto de excitación, los resultados coinciden. En el caso en que acercamos los puertos ya no coinciden los resultados.

Las diferencias que aparecen en el caso de acercar los puertos se deben a la aparición de los modos evanescentes. La presencia de la transición hace que, aunque la onda incidente corresponda a un modo  $TE_{10}$ , se exciten a ambos lados de la transición otros modos y que, mientras el modo fundamental se propaga de la forma  $e^{-j\beta z}$  (siendo Z la dirección de propagación), el resto de modos (los evanescentes) se atenúan de la forma  $e^{-\alpha z}$ , tal y como vimos en el capítulo 3, hasta desaparecer a cierta distancia de la transición. Si la guía de ondas es suficientemente larga a ambos lados de la transición, al excitar el modo  $TE_{10}$  en el puerto, sólo veremos este modo en la gráfica de parámetros S, pero si la distancia no es suficiente, los modos evanescentes no se habrán atenuado y aparecerán en ambos puertos. Como nosotros hemos introducido las condiciones de contorno suponiendo que solo está presente el modo  $TE_{10}$  pero vemos que aparecen otros modos, la definición de los puertos es incorrecta y habría que añadir más términos a las condiciones iniciales. En resumen, obtenemos malos resultados porque las condiciones de contorno aplicadas a los puertos (recordemos que se anula la componente normal del campo eléctrico) son incorrectas y hay que aumentar la distancia de los puertos a la transición para que solo

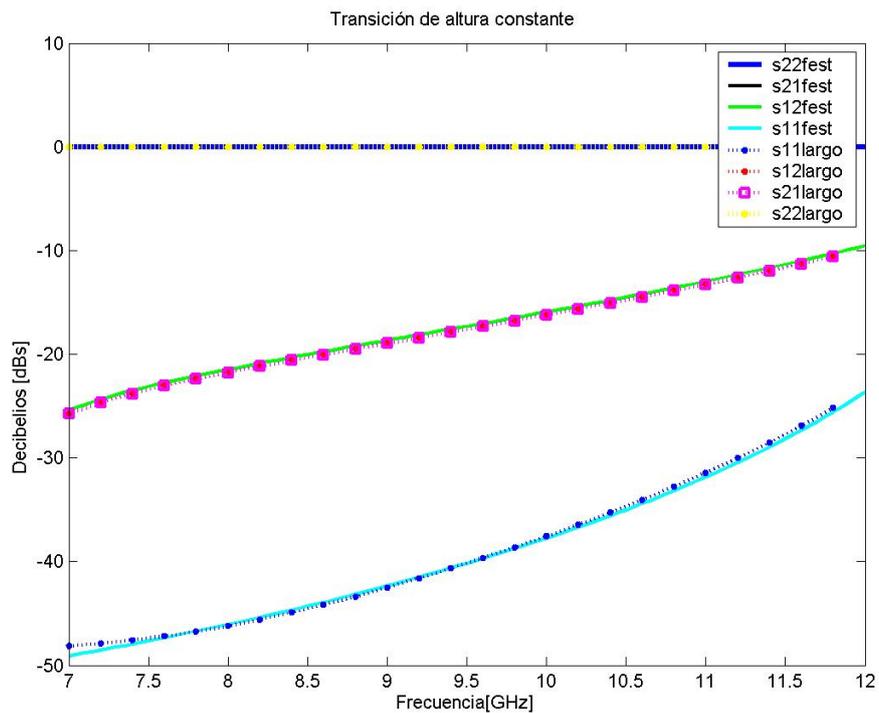


Figura 6.22: Comparativa de las gráficas de parámetros S de FEST con la figura 6.19

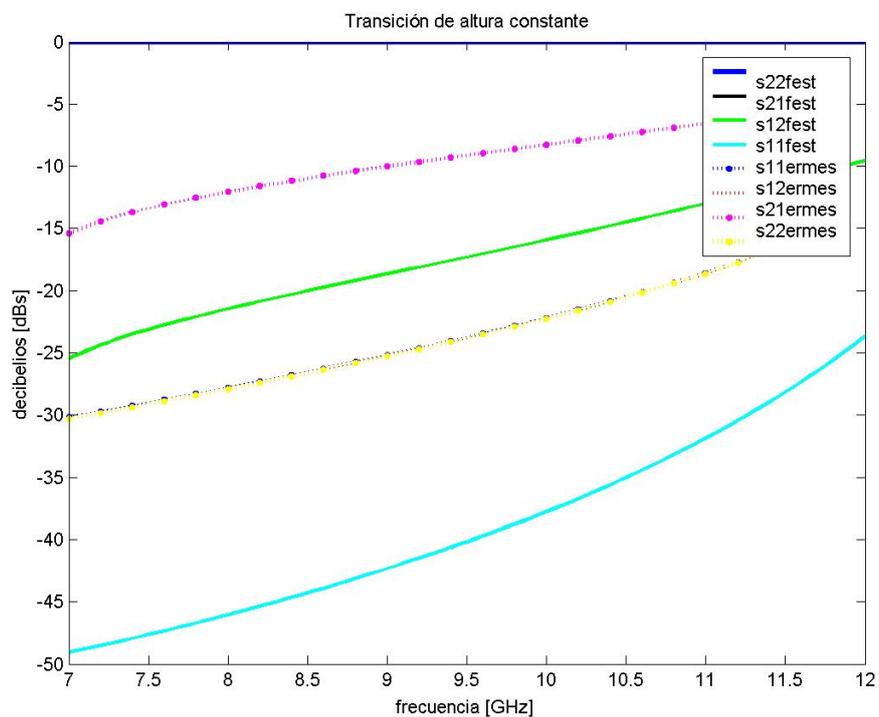


Figura 6.23: Comparativa de las gráficas de parámetros S de FEST con la figura 6.20

este presente el modo  $TE_{10}$ .

Hay que destacar que en el caso en que alejamos los puertos sólo coincide con la gráfica de FEST en el caso en que la longitud del puerto estrecho coincidan. Esto es debido a que el barrido de frecuencia se hace en modo corte para la primera cavidad, y si la distancia entre este puerto y la discontinuidad es mayor a la simulada por el FEST, el valor del campo en el plano de proyección se atenúa dando lugar a diferentes valores en los parámetros de Scattering.

Para ver el ejemplo completo acudir al anexo D.

### 6.2.4. Guía de onda con seis iris inductivos

En este caso aparecen en la guía varias cavidades resonantes. Sabemos que la frecuencia de corte del modo fundamental es de 7,5 GHz así que la guía no podrá transmitir información por debajo de esa frecuencia. Hacemos la prueba para una frecuencia de 6GHz y vemos, en la figura 6.24, como el campo ni siquiera pasa de la primera cavidad.

En cambio, para una frecuencia dentro del rango de 8.9 a 9.9 GHz, que es el rango de frecuencias en el que actúa como paso banda, vemos (figura 6.25) como el campo se propaga por toda la guía debido al comportamiento resonante de sus cavidades.

Para frecuencias muy altas, como los 20GHz de la figura 6.26, se propaga no uno sino varios modos. Esto sucede porque la frecuencia de trabajo es superior a la frecuencia de corte del modo 20:  $f_{c20} = \frac{1}{a\sqrt{\mu\epsilon}} = 14,98\text{GHz}$ .

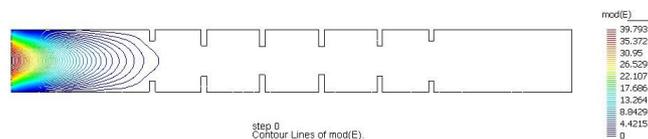


Figura 6.24: Para  $f=6\text{GHz}$  el campo no se propaga

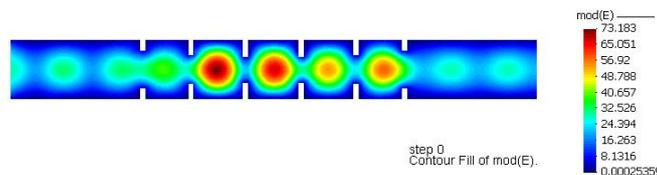


Figura 6.25: Para  $f=9,5\text{GHz}$  el campo se transmite

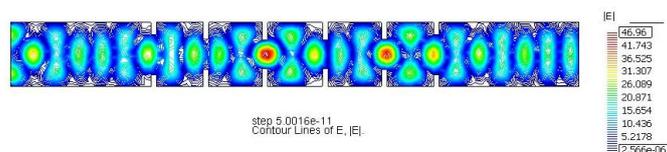


Figura 6.26: Para  $f=20\text{GHz}$  se propagan varios modos

Veamos ahora un corte de la estructura (por la mitad) y como se propaga el modo fundamental en su interior (figura 6.27):

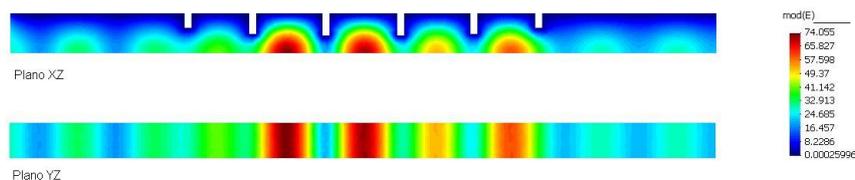


Figura 6.27: Corte en la estructura

Sobre las gráficas de parámetro S, nos interesa  $S_{11}$ , porque es la potencia reflejada, y  $S_{12}$ , que es la potencia que se transmite. Sabemos que nuestro ejemplo está construido como un filtro paso-banda entre 8.9 y 9.9 GHz, lo cual podemos ver claramente en las figuras 6.29 y 6.28.

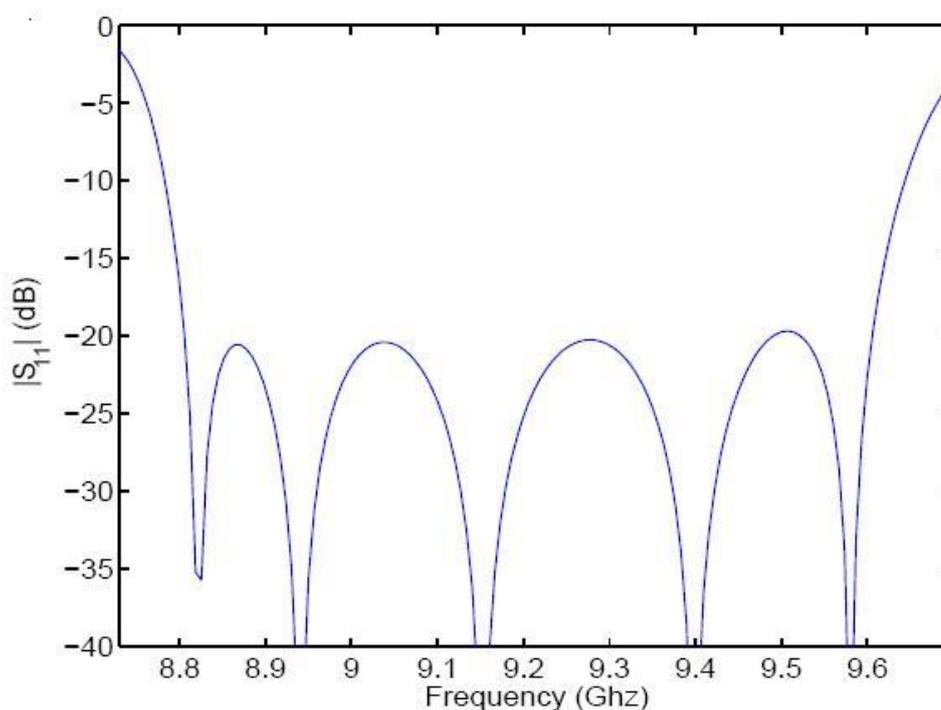


Figura 6.28: Gráficas de parámetros S

Por la gráfica del parámetro  $S_{11}$  vemos que es un filtro paso banda entre las frecuencias 8,9 y 9,9 MHz debido a que entre esas frecuencias la potencia reflejada es muy baja. Podemos observar el carácter resonante de cada una de las distintas cavidades y sus frecuencias centrales.

Este comportamiento del filtro sucede gracias a la intercalación de los iris en la estructura. Estos iris forman las distintas cavidades en la estructura, que tienen un comportamiento resonante y son las que provocan los ceros de la gráfica de parámetros S.

También podemos observar cómo se desplaza la gráfica hacia la solución correcta al mallar más fina la estructura (figura 6.30).

Para ver el ejemplo completo acudir al anexo E.

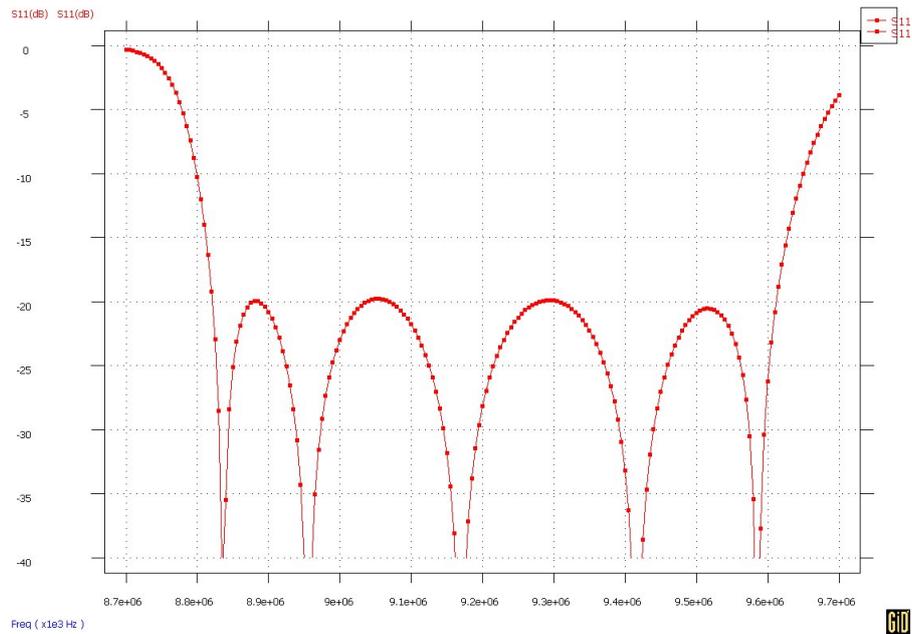


Figura 6.29: Gráficas de ERMES del parámetro S11

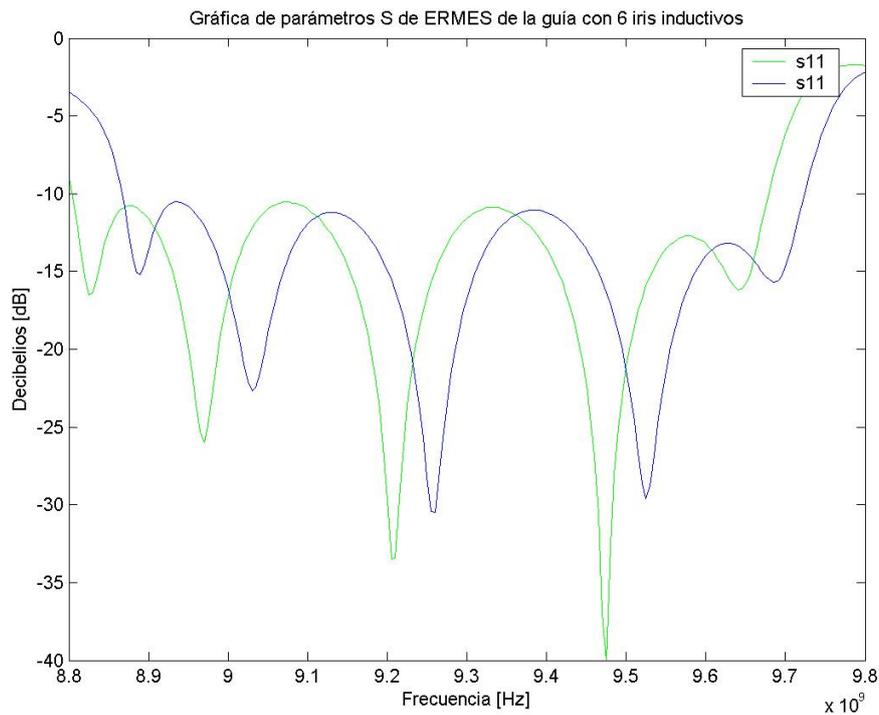


Figura 6.30: Evolución de parámetros S con el mallado, la verde con un mallado más fino

### 6.2.5. Capacitive Iris

En este ejemplo, medimos el campo eléctrico en  $f = 14\text{MHz}$ , el barrido de frecuencias lo hacemos entre 9 y 13MHz y el tamaño máximo de los elementos de la malla será de 0.002m.

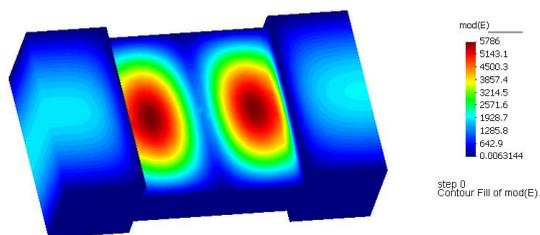


Figura 6.31: Variación del campo eléctrico

Podemos ver como se propaga el campo a lo largo de la guía sin problemas, y como el iris actúa como una cavidad resonante.

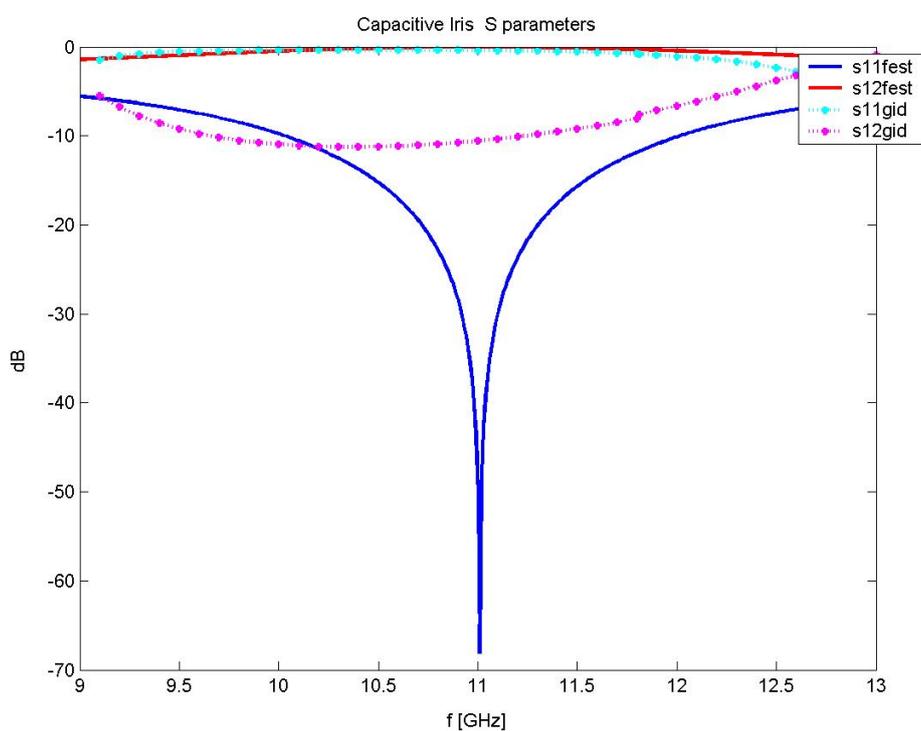


Figura 6.32: Comparativa de las gráficas de parámetros S, Capacitive Iris

Vemos que las gráficas de parámetros S obtenidas no se parecen en nada a las del otro programa de simulación. Esto es debido a una mala formulación del problema [6].

Para ver el ejemplo completo acudir al anexo F.

### 6.2.6. Tabla de resultados

<b>Inductive Iris</b>		
<i>Resultados esperados</i>	<i>Resultados obtenidos</i>	<i>Observaciones</i>
El campo eléctrico debe propagarse a lo largo de la guía.	El campo se transmite de la forma esperada.	El campo tiene la forma de seno correspondiente al modo TE <sub>10</sub>
Sabemos que se trata de un filtro paso alto con una frecuencia de corte de 12GHz	Los parámetros S11 y S12 coinciden en 12GHz siendo S12 mayor a partir de dicha frecuencia.	Comparamos con otro programa y mallamos más el iris para que el resultado sea mejor.
<b>TJuntion</b>		
<i>Resultados esperados</i>	<i>Resultados obtenidos</i>	<i>Observaciones</i>
Excitamos el puerto 0 y esperamos que se propague el campo hacia los puertos 1 y 2.	Vemos como se transmite señal del puerto 0 a los otros 2 puertos.	Al aumentar la frecuencia pasa más señal al puerto 2.
Esperamos obtener una gráfica similar a la lograda por el programa FEST.	La gráfica obtenida es exactamente igual a la obtenida por el otro programa.	Si $f \gtrsim f_c$ se reparte la potencia de entrada a los 2 puertos por igual. Al aumentar $f$ , cada vez se transmite más potencia por el puerto 2.
<b>Transición de altura constante</b>		
<i>Resultados esperados</i>	<i>Resultados obtenidos</i>	<i>Observaciones</i>
A partir de la $f_c$ esperamos ver como se propaga $\vec{E}$	Efectivamente, nuestros resultados coinciden con los esperados	Para un resultado más exacto, mallar más las líneas de la transición.
<i>Caso general y alejar sólo el puerto de salida:</i> comparar con FEST.	En ambos casos las gráficas coinciden.	Al ser $f < f_c$ vemos que no se propaga señal.
<i>Caso de alejar ambos puertos:</i> comparar con FEST.	Los resultados no son los esperados.	Al alejar el puerto de entrada y estar en modo de corte, no llega suficiente señal a la discontinuidad.
<i>Caso de acercar los puertos:</i> comparar con FEST.	La gráfica de parámetros S no coincide con la de FEST.	Acercamos tanto los puertos que los modos evanescentes no se han atenuado del todo.

**Estructura con 6 iris**

<i>Resultados esperados</i>	<i>Resultados obtenidos</i>	<i>Observaciones</i>
Esperamos que se propague el modo TE <sub>10</sub> a lo largo de la guía.	Vemos como se propaga el campo como esperábamos.	Además, el campo resuena en las distintas cavidades.
Se trata de un filtro paso banda entre 8,8 y 9,8 GHz.	Obtenemos una gráfica como la del otro programa	Vemos la resonancia en las cavidades de la estructura.

**Capacitive Iris**

<i>Resultados esperados</i>	<i>Resultados obtenidos</i>	<i>Observaciones</i>
Esperamos que se propague el campo a lo largo de la guía y que resuene en la cavidad de menor altura.	Vemos como, efectivamente, el campo cumple nuestras previsiones	Utilizamos una tolerancia de $10^{-6}$ y un máximo de iteraciones de 1000.
Respecto a los parámetros S, esperamos un comportamiento similar al obtenido por el otro programa.	En este caso, las gráficas no coinciden con lo esperado.	Esto se debe a una mala formulación del problema.



## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Desglosando y revisando los objetivos indicados en el capítulo 2, podemos concluir:

1. Se ha completado la interface del programa ERMES para visualizar de forma más cómoda los resultados de las guías de ondas, en particular, la obtención de las gráficas de los parámetros S, mediante la creación de la instrucción que las muestra.
2. Se ha creado y aplicado un conjunto de hasta cinco ejemplos que validan el programa.
3. Se ha completado la documentación existente del programa, tanto en modo de manuales, ampliando las secciones de propuesta y validación de ejemplos (capítulos 5 y 6), así como incluyendo cinco tutoriales con la resolución de ejemplos paso a paso (anexos B, C, D, E y F).

Como resultado final, hemos obtenido un paquete de cálculo para la realización de simulaciones de ondas electromagnéticas, con su propia ayuda para utilizar el programa y ejemplos de uso y validación muy útiles para profundizar en la materia y observar las aplicaciones de nuestro módulo.

De cara al futuro, este paquete se irá ampliando y abarcando nuevas áreas. La ampliación más inmediata consiste en poder resolver los problemas mediante métodos numéricos híbridos como BEM-FEM o GTD-FEM.

Respecto a los resultados obtenidos, hemos observado la propagación a lo largo de diferentes guías de onda de sección rectangular y, gracias a nuestro programa, podíamos comprobar la naturaleza de su comportamiento (filtro paso alto, paso bajo, paso banda, etc) en el dominio de la frecuencia. Respecto a la geometría, hemos aplicado las condiciones de contorno suponiendo que se propaga sólo el modo fundamental, así que, si los puertos están tan cerca de la discontinuidad en la guía que todavía no se han atenuado los modos evanescentes que se producen en la misma, el resultado será incorrecto porque no estaremos aplicando bien las condiciones de contorno. Respecto a la malla, cuanto menor es el tamaño de los elementos, más se aproxima el resultado a la solución real. Si bien, a partir de un tamaño lo suficientemente pequeño ( $\lambda/50$ ), la solución obtenida se puede considerar muy buena.

En resumen, hemos podido comprobar el correcto funcionamiento del programa en diferentes ejemplos y crear la documentación asociada para el posterior uso de otros estudiantes, que era el objetivo principal.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Mattes. "Contribution to the electromagnetic modelling and simulation of waveguide networks using integral equations and adaptive sampling." - Thesis No. 2693 (2003) - Ecole Polytechnique Federale de Lausanne - Switzerland
- [2] David Pardo, Luis E. García-Castillo, Leszek F. Demkowicz y Carlos Torres-Verdín. "A Two-Dimensional Self-Adaptive *hp*-Adaptive Finite Element Method for the Characterization of Waveguide Discontinuities. Part III: Goal-Oriented *hp*-Adaptivity." (Submitted for publication) *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006.
- [3] International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). (2007, Feb.) GiD, the personal pre and post processor. [Online]. Available: <http://www.gidhome.com>
- [4] R. Otín (2004, Oct.) Emant-Kratos: Electromagnetic analysis with numerical tools using a multi-physics object-oriented environment software. [Online]. Available: <http://www.cimne.com/kratos/emant>
- [5] R. Otín y J. Mora. "El Método de los Elementos Finitos aplicado a las Ecuaciones de Maxwell Regularizadas en Presencia de Singularidades." V Encuentro Ibérico de Electromagnetismo Computacional, Aiguablava 2007.
- [6] R.Otín. "A finite element code for simulation of SAR using regularized Maxwell equations with nodal and singular elements". e-mail: [rotin@cimne.upc.edu](mailto:rotin@cimne.upc.edu).
- [7] F.Dios, D.Artigas, J.Recolons, A.Comerón, y F.Canal. "Campos electromagnéticos." Ediciones UPC, 1998.
- [8] M.A.Plonus. "Electromagnetismo aplicado." Editorial Reverté, 1982.
- [9] J.M.Rius, A.C.Aznar, J.Roca, S.Blanch, y J.Romeu. "Antenas." Ediciones UPC, 1993.
- [10] D.M.Pozar. "Microwave Engineering". John Wiley&Sons.
- [11] O.C.Zienkiewick. "Método de elementos finitos." Editorial Reverté.
- [12] E.Frías Valero. "Aportaciones al estudio de las máquinas electricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos". Tesis doctoral.
- [13] L.V.Blake. "Transmission lines and waveguides." John Wiley&Sons.
- [14] Hahn, J. "L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X for eveyone". Prentice Hall, New Jersey, 1993.
- [15] T.Oetiker, H.Partl, I.Hyna and E.Schlegl. "The Not So Short Introduction to L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2 $\epsilon$ " Version 4.14, 04 April, 2004.



# APÈNDIXS

**TÍTOL DEL TFC : Eines de Simulació Numèrica per Problemes Electromagnetics**

**TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica de Telecomunicació, especialitat Sistemes de Telecomunicació**

**AUTOR: Laura Val Ibort**

**DIRECTOR: Rubén Otín Fortuño**

**SUPERVISOR: Francisco Javier Mora Serrano**

**DATA: 7 de mayo de 2007**



## APÉNDICE A. ANÁLISIS TEÓRICO

### A.1. Obtención del modo TE<sub>10</sub>

Consideramos una guía de onda rectangular en dirección Z donde las dimensiones de sus ejes X e Y son a y b respectivamente.

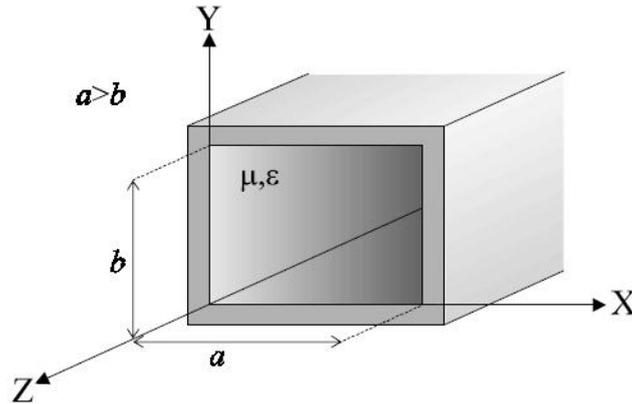


Figura A.1: Guía de onda conductora de sección rectangular

De acuerdo a la orientación de la guía, y suponiendo que la solución admite separación de variables, podemos expresar la componente z del campo magnético (la componente z del campo eléctrico es nula) de la forma:

$$H_z(x,y) = X(x)Y(y) \quad (\text{A.1})$$

Sustituyendo en la ecuación (3.15) obtenemos:

$$Y \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + X \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + K_c^2 XY = 0 \quad (\text{A.2})$$

Si dividimos por XY tenemos que:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + K_c^2 = 0 \quad (\text{A.3})$$

Para que esta ecuación se cumpla es necesario que tanto  $\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$  como  $\frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2}$  tomen valores constantes, de tal modo que se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + K_x^2 = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + K_y^2 = 0 \quad (\text{A.5})$$

$$K_x^2 + K_y^2 = K_c^2 \quad (\text{A.6})$$

Las soluciones generales de las mismas son:

$$X(x) = A \sin K_x x + B \cos K_x x \quad (\text{A.7})$$

$$Y(y) = C \sin K_y y + D \cos K_y y \quad (\text{A.8})$$

A partir de estas soluciones generales para la componente longitudinal del campo magnético se calculan los campos eléctricos y magnéticos transversales con las siguientes ecuaciones obtenidas a partir de las ecuaciones de Maxwell:

$$(\omega^2 \mu \epsilon - \beta^2) E_x = -j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial y} - j\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (\text{A.9})$$

$$(\omega^2 \mu \epsilon - \beta^2) E_y = +j\omega\mu \frac{\partial H_z}{\partial x} - j\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (\text{A.10})$$

$$(\omega^2 \mu \epsilon - \beta^2) H_x = +j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial y} - j\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (\text{A.11})$$

$$(\omega^2 \mu \epsilon - \beta^2) H_y = -j\omega\mu \frac{\partial E_z}{\partial x} - j\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (\text{A.12})$$

Aplicando las condiciones de contorno a la superficie de la guía las componentes normales de los campos magnéticos en las superficies conductoras han de ser nulos. Para que esto se cumpla es necesario que:

$$\begin{aligned} H_x |_{x=0, x=a} = 0 & \rightarrow A = 0, k_x = \frac{m\pi}{a} \\ H_y |_{y=0, y=b} = 0 & \rightarrow C = 0, k_y = \frac{n\pi}{b} \end{aligned}$$

donde, a priori, son posibles cualesquiera valores enteros  $m, n = 0, 1, 2, 3, \dots$

La expresión, por tanto, de la componente longitudinal del campo magnético es:

$$H_z(x, y) = H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (\text{A.13})$$

donde hemos definido la amplitud  $H_0 = B \cdot D$ .

Esta solución corresponde a un modo genérico  $TE_{mn}$ , donde los subíndices se relacionan con el ritmo de variación transversal de los campos, en x e y, respectivamente.

La igualdad A.3 puede expresarse ahora mejor:

$$K_c^2 = K_x^2 + K_y^2 \rightarrow K^2 - \beta_{m,n}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \rightarrow \beta_{m,n} = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (\text{A.14})$$

Esta expresión, que relaciona la constante de propagación de cada modo con la frecuencia, recibe el nombre de *relación de dispersión* en la guía y nos indica cual es la frecuencia mínima necesaria para que se produzca propagación en la guía.

## APÉNDICE B. INDUCTIVE IRIS

### B.1. Objetivos de la simulación

Observar la variación del campo eléctrico a lo largo de la guía de onda y su comportamiento ante discontinuidades. Además, estudiaremos los parámetros de scattering  $S_{ij}$  y como varían en función de cambios en el mallado y la geometría.

El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos y lo aplicamos para resolver problemas 3D en el dominio de la frecuencia.

A continuación estudiaremos un ejemplo.

### B.2. Descripción del ejemplo

Vamos a analizar el campo eléctrico a lo largo de una guía de ondas. Dicha guía presenta un estrechamiento de anchura en su parte central. Esta región estrecha es lo que llamamos *iris*<sup>1</sup>. Finalmente, el término *inductivo* se usa porque su comportamiento respecto a los planos de la discontinuidad es equivalente a una inductancia.

### B.3. Construcción del ejemplo

#### B.3.1. PreProceso

##### B.3.1.1. Creación del rectángulo

Lo primero de todo es construir la geometría que vamos a utilizar. En este ejemplo concreto habrá que crear dos rectángulos de dimensiones 0,0102 x 0,032 x 0,0229 m, que son las dos secciones de la guía de onda, y otro más estrecho, que será el *iris*, de dimensiones 0,0102 x 0,002 x 0,0229 m. Para crear estos rectángulos usaremos la instrucción **Geometry** → **Create** → **Object** → **Rectangle**, entrando por la línea de comandos uno de los vértices del rectángulo y luego su vértice diagonalmente opuesto. Así, iremos creando todos los rectángulos según las dimensiones que nos dan y, después, con el comando **Geometry** → **Create** → **Volume** → **By contour**, crearemos los volúmenes de las 3 cavidades seleccionando las superficies de los rectángulos que las delimitan. El resultado será una guía como la que vemos en la figura B.1.

Seguidamente tenemos que indicarle a GiD que tipo de problema vamos a resolver, que en nuestro caso va a ser *ERMES*, así pues, vamos a **Data** → **Problem Type** → **ERMES**,

---

<sup>1</sup>El término *iris* se usa en este contexto para referirse a una apertura que conecta dos secciones de guía de onda



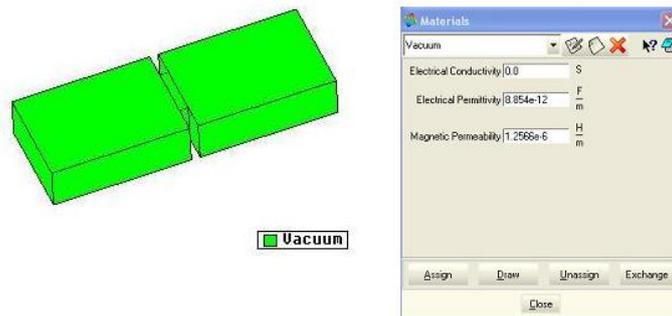


Figura B.3: Materiales

### B.3.1.3. Asignación de condiciones de contorno

En este apartado asignamos cada uno de los puertos de entrada y salida de nuestra guía de onda. Lo primero de todo será introducir las coordenadas XYZ de 3 puntos que permitan definir los puertos de entrada y salida. Además, a cada puerto se le asignará un número (*type*) para indicar si es de entrada o de salida, el puerto de entrada será el 1, el puerto de salida 1 será el 2, el de salida 2 será el 3, etc. Para ello vamos al menú **Data** → **Boundary coefficients** y aparece una ventana con el nombre de un puerto, su número y sus coordenadas, que tendremos que rellenar nosotros.

Después, en **Data** → **Fix Electric Field**, seleccionamos “*Superficies*”, “*Electric Field PEC*” y asignamos todas las superficies correspondientes al conductor que forma la guía de onda. De esta manera, asignamos el valor de cero a todo el campo eléctrico tangente a la guía de onda. También en “*Superficies*”, seleccionamos “*Electric Field PMC*” y asignamos las superficies de los puertos de entrada y salida de la onda. En este caso sucede lo contrario, se trata de un conductor magnético perfecto y el campo eléctrico perpendicular a la dirección de propagación es cero.

Para acabar este apartado, vamos a **Data** → **Neuman Flux** y en “*Port Conditions*” le asignamos a la ‘Boundary Condition’ del ‘Port In’, la superficie correspondiente al puerto de entrada, y a la “*Boundary Condition*” del “*Port Out1*” la superficie del puerto de salida.

Por último, para comprobar que lo hemos hecho bien, dibujamos los puertos como en la figura B.4.

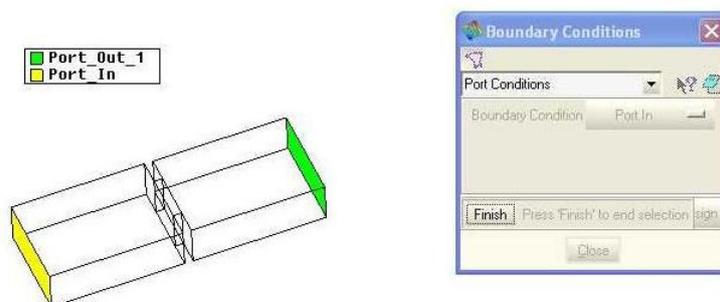


Figura B.4: Condiciones de contorno

Aún nos falta elegir el plano o corte en el que queremos observar los resultados. Para

ello vamos a **Data** → **Modes projection**, y asignamos los puertos correspondientes de nuevo.

#### B.3.1.4. Establecimiento de los parámetros del problema

Los parámetros que aún no hemos introducido son la frecuencia, la manera que vamos a resolver las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza del problema y los resultados que queremos obtener y representar. Empezamos con **Data** → **Problem Data** y en la ventana que nos ha aparecido, elegimos “*Frequency: custom*” y añadimos el valor  $9 \cdot 10^9$  Hz. Si queremos que haga un barrido en frecuencia, por ejemplo, para visualizar los parámetros S, seleccionamos la casilla “*Frequency sweep*”. En caso de que queramos hacer el barrido de frecuencia tenemos que indicar la frecuencia inicial, la final y cada cuánto tomamos un valor, p.ej.: “*Initial Freq: 7e9*”, “*Final Freq: 12e9*” y “*Step Freq: 0.2e9*”, con esto indicamos que el barrido comienza en 7GHz, acaba en 12GHz, y toma valores cada 200MHz. También marcamos “*Max Iterations: 1e+4*”, “*Tolerance: 1e-6*”, “*PreConditioner: Identity*”. Seleccionamos “*Accept*” y “*Close*”.



Figura B.5: Frecuencias

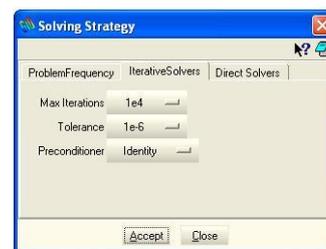


Figura B.6: Solvers iterativos

Una vez hecho esto, tenemos que indicar cuales son los resultados que queremos observar. Vamos a **Data** → **Results**. Marcamos todos los resultados debajo de la pestaña “*Frequency Domain Output*” porque queremos obtener todos los componentes del campo eléctrico en el dominio de la frecuencia. Por otro lado, cambiamos a la pestaña de “*Time Domain Output*” y activamos “*Results in Time*” para ver los resultados en el dominio del tiempo. Dejamos las opciones por defecto (“*Max Number of Save Results: 1000*”, “*Initial Time: Time Increment*”, “*Final Time: T*”, “*Time Increment: T/32*”) y el campo eléctrico. Estos resultados después los podremos visualizar e incluso animar. Le damos a “*Accept*” y “*Close*”.

#### B.3.1.5. Creación de la malla

Una vez asignados todos los materiales y todas las condiciones de contorno ya estamos en condiciones para crear la malla.

Para llevarlo a cabo nos vamos a **Mesh** → **Generate mesh**. Ahora nos aparecerá una ventana emergente donde debemos introducir el tamaño máximo de los elementos, en este caso 0,001, le damos a “*OK*”, entonces nos preguntará si queremos borrar la malla

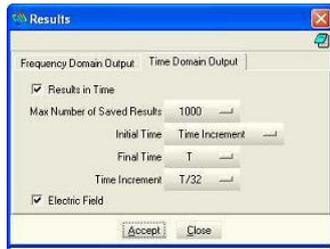


Figura B.7: Resultados en el dominio del tiempo

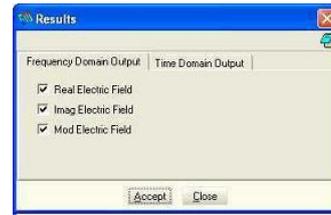


Figura B.8: Resultados en el dominio de la frecuencia

anterior, a lo que diremos que sí, y la malla empezará a generarse. A la hora de elegir el tamaño de los elementos de la malla, hemos de tener en cuenta que el programa debe disponer de suficientes puntos de cálculo como para poder resolver el problema, atendiendo a las consideraciones geométricas, estos puntos deben encontrarse a una distancia típica no superior a  $\frac{\lambda}{10}$ . Una vez generada aparecerá un cuadro de diálogo que nos informará del número de elementos y nodos que se han generado.

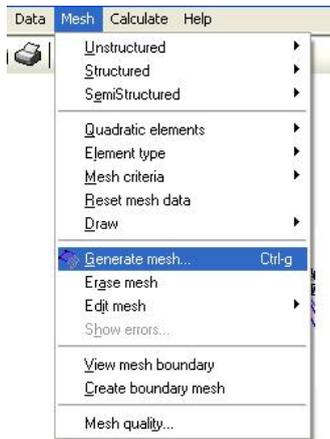


Figura B.9: Generar la malla

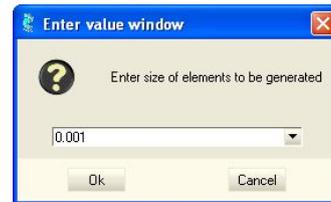


Figura B.10: Elementos

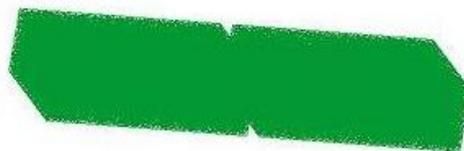


Figura B.11: Malla

Además de esto, también podemos refinar el mallado en los puntos, líneas o superficies que nos interese. En nuestro caso, por ejemplo, podríamos afinar el mallado en las superficies que forman el iris.

Para el mallado de puntos tenemos que ir al menú **Mesh** → **Unstructure** → **Points**, en el caso de líneas será **Mesh** → **Unstructure** → **Lines** y en el de superficies **Mesh** → **Unstructure** → **Surfaces**.

Para nuestro ejemplo mallaremos más finas las líneas que forman el iris.

El resto de pasos se suceden de la misma manera tanto para puntos como para líneas o superficies. El programa pregunta el tamaño de los elementos, igual que sucedía antes en el mallado general. Si seguimos con el ejemplo de las líneas podemos poner, por ejemplo, 0,001.

Después, habrá que seleccionar los elementos que queremos mallar a ese tamaño, y cuando los tengamos seleccionados pulsar ESC para salir de la aplicación. Para finalizar, realizaremos el mallado de la pieza tal y como hemos hecho antes.

El programa, antes de mallar, nos preguntará si queremos borrar la malla anterior, a lo que responderemos que sí, y, después, el tamaño de los elementos de la malla. Nosotros pondremos 0.002, y OK. Ahora el programa generará la malla tal y como nosotros le hemos indicado, podremos ver en la figura B.13 como el número de nodos es mucho mayor en la zona del iris que es la zona donde hemos seleccionado las líneas con un tamaño de elementos menor.

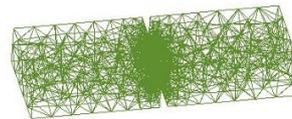
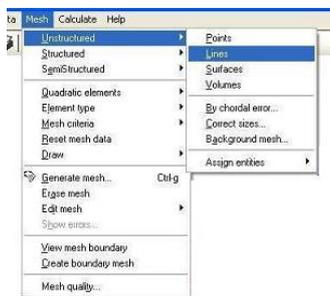


Figura B.12: Mallar líneas con otro tamaño

Figura B.13: Nuevo mallado

## B.3.2. Simulación

Ahora ya estamos en disposición de realizar la simulación propiamente dicha.

Para ello vamos a **Calculate** → **Calculate**<sup>2</sup>. También podemos comprobar el funcionamiento del proceso con **Calculate** → **View process info**, en esta ventana aparecerían los errores si los hubiera. Además nos permite ver si el *Solver* iterativo escogido tiende a converger o a diverger. En caso de tender a la divergencia, es decir, se aleja de la tolerancia, podemos terminar el proceso y cambiar el *Solver*. Para parar el proceso basta ir a **Calculate** → **Cancel process**.

Una vez conseguida la convergencia y terminada la escritura de los resultados aparecerá una ventana indicándolo, momento en el cual presionaremos sobre *PostProcess*.

<sup>2</sup>La duración del proceso depende de la cantidad de memoria disponible en el ordenador, así como del procesador del mismo; a más memoria y más CPU, menos tiempo.

### B.3.3. PostProceso

#### B.3.3.1. Campo eléctrico

Lo primero que vamos a hacer es abrir las ventanas de *View Results*, *View Style* y *Animate* con **Windows** → **View Results**, **Windows** → **View Style** y **Windows** → **Animate**. Con estas ventanas podemos cambiar la forma de ver el resultado.

Con la ventana **View Style** podemos cambiar los colores de la geometría, si queremos ver solo el contorno, líneas, puntos, etc. Con **View Results** elegimos el resultado que queremos observar, por ejemplo, el módulo del campo eléctrico en el contorno de la pieza, o la componente x del campo en toda la guía, etc. Y, por último, una vez tengamos todo lo anterior, podemos abrir la ventana **Animate** y al darle a play animaremos el resultado escogido. Las gráficas obtenidas se pueden ver en el capítulo 6 donde realizamos la validación del iris.

#### B.3.3.2. Parámetros S

Una vez estemos en el postproceso y, habiendo seleccionado el barrido de frecuencia para el cálculo, aparece en la barra de herramientas de **ERMES** un nuevo botón llamado **S**. Al presionar dicho botón aparece en pantalla una gráfica con los valores de los parámetros  $S_{ij}$  correspondientes al barrido de frecuencia elegido.

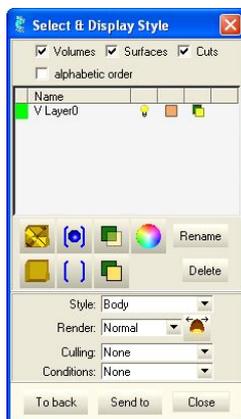


Figura B.14: Estilo

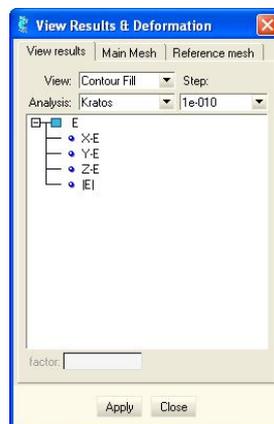


Figura B.15: Vista de los resultados

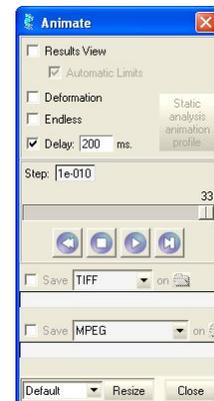


Figura B.16: Animación de los resultados



## APÉNDICE C. TJUNTION

### C.1. Objetivos de la simulación

Observar la variación del campo eléctrico a lo largo de una guía rectangular que se bifurca en 2 puertos de salida. Además, estudiaremos sus parámetros de dispersión y como varía en función de cambios en el mallado y la geometría.

El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos y lo aplicamos para resolver problemas 3D en el dominio de la frecuencia.

A continuación estudiaremos un ejemplo.

### C.2. Descripción del ejemplo

Vamos a analizar el campo eléctrico a lo largo de una guía de ondas con la forma de la figura C.1 y su transmisión. En este caso la geometría es una T, es decir, se trata de un dispositivo de 3 puertos, puerto 0, puerto 1 y puerto 2. Excitaremos al puerto 0 con el modo  $TE_{10}$  y veremos la transmisión al puerto 2, al 1 y la reflexión.

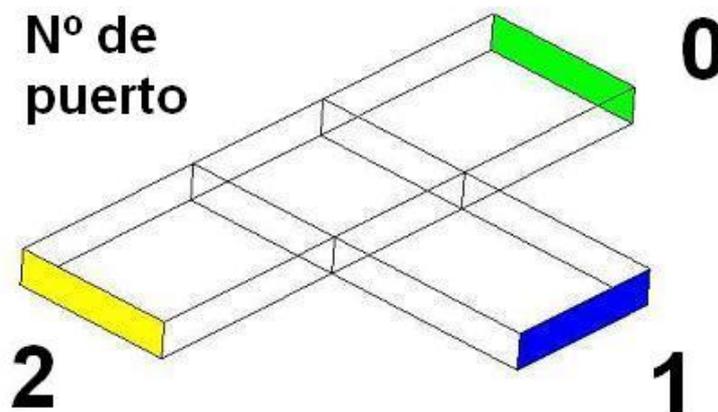


Figura C.1: Nº de puertos

### C.3. Construcción del ejemplo

#### C.3.1. Creación del rectángulo

Lo primero de todo es construir la geometría que vamos a utilizar. En este ejemplo construiremos primero el cuadrado central de lado 22.9 mm, y después, los tres rectángulos

de 22.9 x 30 mm unidos a tres de los cuatro lados del cuadrado central. Posteriormente les daremos volumen con una altura de 5.08 mm y quedará un dibujo como el de la figura C.2 de una guía en forma de T en la que entra la onda por un puerto que se propaga hacia otro y se transmite una parte por el tercero.

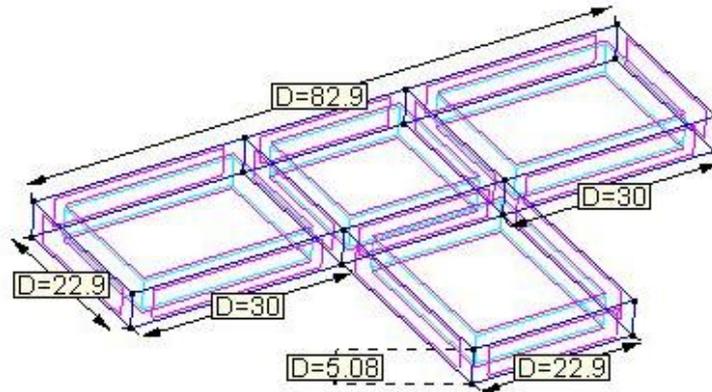


Figura C.2: Geometría

Después cargamos el *problem type* *ERMES*, que es el módulo de cálculo que nos permitirá hacer las simulaciones.

### C.3.2. Asignación de materiales

Una vez cargado el *problem type*, tenemos que asignar los materiales. Asignamos el aire (Vacuum) a todos los volúmenes del dibujo:

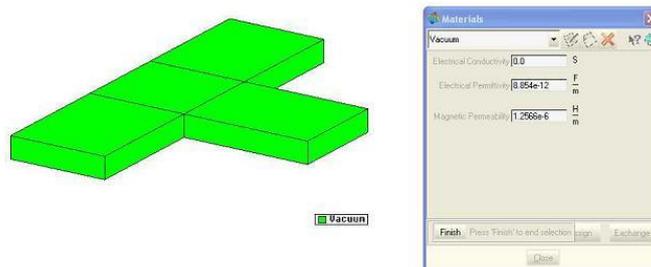


Figura C.3: Materiales

### C.3.3. Asignación de condiciones de contorno

En este apartado asignamos cada uno de los puertos de entrada y salida de nuestra guía de onda. Lo primero de todo será introducir las coordenadas XYZ de 3 puntos que permitan definir los puertos de entrada y salida. Además, a cada puerto se le asignará un número (*type*) para indicar si es de entrada o de salida, el puerto de entrada será el 1, el puerto de salida 1 será el 2 y el de salida 2 será el 3. En la ventana "*Boundary coefficients*" introducimos el nombre de cada puerto, su número y sus coordenadas.

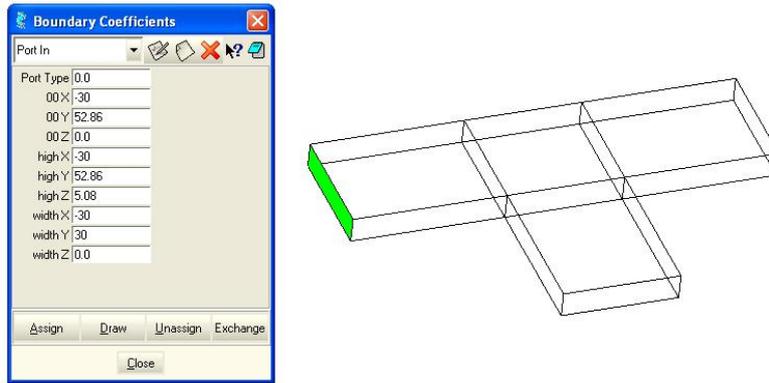


Figura C.4: Coeficientes del puerto 0

Después, en la ventana “*Electric Conditions*”, asignamos el valor de campo eléctrico nulo. En el caso de un conductor eléctrico perfecto (superficie de la guía), para el campo tangente a la misma, y, en el caso de un conductor magnético perfecto (puertos), para el campo perpendicular a la superficie del puerto.

Para acabar este apartado, vamos a “*Boundary conditions*” asignamos las condiciones de contorno de los puertos al puerto que les corresponda en el dibujo.

Por último, para comprobar que lo hemos hecho bien, dibujamos los puertos como en la figura C.5.

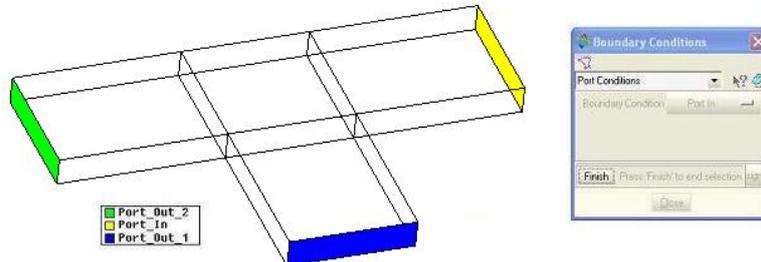


Figura C.5: Condiciones de contorno

Aún nos falta elegir el plano o corte en el que queremos observar los resultados. Para ello, en “*Modes projection*”, podemos asignar los puertos correspondientes de nuevo.

### C.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema

Los parámetros que aún no hemos introducido son la frecuencia, la manera que vamos a solucionar las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza del problema y los resultados que queremos obtener y representar.

Buscamos la frecuencia de corte del modo fundamental como referencia:

$$f_{c10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = 6,55\text{GHz} \quad (\text{C.1})$$

En la ventana “*Problem Data*” escogemos como frecuencia de trabajo 9GHz para ver el campo eléctrico, o bien haremos un barrido de frecuencias entre 7 y 12GHz para ver la gráfica de parámetros S.

### C.3.5. Creación de la malla

Una vez asignados todos los materiales y todas las condiciones de contorno ya estamos en condiciones para crear la malla.

Para éste problema hemos escogido una frecuencia de 9Ghz lo que nos lleva a una longitud de onda:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{1}{f \sqrt{\mu \epsilon}} = 33,31062641mm$$

Para el mallado se escogió un tamaño máximo de los elementos de 0.001m, valor inferior al valor máximo de  $\lambda/10$ .

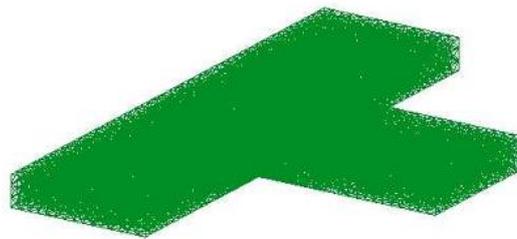


Figura C.6: Malla

# APÉNDICE D. GUÍA DE ONDA CON UNA TRANSICIÓN DE ALTURA CONSTANTE

## D.1. Objetivos de la simulación

Observar la variación del campo eléctrico a lo largo de la guía de onda y su comportamiento ante una transición de altura constante. Además, estudiaremos también sus parámetros de scattering o parámetros S.

El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos y lo aplicamos para resolver problemas 3D en el dominio de la frecuencia.

A continuación estudiaremos un ejemplo.

## D.2. Descripción del ejemplo

Vamos a analizar el campo eléctrico a lo largo de una guía de ondas. Dicha guía es una guía de sección rectangular que se enchancha en su parte final manteniendo la altura constante. Miraremos como se propaga el campo a lo largo de la guía y los parámetros  $S_{11}$  y  $S_{12}$  de los puertos.

## D.3. Construcción del ejemplo

### D.3.1. Creación del rectángulo

Lo primero de todo es construir la geometría que vamos a utilizar.

En este ejemplo construiremos primero el paralelepípedo rectangular grande, de dimensiones 22.86mm x 10.16mm x 10mm (ancho x alto x largo), y después el pequeño de 11.43mm x 10.16mm x 10mm, colocado justo en medio de la cara frontal del otro rectángulo, tal y como indica la figura D.1.

### D.3.2. Asignación de materiales

Cargamos el *problem type* *ERMES* y ya podemos empezar a asignar propiedades. Empezamos con los materiales y asignamos el aire (Vacuum) a todos los volúmenes del dibujo.

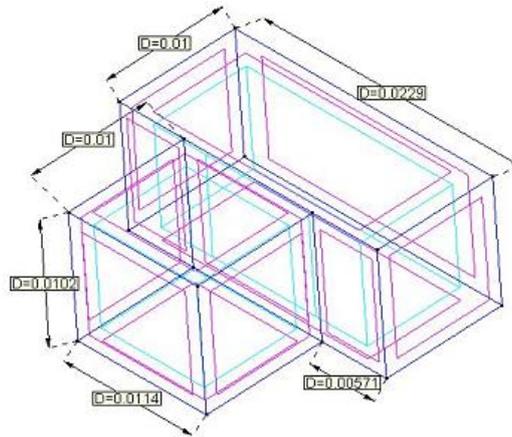


Figura D.1: Geometría

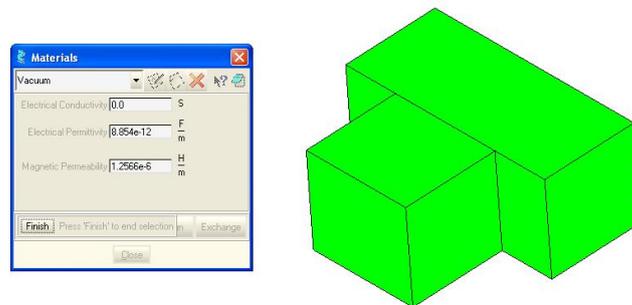


Figura D.2: Materiales

### D.3.3. Asignación de condiciones de contorno

En este apartado asignamos cada uno de los puertos de entrada y salida de nuestra guía de onda. Lo primero de todo será introducir las coordenadas XYZ de 3 puntos que permitan definir los puertos de entrada y salida. Además, a cada puerto se le asignará un número (*type*) para indicar si es de entrada o de salida, el puerto de entrada será el "PortIn1" y el puerto de salida será el 2. En la ventana "Boundary coefficients" introducimos el nombre de cada puerto, su número y sus coordenadas.

Después, en la ventana "Electric Conditions", asignamos el valor de campo eléctrico nulo. En el caso de un conductor eléctrico perfecto (superficie de la guía), para el campo tangente a la misma, y, en el caso de un conductor magnético perfecto (puertos), para el campo perpendicular a la superficie del puerto.

Para acabar este apartado, vamos a "Boundary conditions" asignamos las condiciones de contorno de los puertos al puerto que les corresponda en el dibujo.

Por último, para comprobar que lo hemos hecho bien, dibujamos los puertos como en la figura D.3.

Aún nos falta elegir el plano o corte en el que queremos observar los resultados. Para ello,

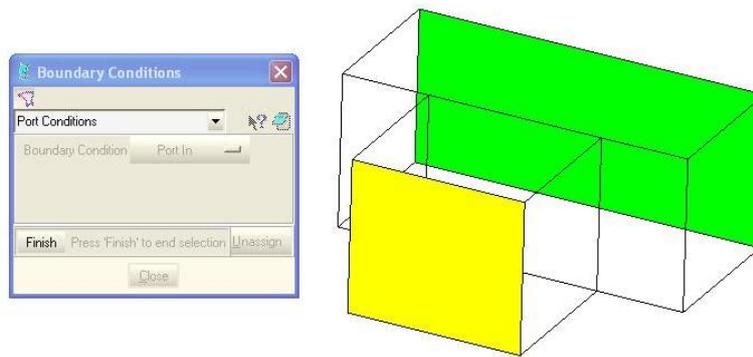


Figura D.3: Condiciones de contorno

en “*Modes projection*”, podemos asignar los puertos correspondientes de nuevo.

### D.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema

Los parámetros que aún no hemos introducido son la frecuencia, la manera que vamos a resolver las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza del problema y los resultados que queremos obtener y representar.

Buscamos la frecuencia de corte del modo fundamental como referencia:

$$f_{c10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = 13,15\text{GHz} \quad (\text{D.1})$$

En la ventana “*Problem Data*”, escogemos como frecuencia de trabajo 14GHz para ver el campo eléctrico, o bien haremos un barrido entre 7 y 12GHz para comparar nuestra gráfica de parámetros S con la simulada por otro software.

### D.3.5. Creación de la malla

Una vez asignados todos los materiales y todas las condiciones de contorno ya estamos en condiciones para crear la malla.

Para éste problema hemos escogido una frecuencia de 14GHz lo que nos lleva a una longitud de onda:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}} = 0,022798147 \text{ m}$$

Para el mallado se escogió un tamaño máximo de los elementos de 0,001, valor inferior al valor máximo de  $\lambda/10$ . Hemos obtenido 6542 nodos.

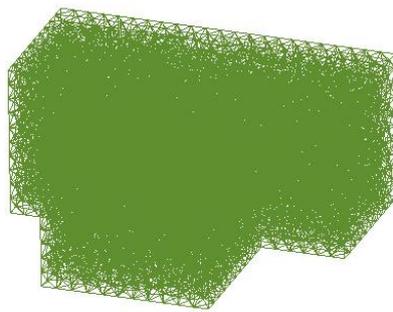


Figura D.4: Malla

# APÉNDICE E. GUÍA DE ONDA CON SEIS IRIS INDUCTIVOS

## E.1. Objetivos de la simulación

Observar la variación del campo eléctrico a lo largo de la guía de onda y su comportamiento ante la presencia de cavidades resonantes. Además, estudiaremos sus parámetros de Scattering y como varían en función de cambios en el mallado y la geometría.

El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos y lo aplicamos para resolver problemas 3D en el dominio de la frecuencia.

A continuación estudiaremos un ejemplo.

## E.2. Descripción del ejemplo

Vamos a analizar el campo eléctrico a lo largo de una guía de ondas. Dicha guía consiste en cinco cavidades que actúan como resonadores, unidos entre ellos y a la guía mediante los iris o estrechamientos de la guía. Así, la respuesta en frecuencia dependerá de las dimensiones de dichas cavidades y los iris. Esta estructura ha sido diseñada para trabajar como un filtro paso-banda entre las frecuencias de 8.8 y 9.8 GHz.

## E.3. Construcción del ejemplo

### E.3.1. Creación del rectángulo

Lo primero de todo es construir la geometría que vamos a utilizar. Consideramos un filtro de seis iris inductivos de dimensiones aproximadas de  $\approx 20 \times 2 \times 1$  cm. Más concretamente, nuestro dominio computacional viene dado por  $\Omega = \Omega_1 - (\Omega_2 + \Omega_3 + \Omega_4 + \Omega_5 + \Omega_6 + \Omega_7)$

### E.3.2. Asignación de materiales

Asignamos el aire (Vacuum) a todos los volúmenes del dibujo.

- $\Omega_1 = \{(x, y, z) : 0 \text{ cm.} \leq x \leq 20.2913 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,
- $\Omega_2 = \{(x, y, z) : 5 \text{ cm.} \leq x \leq 5.2 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.7191 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 5 \text{ cm.} \leq x \leq 5.2 \text{ cm.}, 0.7191 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,
- $\Omega_3 = \{(x, y, z) : 6.8641 \text{ cm.} \leq x \leq 7.0641 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.54975 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 6.8641 \text{ cm.} \leq x \leq 7.0641 \text{ cm.}, 0.54975 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,
- $\Omega_4 = \{(x, y, z) : 8.9702 \text{ cm.} \leq x \leq 9.1702 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.5078 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 8.9702 \text{ cm.} \leq x \leq 9.1702 \text{ cm.}, 0.5078 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,
- $\Omega_5 = \{(x, y, z) : 11.1211 \text{ cm.} \leq x \leq 11.3211 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.5078 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 11.1211 \text{ cm.} \leq x \leq 11.3211 \text{ cm.}, 0.5078 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,
- $\Omega_6 = \{(x, y, z) : 13.2272 \text{ cm.} \leq x \leq 13.4272 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.54975 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 13.2272 \text{ cm.} \leq x \leq 13.4272 \text{ cm.}, 0.54975 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ , and,
- $\Omega_7 = \{(x, y, z) : 15.0913 \text{ cm.} \leq x \leq 15.2913 \text{ cm.}, -1.143 \text{ cm.} \leq y \leq -0.7191 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\} \cup \{(x, y, z) : 15.0913 \text{ cm.} \leq x \leq 15.2913 \text{ cm.}, 0.7191 \text{ cm.} \leq y \leq 1.143 \text{ cm.}, 0 \text{ cm.} \leq z \leq 1.016 \text{ cm.}\}$ ,

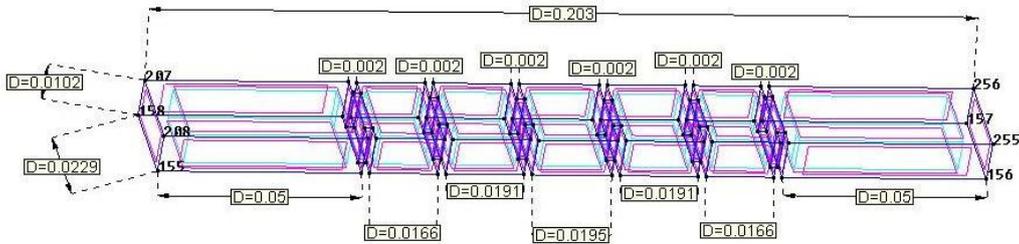


Figura E.1: Geometría completa de la estructura

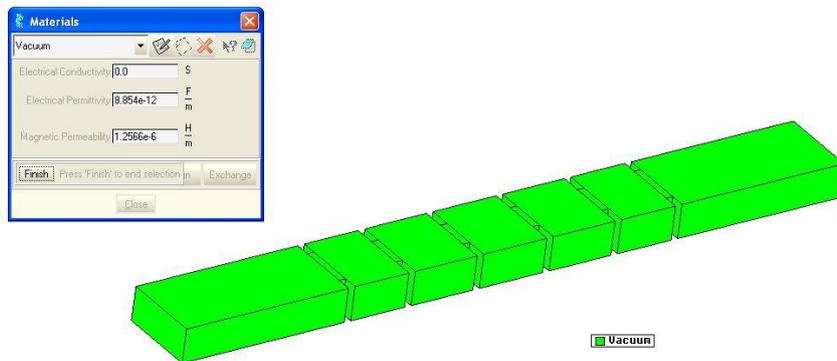


Figura E.2: Materiales

### E.3.3. Asignación de condiciones de contorno

En este apartado asignamos cada uno de los puertos de entrada y salida de nuestra guía de onda. Lo primero de todo será introducir las coordenadas XYZ de 3 puntos que permitan definir los puertos de entrada y salida. Además, a cada puerto se le asignará un número (*type*) para indicar si es de entrada o de salida, el puerto de entrada será el 1, el puerto de salida 1 será el 2 y el de salida 2 será el 3. En la ventana Boundary coefficients

introducimos el nombre de cada puerto, su número y sus coordenadas.

Después, en la ventana “*Electric Conditions*”, asignamos el valor de campo eléctrico nulo. En el caso de un conductor eléctrico perfecto (superficie de la guía), para el campo tangente a la misma, y, en el caso de un conductor magnético perfecto (puertos), para el campo perpendicular a la superficie del puerto. Tenemos que asegurarnos que lo hemos asignado bien y que la guía sigue hueca para poder transmitir la información. Debería quedar un agujero como el que muestra la figura E.3

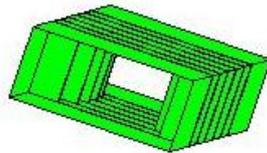


Figura E.3: Condiciones de contorno

Para acabar este apartado, vamos a “*Boundary conditions*” asignamos las condiciones de contorno de los puertos al puerto que les corresponda en el dibujo.

Por último, para comprobar que lo hemos hecho bien, dibujamos los puertos como en la figura E.4.

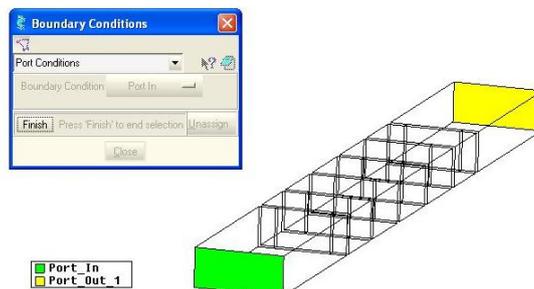


Figura E.4: Condiciones de contorno

Aún nos falta elegir el plano o corte en el que queremos observar los resultados. Para ello, en “*Modes projection*”, podemos asignar los puertos correspondientes de nuevo.

### E.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema

Los parámetros que aún no hemos introducido son la frecuencia, el modo empleado para resolver las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza del problema y los resultados que queremos obtener y representar.

Buscamos la frecuencia de corte del modo fundamental como referencia:

$$f_{c10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = 13,15\text{GHz} \quad (\text{E.1})$$

En la ventana “*Problem Data*”, escogemos como frecuencia de trabajo 9GHz para ver el campo eléctrico, o bien haremos un barrido de frecuencias para ver la gráfica de parámetros S entre 8.8 y 10GHz, que es el rango de frecuencias en el que nuestra estructura actúa como filtro.

### **E.3.5. Creación de la malla**

Una vez asignados todos los materiales y todas las condiciones de contorno ya estamos en condiciones para crear la malla.

Para éste problema hemos escogido una frecuencia de 9Ghz lo que nos lleva a una longitud de onda:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}} = 0,015603294 \text{ m}$$

Para el mallado se escogió un tamaño máximo de los elementos de 0,001, valor inferior al valor máximo de  $\lambda/10$ . Se obtienen 83814 nodos.

## APÉNDICE F. CAPACITIVE IRIS

### F.1. Objetivos de la simulación

Observar la variación del campo eléctrico a lo largo de la guía de onda y su comportamiento ante un estrechamiento de la altura en su parte central. Además, estudiaremos también sus parámetros de scattering o parámetros S.

El programa de cálculo resuelve las ecuaciones de Maxwell mediante el método de los elementos finitos y lo aplicamos para resolver problemas 3D en el dominio de la frecuencia.

A continuación estudiaremos un ejemplo.

### F.2. Descripción del ejemplo

Vamos a analizar el campo eléctrico a lo largo de una guía de ondas. Dicha guía presenta un estrechamiento de altura en su parte central. Esta región estrecha es lo que llamamos *iris*<sup>1</sup>.

### F.3. Construcción del ejemplo

#### F.3.1. Creación del rectángulo

Lo primero de todo es construir la geometría que vamos a utilizar.

En este ejemplo construiremos primero el paralelepípedo rectangular grande, de dimensiones 22.86mm x 10.16mm x 10mm (ancho x alto x largo), y después el pequeño de 11.43mm x 10.16mm x 20mm, colocado justo en medio de la cara frontal del otro rectángulo, tal y como indica la figura F.1:

#### F.3.2. Asignación de materiales

Cargamos el *problem type* *ERMES* y ya podemos empezar a asignar propiedades. Empezamos con los materiales y asignamos el aire (Vacuum) a todos los volúmenes del dibujo.

---

<sup>1</sup>El término *iris* se usa en este contexto para referirse a una apertura que conecta dos secciones de guía de onda

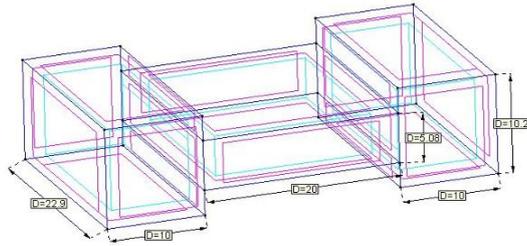


Figura F.1: Geometría

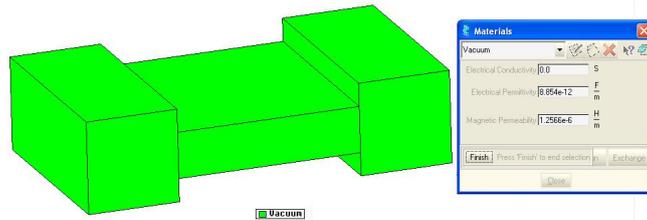


Figura F.2: Materiales

### F.3.3. Asignación de condiciones de contorno

En este apartado asignamos cada uno de los puertos de entrada y salida de nuestra guía de onda. Lo primero de todo será introducir las coordenadas XYZ de 3 puntos que permitan definir los puertos de entrada y salida. Además, a cada puerto se le asignará un número (*type*) para indicar si es de entrada o de salida, el puerto de entrada será el “PortIn1” y el puerto de salida será el 2. En la ventana “Boundary coefficients” introducimos el nombre de cada puerto, su número y sus coordenadas.

Después, en la ventana “Electric Conditions”, asignamos el valor de campo eléctrico nulo. En el caso de un conductor eléctrico perfecto (superficie de la guía), para el campo tangente a la misma, y, en el caso de un conductor magnético perfecto (puertos), para el campo perpendicular a la superficie del puerto.

Para acabar este apartado, vamos a “Boundary conditions” asignamos las condiciones de contorno de los puertos al puerto que les corresponda en el dibujo.

Por último, para comprobar que lo hemos hecho bien, dibujamos los puertos como en la figura F.3.

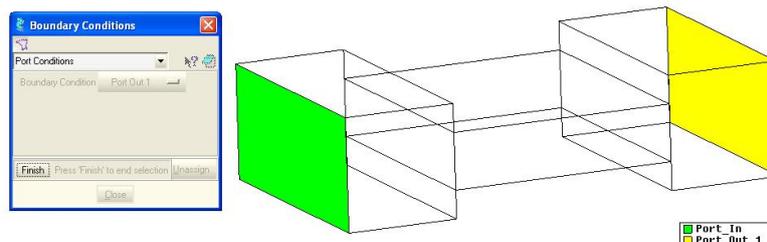


Figura F.3: Condiciones de contorno

Aún nos falta elegir el plano o corte en el que queremos observar los resultados. Para ello, en “*Modes projection*”, podemos asignar los puertos correspondientes de nuevo.

### F.3.4. Establecimiento de los parámetros del problema

Los parámetros que aún no hemos introducido son la frecuencia, la manera a emplear para resolver las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza del problema y los resultados que queremos obtener y representar.

Buscamos la frecuencia de corte del modo fundamental como referencia:

$$f_{c10} = \frac{1}{2a\sqrt{\mu\epsilon}} = 13,15\text{GHz} \quad (\text{F.1})$$

En la ventana “*Problem Data*”, escogemos como frecuencia de trabajo 14GHz para ver el campo eléctrico, o bien elegimos un barrido entre 9 y 15GHz para comparar nuestra gráfica de parámetros S con la simulada por otro software.

### F.3.5. Creación de la malla

Una vez asignados todos los materiales y todas las condiciones de contorno ya estamos en condiciones para crear la malla.

Para éste problema hemos escogido una frecuencia de 14Ghz lo que nos lleva a una longitud de onda:

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\epsilon}} = 0,022798147 \text{ m}$$

Para el mallado se escogió un tamaño máximo de los elementos de 0.001, valor inferior al valor máximo de  $\lambda/10$ .



## APÉNDICE G. CÓDIGO TCL

TCL (Tool Command Language) es un lenguaje de programación interpretado y multi-plataforma. Fue creado por John K. Ousterhout y su equipo de la Universidad de California, pero actualmente es desarrollado por Sun Microsystems Laboratories (en concreto por su grupo SunScript, que lidera el propio Ousterhout) y distribuido de forma totalmente gratuita, aunque su uso sea para aplicaciones comerciales, a través de Internet. El intérprete puede ser encontrado en diversas direcciones, pero seguramente, la más rápida es la del servidor FTP de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Oviedo.

<http://www.etsimo.uniovi.es/pub/tcl/>

TCL es un lenguaje de comandos, cuyo intérprete recibe el nombre de Tcsh (tclsh80 para TCL/TK 8.0), que tiene como una de sus principales características la gran facilidad con la que se pueden implementar funciones en C/C++ que pasan a ser nuevas instrucciones del intérprete. Es decir, se pueden embeber aplicaciones en C/C++ dentro del propio intérprete de TCL; de esta forma es posible obtener nuevas versiones de TCL, denominadas extensiones, que no dejan de ser otra cosa que intérpretes que añaden a los comandos originales de TCL nuevos comandos escritos en C/C++.

Algunas de estas extensiones son BLT (que permite hacer representaciones gráficas en 2D), Itcl (Incremental TCL, TCL orientado a objetos), OraTcl (TCL capaz de manejar bases de datos ORACLE), etc.

Pero sin duda, la extensión más conocida, y que es distribuida junto con el propio TCL, es TK (Tool Kit). TK, creada por el propio John Ousterhout, proporciona un intérprete denominado wish (para TCL/TK 8.0, wish80), que añade a los comandos de TCL comandos capaces de crear interfaces gráficas de usuario. Es decir, TK permite crear ventanas, botones, menús, barras de scroll, y toda una serie de elementos, propios de la programación con ventanas. A todos estos elementos los denomina widgets.

TK se distribuye junto con TCL en un paquete denominado TCL/TK, que proporciona los dos intérpretes citados anteriormente. El intérprete de TCL puede ser eliminado ya que se encuentra incorporado en el intérprete de TK.

Ventajas de TCL/TK:

- Sencillez de programación.
- Rapidez en el desarrollo de las aplicaciones.
- Gran velocidad comparado con otros lenguajes interpretados.
- Facilidad de modificación de las aplicaciones.
- Multiplataforma.
- Gran número de extensiones gratuitas.
- Posibilidad de incorporar nuevos comandos en lenguaje C/C++.

## Inconvenientes de TCL/TK:

- Excesivamente lento comparado con los lenguajes compilados.
- Necesidad del intérprete para ejecutar una aplicación.
- Difícil de depurar, debido a que, a diferencia de un compilador, el intérprete sólo "traduce" el código que se ejecuta; pudiendo quedar partes del código sin depurar porque el intérprete nunca las haya ejecutado.

Veamos ahora el código completo en TCL de ERMES:

```
# kratos0.1.tcl -- TCL --
# Kratos Team - 2004
#www.kratos.cimne.upc.es
#-----
# This file is written in TCL language
# For more information about TCL look at: http://www.sunlabs.com/research/tcl/
# # At least two procs must be in this file:
# # InitGIDProject dir - Will be called whenever a project is begun to be used.
# where dir s the project's directory
# EndGIDProject - Will be called whenever a project ends to be used.
# # For more information about GID internals, check the program scripts.
#-----

proc ErmesBitmaps { dir { type "DEFAULT INSIDELEFT" } } {
    global BitmapsNamesPre ErmesBitmapsCommandsPre ErmesBitmapsHelpPre ErmesPriv
    global BitmapsNames ErmesBitmapsCommands ErmesBitmapsHelp

    set ErmesBitmapsNamesPre(0) "../images/Help.gif --- \
    ../images/Materials.gif \
    ../images/Boundary.gif \
    ../images/Flux.gif \
    ../images/BoundCondS.gif \ --- \
    ../images/BoundCond.gif \
    ../images/Pressure.gif \
    ../images/Source.gif \ --- \
    ../images/Displacement.gif
    ../images/Data.gif \
    ../images/Results.gif --- \
    ../images/Mesh.gif \
    ../images/Compute.gif --- \
    ../images/ermes.gif"

    set ErmesBitmapsCommandsPre(0) [list \
    [list -np- HelpWindow "CUSTOM_HELP_FILE"[file join $dir ../html/index.html]]\
    [list "" ] \
    [list -np- GidOpenMaterials Materials] \
```

```

[list -np- GidOpenMaterials Boundary_Coefficients] \
[list -np- GidOpenMaterials Voltage_Coefficients] \
[list -np- GidOpenMaterials FD_Sources] \
[list "" ] \
[list -np- GidOpenConditions Electric_Conditions] \
[list -np- GidOpenConditions Boundary_Conditions] \
[list -np- GidOpenConditions Electromagnetic_Sources] \
[list "" ] \
[list -np- GidOpenConditions Modes_Projection] \
[list -np- GidOpenProblemData Solving_Strategy] \
[list -np- GidOpenProblemData Results] \
[list "" ] \
"Meshing generate" \
"Utilities Calculate" \
[ list "" ] \
[list -np- WebPageKratos $ErmesPriv(Web)]
]
set ErmesBitmapsHelpPre(0) { "About ERMES . . ." "" \
"Material Properties" \
"Boundary Coefficients"\
"Voltage Coefficients"\
"FD Sources" "" \
"Fixed Electric Field" \
"Boundary Flux" \
"Electromagnetic Sources" "" \
"Modes Projection" \
"Solving Strategy" \
"Results" "" "" \
"Generate Mesh" \
"Calculate" ""\
"Kratos WebPage"}

set ErmesBitmapsNames(0) "../images/Help.gif --- \
../images/Materials.gif \
../images/Boundary.gif \
../images/Flux.gif \
../images/BoundCondS.gif \ --- \
../images/BoundCond.gif \
../images/Pressure.gif \
../images/Source.gif \ --- \
../images/Displacement.gif
../images/Data.gif \
../images/Results.gif --- \
../images/Mesh.gif \
../images/Compute.gif --- \
../images/S.gif --- \
../images/ermes.gif"

```

```

set ErmesBitmapsCommands(0) [list \
  [list -np- HelpWindow "CUSTOM_HELP_FILE" [file join $dir ../html/index.html]] \
  [list "" ] \
  [list -np- GidOpenMaterials Materials] \
  [list -np- GidOpenMaterials Boundary_Coefficients] \
  [list -np- GidOpenMaterials Voltage_Coefficients] \
  [list -np- GidOpenMaterials FD_Sources] \
  [list "" ] \
  [list -np- GidOpenConditions Electric_Conditions] \
  [list -np- GidOpenConditions Boundary_Conditions] \
  [list -np- GidOpenConditions Electromagnetic_Sources] \
  [list "" ] \
  [list -np- GidOpenConditions Modes_Projection] \
  [list -np- GidOpenProblemData Solving_Strategy] \
  [list -np- GidOpenProblemData Results] \
  [list "" ] \
  "Meshing generate" \
  "Utilities Calculate" \
  [list "" ] \
  [list -np- ErmesReadGraph] \
  [list "" ] \
  [list -np- WebPageKratos $ErmesPriv(Web)]
]
set ErmesBitmapsHelp(0) { "About ERMES . . ." "" \
  "Material Properties" \
  "Boundary Coefficients" \
  "FD Sources" "" \
  "Fixed Electric Field" \
  "Boundary Flux" \
  "Electromagnetic Sources" "" \
  "Modes Projection" \
  "Solving Strategy" \
  "Results" "" \
  "Generate Mesh" \
  "Calculate" "" \
  "Scattering Parameters" "" \
  "Kratos WebPage"}

# prefix values:
#       Pre           Only active in the preprocessor
#       Post          Only active in the postprocessor
#       PrePost       Active Always

set prefix Post
set ErmesPriv(toolbarwin) [CreateOtherBitmaps ErmesBar [= "Ermes toolbar"] \
  ErmesBitmapsNames ErmesBitmapsCommands \
  ErmesBitmapsHelp $dir "ErmesBitmaps [list $dir]" $type $prefix]
AddNewToolbar "Ermes bar" ${prefix}ErmesBarWindowGeom \
  "ErmesBitmaps [list $dir]"

```

```

set prefix Pre
set ErmesPriv(toolbarwin) [CreateOtherBitmaps ErmesBarPre [= "Ermes toolbar"] \
    ErmesBitmapsNamesPre ErmesBitmapsCommandsPre \
    ErmesBitmapsHelpPre $dir "ErmesBitmaps [list $dir]" $type $prefix]
AddNewToolbar "Ermes bar" ${prefix}ErmesBarWindowGeom \
    "ErmesBitmaps [list $dir]"

proc EndErmesBitmaps {} {
    global ErmesPriv
    ReleaseToolbar "Ermes bar"
    rename ErmesBitmaps ""
    catch { destroy $ErmesPriv(toolbarwin) }
}

```

Hasta aquí hemos creado las barras de herramientas de ERMES para el pre- y postproceso (son diferentes ya que en el postproceso aparecen los parámetros S) y ahora le asignaremos una función a cada uno de los botones que las componen. En la figura G.1 vemos la barra de herramientas del preproceso y destacamos algunas funciones importantes.

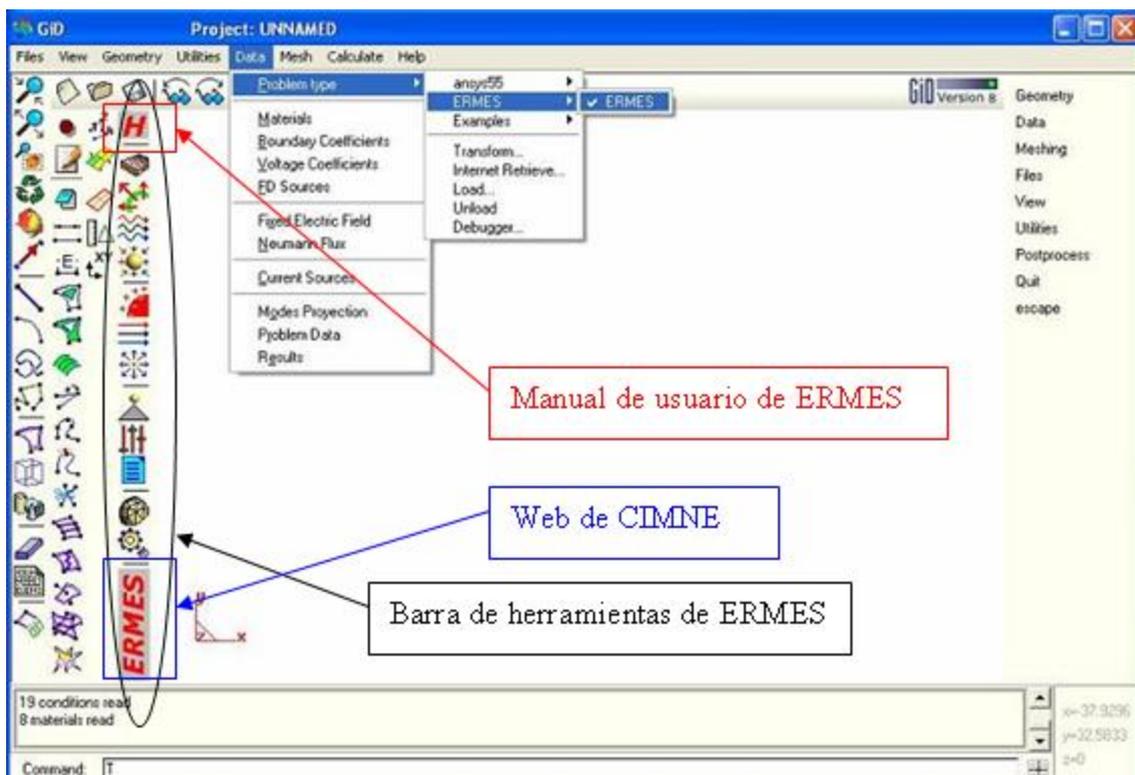


Figura G.1: Barra de herramientas de ERMES

```

proc InitGIDProject { dir } {
    global MenuNames MenuEntries MenuCommands MenuAcceler
    global MenuNamesP MenuEntriesP MenuCommandsP MenuAccelerP
    global ErmesPriv

```

```

global GidUtils
set ErmesPriv(ProgramName) "ERMES"
set ErmesPriv(VersionNumber) 0.1
set ErmesPriv(Web) "http://www.cimne.com/kratos/emant"
set GidVersion [.gid.central.s info GiDVersion]
set GidVersion [string trim $GidVersion]
set GidVersion [string index $GidVersion 0]

if { $GidVersion < 7 } {
WarnWin [_ "%s v%s is not compatible with GiD version lower than 7" \
    $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber)]
return
}

Splash $dir 2501

set ipos [lsearch $MenuNames Help]
if { $ipos != -1 } {
set MenuEntries($ipos) [linsert $MenuEntries($ipos) 0 \
    [_ "%s v%s Help" $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber)] --- ]
set MenuCommands($ipos) [linsert $MenuCommands($ipos) 0 \
    [list -np- HelpWindow "CUSTOM_HELP_FILE" \
    [file join $dir ../html/index.html]] ""]
set MenuAcceler($ipos) [linsert $MenuAcceler($ipos) 0 ""]

lappend MenuEntries($ipos) \
    [_ "About %s v%s" $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber)] --- \
    [_ "%s WebPage" $ErmesPriv(ProgramName)]
lappend MenuCommands($ipos) [list -np- Splash $dir] ""
[list -np- WebPageKratos $ErmesPriv(Web)]
lappend MenuAcceler($ipos) ""
UpdateMenus
}

set ipos [lsearch $MenuNamesP Help]
if { $ipos != -1 } {
set MenuEntriesP($ipos) [linsert $MenuEntriesP($ipos) 0 \
    [_ "%s v%s Help" $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber)] --- ]
set MenuCommandsP($ipos) [linsert $MenuCommandsP($ipos) 0 \
    [list -np- HelpWindow "CUSTOM_HELP_FILE" \
    [file join $dir ../html/index.html]] ""]
set MenuAccelerP($ipos) [linsert $MenuAccelerP($ipos) 0 ""]
lappend MenuEntriesP($ipos) \
    [_ "About %s v%s" $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber)]
lappend MenuCommandsP($ipos) [list -np- Splash $dir]
lappend MenuAccelerP($ipos) ""
UpdateMenus
}

```

```

ErmesBitmaps $dir
GidChangeDataLabel "Data units" ""
GidChangeDataLabel "Interval" ""
GidChangeDataLabel "Conditions" ""
GidChangeDataLabel "Materials" ""
GidChangeDataLabel "Problem Data" ""
GidChangeDataLabel "Local axes" ""
GidAddUserDataOptions "---" "" 2
GidAddUserDataOptions "Materials" "GidOpenMaterials Materials" 3
GidAddUserDataOptions "Boundary Coefficients" "GidOpenMaterials
Boundary_Coefficients" 4
GidAddUserDataOptions "Voltage Coefficients" "GidOpenMaterials
Voltage_Coefficients" 5
GidAddUserDataOptions "FD Sources" "GidOpenMaterials FD_Sources" 6
GidAddUserDataOptions "---" "" 7
GidAddUserDataOptions "Fixed Electric Field" "GidOpenConditions
Electric_Conditions" 8
GidAddUserDataOptions "Neumann Flux" "GidOpenConditions
Flux_Contour_Conditions" 9
GidAddUserDataOptions "---" "" 10
GidAddUserDataOptions "Current Sources" "GidOpenConditions
Electromagnetic_Sources" 11
GidAddUserDataOptions "---" "" 12
GidAddUserDataOptions "Modes Proyection" "GidOpenConditions
Modes_Proyection" 13
GidAddUserDataOptions "Problem Data" "GidOpenProblemData
Solving_Strategy" 14
GidAddUserDataOptions "Results" "GidOpenProblemData Results" 15
}

proc EndGIDProject {} {
    EndErmesBitmaps
}

proc WebPageKratos { dir } {
    global ErmesPriv
    VisitWeb $dir
}

proc HelpOnkratos { dir } {
    global ErmesPriv
    WarnWin [_ "To obtain help for %s v%s, check the lates news in %s" \
    $ErmesPriv(ProgramName) $ErmesPriv(VersionNumber) $ErmesPriv(Web)]
}

proc Splash { dir { TimeOut 0 } } {
    global GIDDEFAULT

```

```

if { [.gid.central.s disable windows] } { return }
if { [ winfo exist .splash] } {
destroy .splash
update
}

toplevel .splash

set im [image create photo -file [ file join $dir ../images/Ermes-3DFW.gif]]
set x [expr [winfo screenwidth .splash]/2-[image width $im]/2]
set y [expr [winfo screenheight .splash]/2-[image height $im]/2]

wm geom .splash +$x+$y
wm transient .splash .gid
wm overrideredirect .splash 1
pack [label .splash.l -image $im -relief ridge -bd 2]

bind .splash <1> "destroy .splash"
bind .splash <KeyPress> "destroy .splash"
raise .splash .gid
grab .splash
focus .splash
update

if { $TimeOut > 0 } {
after $TimeOut "if { [ winfo exist .splash] } { destroy .splash }"
}
}

proc ErmesReadGraph { } {
set filename [file join [GiD_Info project ModelName].gid S11.dat]
GiD_Process Mescape results graphs readgraph $filename escape
set filename2 [file join [GiD_Info project ModelName].gid S12.dat]
GiD_Process Mescape results graphs readgraph $filename2 escape
set filename3 [file join [GiD_Info project ModelName].gid S13.dat]
GiD_Process Mescape results graphs readgraph $filename3 escape
}

```

Esta última función (ErmesReadGraph) lee los archivos S11 y S12 del modelo que estamos calculando y muestra por pantalla la gráfica de parámetros S, tal y como muestra la figura G.2:

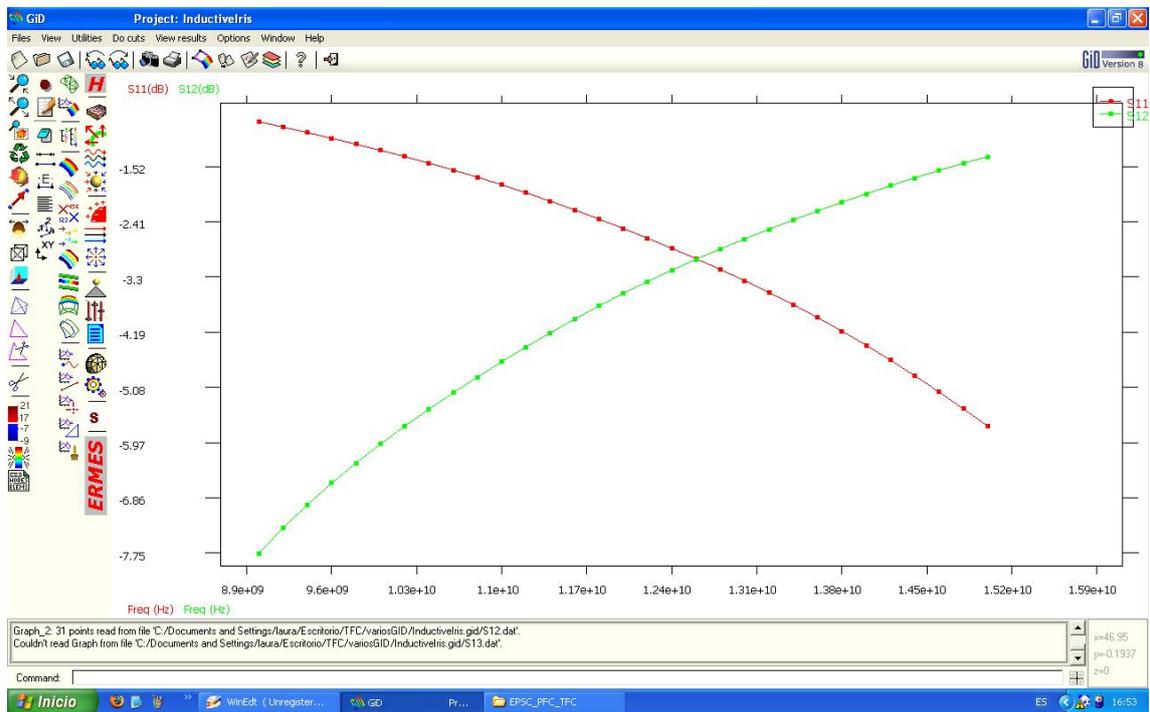


Figura G.2: Gráfica de los parámetro S