

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN**



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Nuevo procedimiento de diseño de
cavidades multimodo con agitadores de
modo**

Autor: Antulio Marín Pagán

DNI: 23043907T

Director del Proyecto: Juan Monzó Cabrera

Departamento: Dto. Tecnologías de la Información y Comunicaciones

A mi tutor Juan Monzó por su gran ayuda y paciencia,
A mis amigos y compañeros de carrera,
A mi familia y muy especialmente a mis padres,
Por todo el apoyo recibido durante estos años.



Autor	Antulio Marín Pagán	Correo electrónico	antuliomp@gmail.com
Director	Juan Monzó Cabrera	Correo electrónico	juan.monzo@upct.es
Co-Director		Correo electrónico	
Título	NUEVO PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE CAVIDADES MULTIMODO CON AGITADORES DE MODO		
Descriptor	Stirrer o agitadores de modo, Uniformidad en la temperatura, Estructuras Multimodo, Calentamiento por Microondas.		
Resumen			
<p>En este proyecto, se presenta una herramienta para mejorar la distribución del campo eléctrico en una cavidad multimodo rectangular. Esta herramienta o dispositivo es conocido como agitador de modos o <i>stirrer</i>.</p> <p>El objetivo principal del proyecto es la optimización de la eficiencia energética de cavidades rectangulares de microondas que contienen elementos móviles. Esta optimización se realiza con algoritmos genéticos. Para ello este proyecto consta de dos fases. En la primera fase, se pretende conseguir que S_{11} se encuentre por debajo de -20dB o al menos por debajo de -10dB sin mover el <i>stirrer</i> dentro de la cavidad rectangular. En la segunda fase, por el contrario, se pretende que rotando el <i>stirrer</i> con distintos ángulos de inclinación, comprobar si se obtienen unos niveles de optimización adecuados. Por último se verificará que para una cavidad de menor proporción respecto a la cavidad optimizada, se sigan manteniendo buenos niveles de optimización.</p> <p>El resultado ha sido bastante satisfactorio, pues hemos conseguido, con el diseño de la cavidad y el <i>stirrer</i>, los objetivos marcados de lograr unos buenos resultados de uniformidad sobre los límites marcados.</p>			
Titulación	Ingeniería Superior de Telecomunicaciones		
Departamento	Tecnologías de la Información y Comunicaciones		
Fecha de presentación	Febrero 2013		

Contenido

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 MOTIVOS Y FASES DEL PROYECTO	2
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1 HORNO DE MICROONDAS.....	3
2.1.1 Funcionamiento	3
2.1.2 Estructura de un horno de microondas	4
2.1.3 <i>Stirrer</i> o agitador de modos.....	10
2.2- ALGORITMOS GENÉTICOS	12
2.2.1 Fundamentos de los Algoritmos Genéticos	12
2.2.2 Procedimiento de los algoritmos genéticos	14
2.3- PARAMETROS DE DISPERSION (<i>Scattering Parameters (S)</i>)	15
CAPÍTULO 3: HERRAMIENTA DE TRABAJO CST MICROWAVE STUDIO	20
3.1- INTRODUCCIÓN A CST MICROWAVE STUDIO.....	20
3.2- PROYECTO GENERAL.....	21
3.2.1 – MACRO con CST	25
3.3- ESTRUCTURAS SIMULADAS.....	26
3.3.1 Optimización del proyecto	33
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	37
4.1 INTRODUCCIÓN.....	37
4.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS Y RESULTADOS.....	37
4.2.1 Efecto del agitador de modos al rotar	41
4.3 REPRESENTACIÓN EN MATLAB DE S_{11} Y EL CAMPO ELÉCTRICO DEL STIRRER AL ROTAR.....	43
4.4.1 Representación del coeficiente de reflexión o S_{11}	43
4.4.2 Representación eficiencia promedio	46
4.4.3 Representación campo eléctrico	47
4.5 ESTUDIO DE UNA CAVIDAD MENOR.....	48
4.5.1 Introducción	48
4.5.2 Resultados	49
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	54
CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA.....	55
CAPÍTULO 7: ANEXO.....	56
ANEXO 1– MACRO CST Campo Eléctrico	56
ANEXO 2 – Aplicación en MATLAB para representar el módulo S_{11} por tramos.....	58
ANEXO 3 – Aplicación MATLAB para representar el módulo del coeficiente de reflexión o S_{11}	60
ANEXO 4 – Aplicación MATLAB para representar la eficiencia	61



CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde que se inventó el horno microondas, después de la Segunda Guerra Mundial, esta tecnología no ha parado de evolucionar ya que constituye una alternativa limpia, eficaz, rápida y controlable respecto a otras alternativas de calentamiento en la industria. Sectores tales como el de medicina, alimentación, textil o farmacéutico se benefician de las ventajas del uso de los hornos microondas.

Un horno de microondas funciona pasando la radiación no ionizante de microondas, normalmente a la frecuencia de 2,45 GHz a través del material. La radiación de microondas está entre las frecuencias de radio común y de infrarrojos. El agua, grasas y otras sustancias presentes en los materiales absorben la energía de las microondas en un proceso llamado calentamiento dieléctrico. En el caso de los alimentos, como la mayor parte contienen un porcentaje de agua, las ondas de microondas hacen vibrar o rotar las moléculas de agua. Al rotar, las moléculas chocan con otras y las ponen en movimiento, dispersando así la energía. Esta energía, cuando se dispersa como vibración molecular en sólidos y líquidos (tanto como energía potencial y como energía cinética de los átomos), lo hace en forma de calor.

Los hornos de microondas industriales se basan en el concepto mencionado anteriormente de calentamiento por microondas. Estos hornos consisten en una cavidad alimentada por magnetrones de fuentes de microondas, incluyendo distintos materiales en el interior de la cavidad. La cavidad está compuesta por un puerto de entrada y otro de salida para introducir los materiales, normalmente por medio de una cinta transportadora.

Un aspecto muy importante para conseguir el máximo rendimiento de los hornos de microondas industriales es crear un alto grado de uniformidad en el calentamiento de la muestra o material. Para ello, el sistema puede incorporar elementos móviles en el interior de la cavidad que bien desplacen el producto (por ejemplo, platos giratorios), bien modifiquen las condiciones de contorno de la cavidad y provoquen la excitación de distintos modos electromagnéticos en función del tiempo (agitadores de modos o *stirrers*). En ambos casos, dado que resulta difícil obtener una distribución del campo eléctrico homogéneo a lo largo del producto, se pretende que en media temporal esta distribución de campo sí se aproxime a una homogénea.

En este trabajo, se presenta una herramienta rápida para mejorar la uniformidad de la distribución de campo eléctrico en cavidades multimodo. La herramienta recurre al análisis “*full-wave*” de dispositivos en guía de onda para geometrías rectangulares, y la optimización se realiza con algoritmos genéticos. Con este sistema, es posible encontrar dimensiones óptimas de las guías que excitan al aplicador y la propia cavidad de microondas para generar la distribución de temperatura más uniforme posible en el material.



1.2 MOTIVOS Y FASES DEL PROYECTO

El principal objetivo del proyecto es el estudio, diseño y optimización de una cavidad multimodo rectangular con agitadores de modos (también conocido como *stirrer*) para hornos de microondas industriales con el objetivo de conseguir la mayor uniformidad en el calentamiento de la muestra o material.

Existe una necesidad en el diseño de hornos de microondas industriales para conseguir hornos con la mayor eficiencia energética. O lo que es lo mismo el de conseguir el mayor grado de uniformidad en el calentamiento del material o muestra que forme parte del proceso de calentamiento. Para lograrlo en este proyecto se estudiará el uso de un tipo de elementos móviles en el interior de la cavidad rectangular multimodo conocidos como agitadores de modos o *stirrer*. Este dispositivo cambia las condiciones de contorno del campo eléctrico consiguiendo unos mejores resultados que en condiciones normales.

Por lograr estos objetivos, es necesario estudiar el campo eléctrico y el coeficiente de reflexión S_{11} que varían según el ángulo de inclinación que se le da al *stirrer*. Por ello, la primera fase del proyecto consistirá en lograr un diseño optimizado de la cavidad rectangular así como del *stirrer* que depare unos resultados óptimos en el parámetro de reflexión cuyo módulo debe estar por debajo de -20dB o al menos por debajo de los -10dB en el rango de frecuencias 2.4 a 2.5 GHz. Una vez conseguido el diseño más óptimo de los componentes, se rotará el *stirrer* con diferentes inclinaciones verificando que el resultado medio de cada una de las posiciones del *stirrer* sigue siendo óptimo para S_{11} .

Por último, es necesario comprobar que el diseño de la cavidad rectangular no es un diseño único con el que se consigue optimización, sino que reduciendo proporcionalmente las medidas de la cavidad rectangular que se ha optimizado, es decir, para una cavidad menor se conseguirían resultados igualmente óptimos.

Ante la situación planteada, se va hacer uso de la herramienta CST MicroWave Studio. Este software es una herramienta especializada para la simulación de componentes en alta frecuencia en el que se utilizará el algoritmo genético como medio para conseguir el resultado más optimizado.



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 HORNO DE MICROONDAS

2.1.1 Funcionamiento

El horno de microondas basa su funcionamiento en un dispositivo denominado "magnetron"; las ondas de alta frecuencia (2.450 MHz) que genera el magnetron, se emiten por una pequeña antena que lo complementa y se envían a la cavidad del horno a través de la guía de ondas.

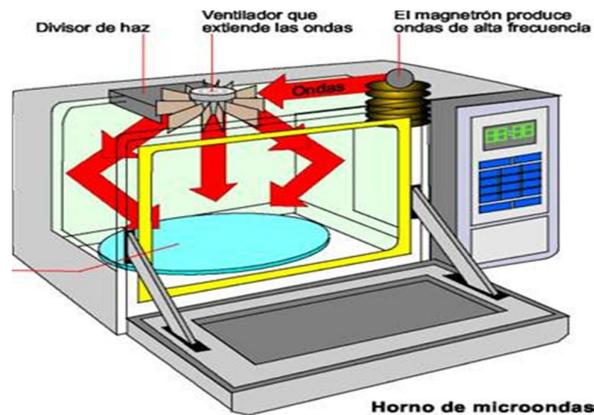


Figura 1 – Estructura de un horno microondas

Las microondas existen a nuestro alrededor, son ondas electromagnéticas caracterizadas por su alta frecuencia, de menos de 1 metro de longitud y se encuentran dentro de la categoría de las ondas radioeléctricas. Están presentes en nuestra vida cotidiana en un gran variedad de actividades de distinta índole, siendo la más conocida la del horno de cocina, aunque también se encuentran en muchos aparatos siendo ignorada su presencia e importancia como el calentamiento de materiales, los sistemas de radar, televisión, radio, transmisión de datos a distancia, etc.

La base del calentamiento por microondas es el calentamiento por histéresis dieléctrica en el rango de frecuencias de 500 MHz a 25 GHz. El procedimiento consiste en someter a una radiación electromagnética a materiales no conductores que contienen iones o moléculas bipolares, de modo que sufran un calentamiento debido a la transformación de la energía radioeléctrica en energía térmica. Bajo la acción del campo magnético, las moléculas del material actúan como barritas magnéticas intentando polarizarse cambiando el sentido del campo a una frecuencia entre 300 MHz y 300 GHz. Esto produce la fricción interna entre las moléculas dando lugar al calentamiento del material. Una vez terminado el proceso, la temperatura que habrá en el interior del material será ligeramente superior a la que haya en el exterior. Esta es una de las características principales del



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

calentamiento dieléctrico por microondas, el cual se produce principalmente en el interior del material de manera uniforme y rápida, experimentando una densidad de potencia bastante elevada. Otra de las características, es la localización del calentamiento en una zona precisa, consiguiendo un ahorro energético y de tiempo respecto a otras técnicas clásicas de calentamiento.

El uso de esta técnica en procesos industriales donde se requiere energía térmica, presenta serios problemas a la hora de utilizar materiales no conductores de corriente eléctrica, ya que no se puede aplicar el calentamiento por inducción electromagnética. En el caso de que el material tenga una baja conductividad térmica y una masa elevada, la penetración del calor desde la superficie es muy lenta por conducción térmica y, si se acelera el proceso aumentando la potencia, se produce fácilmente un sobrecalentamiento superficial que puede deteriorar el producto.

2.1.2 Estructura de un horno de microondas

El horno de microondas consta de 3 elementos principalmente: generador de microondas, guía de ondas y aplicador o cavidad de microondas.

2.1.2.1 Generador de microondas: el magnetrón

El magnetrón es un tubo electrónico que se comporta electrónicamente como un diodo que se emplea para producir los 2450 MHz de energía de microondas necesarios. El imán del magnetrón crea un campo magnético en el espacio que hay entre el ánodo y el cátodo. Las estructuras básicas internas son las mismas en todos los magnetrones, es decir, consta de ánodo, filamento, antena e imanes. Por el contrario, las configuraciones externas varían según la marca y modelo del magnetrón. La Figura 2 muestra la estructura del magnetrón indicando cada una de las secciones de las que se compone.

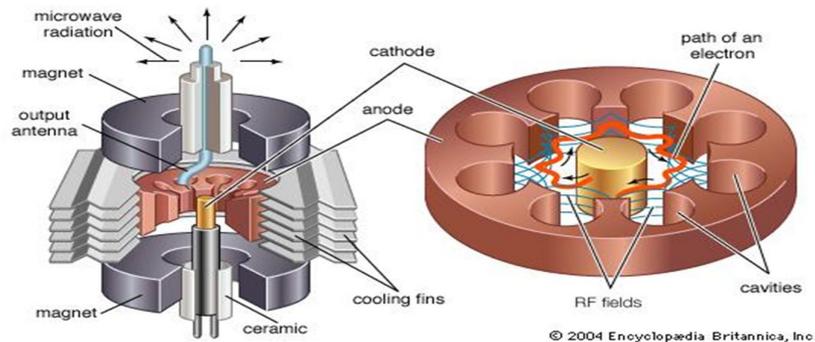


Figura 2 – Estructura del magnetrón

Cada una de las partes del magnetrón se encarga de las siguientes funciones:

- **Ánodo:** se trata de un cilindro de hierro hueco en el que se proyectan paletas hacia dentro con un número de paletas siempre par, como se observa en la Figura 2. Para que la polaridad de los segmentos adyacentes sea opuesta, deben conectarse los segmentos alternos. Por eso las cavidades se encuentran en paralelo respecto a la salida. Para determinar la frecuencia de salida del tubo, las zonas abiertas en forma de trapecio de cada una de las paletas son las cavidades resonantes que sirven como circuitos sintonizados

Las zonas abiertas en forma de trapecio entre cada una de las paletas son las cavidades resonantes que sirven como circuitos sintonizados y determinan la frecuencia de salida del



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

tubo. El ánodo funciona de tal modo que los segmentos alternos deben conectarse, o sujetarse, para que cada segmento sea de polaridad opuesta a la de los segmentos adyacentes. De hecho, las cavidades se conectan en paralelo con respecto a la salida. La comprensión de lo anterior se facilita al considerar la descripción del funcionamiento.

- *Filamento*: se encuentra en el centro del magnetrón y se sostiene por medio de unas puntas rígidas, selladas y blindadas puestas de forma cuidadosa en el interior del tubo. Su función es la de cátodo en el tubo.

- *Antena*: se trata de una proyección (círculo) conectado con el ánodo. A partir de este se extiende por alguna de las cavidades sintonizadas y se acopla a la guía de onda hacia la que transmite la energía de microondas.

- El *campo magnético*: el campo es producido por unos imanes que se encuentran alrededor del magnetrón

.

Comportamiento en frecuencia del magnetrón

El magnetrón es un oscilador, de gran potencia, que bajo condiciones ideales posee una única frecuencia de resonancia. En teoría, la frecuencia de oscilación debería estar fijada muy cerca de la frecuencia central de la banda ICM (por ejemplo en 2.45 GHz para la banda de 2.4 a 2.5 GHz). Siendo así, habría más margen para que el magnetrón radiase dentro de esta banda aún a pesar del efecto producido por el '*frequency pulling*'. Sin embargo, existen muchas evidencias en la literatura que dependiendo del fabricante la frecuencia de oscilación principal del magnetrón estará ubicada a otras frecuencias.

Esto tiene importantes consecuencias porque, a la hora de simular una estructura, el ingeniero previamente debe tener claro, bien con medidas bien con los datos de fabricante de cuál es la frecuencia de oscilación del magnetrón que usará en su horno final. De hecho, pequeños cambios en la frecuencia de oscilación pueden provocar diferencias notables en el comportamiento del horno de microondas.

En nuestro proyecto la frecuencia de trabajo se fija a 2.45GHz aunque los resultados a otras frecuencias nominales habituales de los magnetrones (2.46 y 2.47 GHz) son totalmente extrapolables.

2.1.2.2 Guía de ondas

En telecomunicaciones y electromagnetismo, una guía de onda es cualquier estructura física que guía ondas electromagnéticas. Se trata de tuberías metálicas huecas de sección transversal arbitraria (cuadrada, cilíndrica, elíptica...) que permiten transmitir las ondas electromagnéticas de forma confinada entre dos puntos distintos (por ejemplo, un generador y una antena).

La transmisión por guía de ondas tiene como objetivo reducir la disipación de energía. Por ello utilizan las frecuencias de microondas ya que presentan una baja atenuación en señales de alta frecuencia. EL guiado de las ondas se consigue debido a la conexión entre los campos y las cargas o corrientes en los contornos o bien por condiciones de reflexión en los límites. Las paredes conductoras del tubo confinan la onda al interior por reflexión, debido



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

a la *ley de Snell* en la superficie, donde el tubo puede estar vacío o relleno con un dieléctrico. El dieléctrico le da soporte mecánico al tubo (las paredes pueden ser delgadas), pero reduce la velocidad de propagación

El material y la estructura a la hora de construir las guías de onda dependen de la frecuencia de las ondas que se quiera transportar. Para frecuencias del orden de las microondas son habitualmente sistemas abiertos o cerrados de conductores metálicos. Por otra parte, para frecuencias ópticas se utilizan guías de onda dieléctricas. Hay una gran variedad de dispositivos en guías de onda que se puedan realizar, como acopladores direccionales, filtros, etc.

Todas las estructuras en guía de onda presentan la característica común de que, para distintas configuraciones de los campos eléctrico y magnético (los llamados modos) a una frecuencia suficientemente alta, se pueden propagar simultáneamente, aunque con diferentes velocidades.

2.1.2.2.1 Modos de propagación en Guías de Onda

Mediante la resolución de las Ecuaciones de Maxwell se analizan las guías de ondas electromagnéticas. Es importante indicar que estas ecuaciones tienen múltiples soluciones o modos, siendo un modo una auto-función del sistema de ecuaciones. Un modo está caracterizado por un auto-valor, correspondiente a la velocidad de propagación axial de la onda en la guía en estudio como se muestra en la Figura 3 para el eje z . Los modos de propagación dependen de la longitud de la onda o frecuencia empleada, de la polarización y de las dimensiones de la onda.

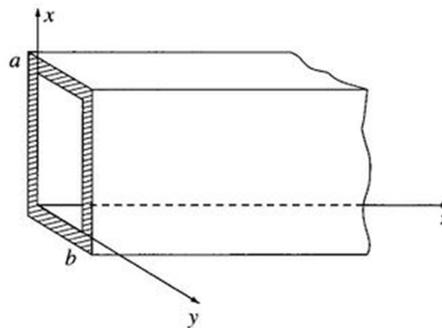


Figura 3 – Guía de onda rectangular

Distinguimos entre modos longitudinales y modos transversales. El modo longitudinal introducido dentro de una guía de onda es una onda estacionaria particular formada por ondas confinadas en la cavidad de la guía. Por otro lado, los modos transversales en una guía de onda se clasifican en los siguientes tipos:

- *Modos TE*: es nula la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación.
- *Modos TM*: es nula la componente del campo magnético en la dirección de propagación.

La guía de ondas tiene una frecuencia de corte por encima de la cual se propaga la energía electromagnética y por debajo de la cual se atenúa. Ésta queda determinada



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

por las dimensiones de su sección transversal. Además, cualquier guía de ondas puede soportar un número infinito de modos, cada uno de los cuales teniendo su propia frecuencia de corte. La frecuencia de corte de una guía de onda, se utiliza para saber los modos que se propagarán. Su cálculo, para cada modo que se propaga por la estructura de sección rectangular (axb), se obtiene como indica en la siguiente ecuación.

$$f_{cm} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.1)$$

Las guías de onda se suelen diseñar para que se propague un único modo a través de ellas. Se puede demostrar que éste es el de la frecuencia de corte más baja posible, correspondiéndose, en el caso de las guías con sección rectangular con el modo TE_{10} . Para ello, debe cumplirse la relación:

$$b \leq \frac{a}{2} \quad (2.2)$$

Los modos que se propagan son aquellos que tienen una frecuencia de corte menor a la frecuencia de trabajo de 2.45GHz y que son excitados por el sistema de radiación introducido en la guía de onda.

2.1.2.3 Aplicador a la carga

Se entiende por aplicador de microondas aquella parte del sistema en la cual se introduce la muestra a ser calentada. También se le suele denominar cavidad de microondas si bien existen aplicadores que no están basados en cavidades de microondas si no en guías de onda terminadas en cargas adaptadas.

El aplicador de microondas es el máximo responsable de dos cuestiones fundamentales en el proceso de calentamiento por microondas:

- a) La eficiencia del proceso de calentamiento.
- b) La uniformidad del perfil de temperaturas del material a ser calentado.

Por lo tanto, el diseño del aplicador de microondas es fundamental para conseguir un proceso de calentamiento eficiente y eficaz tanto en términos de energía como en la consecución de un producto de calidad elevada.

Así pues, podemos definir el aplicador de microondas como aquella estructura metálica que permite confinar la energía de microondas junto con el material a calentar y que es responsable de la eficiencia energética del proceso y de la uniformidad de calentamiento por microondas.

El aplicador de microondas debe cumplir los siguientes requisitos:

- a) Debe adaptarse a las dimensiones físicas y eléctricas del material
- b) Debe adaptarse al tipo de aplicación (continua, por lotes,...). En este caso los puertos de entrada/salida podrán modificarse en función del tipo de proceso
- c) Adaptación a las características térmicas del material



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

- d) Eficiencia energética: el horno deberá presentar la mayor eficiencia energética posible lo cual implica que las reflexiones y acoplos de las diferentes fuentes sean mínimas (es decir los parámetros $S_{ii}=S_{ij}=0$ para las diferentes fuentes de microondas).
- e) Uniformidad de campo eléctrico: los perfiles de temperatura en el cuerpo calentado deberán ser constantes para lo cual será necesario que el campo eléctrico también lo sea a lo largo del material. Esto también puede implicar el uso de aire caliente o infrarrojos para nivelar la temperatura en la superficie.
- f) Cumplir los requisitos económicos de las empresas: el horno final de microondas deberá, en la medida de lo posible, ajustarse al presupuesto de la empresa que desee adquirirlo. Raramente es posible contentar al comprador salvo reduciendo drásticamente la calidad del equipo construido.
- g) Dimensionado de la potencia a usar: La potencia en el interior del aplicador es otro aspecto muy importante a considerar. De hecho, no es recomendable usar aplicadores muy pequeños con potencias muy grandes dado que el dieléctrico interno (aire) podría sufrir el fenómeno de arco voltaico lo cual dañaría el sistema. En general, se suele admitir que para aplicaciones de alta potencia (más de 100 kW) es más aconsejable usar aplicadores de radiofrecuencia frente a los hornos industriales. Éstos últimos no suelen tener más de 100kW.

Existen numerosos tipos de aplicadores que se eligen en función de la naturaleza de los productos en proceso y del modo de funcionamiento del equipo, continuo o intermitente.

Tipos de aplicadores de microondas

En general cuando se habla de aplicadores de microondas cabría hacer una primera división entre aplicadores basados en cavidades resonantes y aplicadores basados en guías de onda.

En el primer caso, la muestra es introducida en una cavidad metálica y el campo eléctrico será una combinación de los modos que resuenan en la misma en la frecuencia de uso del magnetrón. Estas cavidades podrán a su vez ser monomodo o multimodo.

- Los aplicadores basados en cavidades multimodo son los más usados en aplicaciones industriales. También el horno de microondas que tenemos en casa está basado en una cavidad multimodo. Las dimensiones de la cavidad son tales que a la frecuencia de trabajo coexistirán varios modos resonantes dentro del espacio delimitado por las paredes metálicas. El patrón de calentamiento vendrá dado por la geometría de la cavidad y la muestra así como de las propiedades dieléctricas de la misma.

Generalmente dentro de las cavidades multimodo se usarán técnicas de uniformización de campo basadas bien en el movimiento de la muestra a calentar bien en el uso de agitadores de modos como es en el caso de este proyecto.

- Cuando las muestras son pequeñas, lo cual suele suceder en estudios a nivel de laboratorio, es posible usar cavidades más pequeñas que únicamente permiten la existencia de un modo resonante.



Por lo tanto, el tamaño de la muestra debe ser reducido hasta que se compruebe que está posicionado en el entorno de un máximo y que el campo eléctrico es más o menos constante.

Pasamos a continuación a describir las principales características de estos tipos de hornos o aplicadores.

2.1.2.3.1 Cavidades rectangulares multimodo

El aplicador de microondas más usado es el multimodo rectangular, en la Figura 4 se muestra un ejemplo. Es fácil de construir, y acepta gran cantidad de tipos de cargas y materiales.

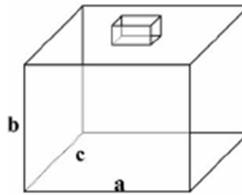


Figura 4 – Esquema cavidad rectangular

Es, sencillamente, una caja metálica con una alimentación cuyas dimensiones son varias longitudes de ondas en ambas dimensiones. Contiene múltiples modos o soluciones en su interior a una frecuencia dada. Dichos modos cambian su frecuencia y su selectividad al introducir un dieléctrico en el interior.

Los modos TE_{lmn} y TM_{lmn} que se pueden dar en esta cavidad cumplen con la igualdad:

$$\left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 = \left(\frac{\omega_{lmn}}{c}\right)^2 \quad (2.3)$$

siendo l, n, m números enteros; c velocidad de la luz y ω_{lmn} es la frecuencia angular de resonancia de cada modo.

En general dadas unas dimensiones del horno interesa conocer cuál será la distribución de campo eléctrico en su interior para:

- a) Colocar el material en una zona con máximos de campo eléctrico lo que provocaría una máxima eficiencia.
- b) Conseguir una distribución de campo promedio uniforme en la muestra.

El campo eléctrico permanecerá fijo si no existe variación en la geometría de la cavidad. Por lo tanto, en ausencia de movimiento de la muestra, o cambios geométricos en la cavidad, la distribución de campo eléctrico será igual a lo largo del tiempo. Esto indica que habrá zonas en la cavidad con máximos de campo eléctrico y otras zonas con campo eléctrico nulo.

Mediante la elección adecuada de las dimensiones del horno se puede obtener una densidad espectral de modos apreciable en función del espectro de la fuente. Esto



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

podría llevar a una distribución de energía de microondas más uniforme que en el caso de las cavidades monomodo.

Desafortunadamente, el encontrar expresiones cerradas o analíticas para la distribución de campo eléctrico en el interior de una cavidad multimodo sólo es posible para el caso de cavidades rectangulares vacías (sin muestra ni cinta de transporte...). Además, las expresiones obtenidas no nos aseguran que el modo en la cavidad vacía vaya a estar presente en la cavidad porque este último extremo dependerá de dónde y cómo coloquemos la fuente de microondas en la cavidad.

Por lo tanto, cuando se quiere conocer el campo eléctrico en el interior de un aplicador multimodo con muestra, línea de transporte, etcétera, es necesario recurrir a métodos numéricos.

Además para mejorar la uniformidad de calentamiento (asociada a la distribución de campo) se utilizan fundamentalmente dos estrategias:

- Movimiento de la muestra en el interior de la cavidad.
 - Giro (como en hornos domésticos).
 - Desplazamiento de la muestra a lo largo de la cavidad (producción continua).
- Movimiento de elementos metálicos (agitadores de modos o *mode stirrers*).

La gran ventaja de este tipo de cavidades es que, debido a que existen múltiples modos presentes en la misma no existen grandes problemas de desadaptación cuando la muestra cambia sus propiedades o posición dentro de la cavidad, lo cual es habitual.

2.1.3 *Stirrer* o agitador de modos

El *stirrer* consiste generalmente en un reflector metálico colocado en el interior de la cavidad. Este objeto perturba la distribución instantánea del campo eléctrico. También modifican las condiciones de contorno de la cavidad y provocan la excitación de distintos modos electromagnéticos en función del tiempo.

El *stirrer* se mueve (normalmente se trata de un movimiento de rotación) en diferentes orientaciones con el fin de producir campos que son uniformemente aleatorios en tiempo y espacio, logrando cambios en las condiciones de contorno. Por uniformemente aleatorios, se entiende que cada posición dentro del volumen tiene el mismo máximo e intensidad de campo promedio en el tiempo. La Figura 5 muestra un ejemplo de estructura del *stirrer*.

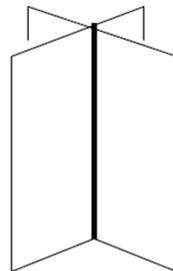


Figura 5 – Ejemplo de *stirrer*



Otra opción muy utilizada en los hornos microondas industriales, y también en los domésticos, es el movimiento de la muestra bien de forma lineal (como sucede habitualmente en hornos industriales) o de forma circular (lo cual es más habitual en procesos por lotes y hornos domésticos).

Se debe indicar que la uniformidad de calentamiento es el aspecto principal que determina la calidad final del procesamiento por microondas por lo que debe cuidarse incluso por encima de otros aspectos tales como la eficiencia si el proceso lo requiere. Para conseguir la uniformidad, el *stirrer* es una gran forma de conseguirlo.

Cuando se produce el movimiento de la muestra o de los agitadores de modos, el patrón de campo eléctrico en el interior del cuerpo a calentar será diferente para cada posición. Si consideramos i la posición i -ésima del agitador de modos dentro del aplicador, N el número total de posiciones recorridas por el agitador de modos y $E_i(x,y,z)$ la distribución espacial del módulo de campo eléctrico para la posición i -ésima, se puede hallar la distribución de campo eléctrico promedio en la muestra a través de la ecuación.

$$E \text{ promedio} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (E_i(x,y,z)^2)}{N}} \quad (2.4)$$

Dicha ecuación supone un promedio lineal de la potencia absorbida por la muestra en cada posición lo cual implica un promedio lineal del cuadrado del módulo del campo eléctrico.

Una vez calculado el campo promedio la pregunta es, ¿qué factor me puede indicar si dicha distribución de campo eléctrico es adecuada? Una primera aproximación sería realizar una inspección visual de la distribución espacial de campo eléctrico y localizar la existencia de mínimos/máximos de campo eléctrico acusados.

Otra aproximación más rigurosa es el empleo de indicadores estadísticos que permitan saber la variabilidad del campo eléctrico en el interior de la muestra. En las siguientes ecuaciones se muestran distintos indicadores con su explicación.

$$IU = |E_{\max}| - |E_{\min}| \quad (2.5)$$

La ecuación muestra como indicador de uniformidad (IU) el uso de la diferencia del valor del módulo del campo eléctrico máximo y mínimo para conocer la uniformidad. Cuanto menor sea dicha diferencia mejor uniformidad existirá en el material. El problema de este tipo de indicador es que no tiene en cuenta si dichos valores son puntuales o si bien se extienden a zonas mayores del material. Además la existencia de campos eléctricos muy pequeños puede dar soluciones, que si bien sean adecuadas desde el punto de vista de uniformidad pueden no serlo desde el punto de vista de la eficiencia de calentamiento.

Por otro lado la siguiente ecuación muestra el uso de la desviación estándar como IU .

$$IU = \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N (E_i^2 - E_{\text{promedio}}^2)} \quad (2.6)$$



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Donde $E_{promedio}$ indica el valor de campo eléctrico promedio de la distribución para la muestra, N es el número de puntos donde se evalúa el campo eléctrico y E_i es el valor del punto eléctrico en el punto i de la distribución de campo eléctrico.

En este caso se evalúa toda la distribución de campo eléctrico disponible en la muestra. Valores bajos de la desviación estándar proporcionarán buenos resultados de uniformidad. El problema de nuevo con este tipo de indicador es que puede proporcionar soluciones con alta uniformidad pero a costa de tener bajos niveles de campo eléctrico.

Para conseguir evitar la anterior situación se puede usar la varianza dividida por el campo promedio en la muestra. De esta forma si el campo promedio es bajo penalizará esta función de evaluación y valores altos de campo promedio bajarán el valor del IU con lo que indicarán mejor uniformidad. La ecuación muestra este criterio de uniformidad.

$$IU = \frac{\sigma}{E_{promedio}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_i^2 - E_{promedio}^2)^2}}{E_{promedio}} \quad (2.7)$$

En el estudio de uniformidad, también es necesario conocer el comportamiento del coeficiente de reflexión S_{11} a lo largo del rango de frecuencias. En nuestro proyecto es de 2.4 a 2.5 GHz. Para ello se calcula el coeficiente de reflexión promedio de las N posiciones del *stirrer* con la siguiente ecuación:

$$|S_{11promedio}| = \sum_{i=1}^N |S_{11}|_i \quad (2.8)$$

En último lugar, se debe asegurar que la eficiencia de los hornos sea alta para que no se desperdicie la energía reflejándose de vuelta hacia el magnetrón o acoplándose entre las diferentes fuentes de energía de microondas. El magnetrón es el elemento ideal para generar este calor debido a que presenta una gran estabilidad en frecuencia y porque tienen una eficiencia aceptable (del orden del 60-70 %). Cuando el coeficiente de reflexión disminuye, la eficiencia de potencia es máxima. La ecuación siguiente muestra cómo están relacionados el coeficiente de reflexión promedio S_{11} y la eficiencia promedio:

$$Eficiencia (\%) = (1 - |S_{11}|^2) \times 100 \quad (2.9)$$

2.2- ALGORITMOS GENÉTICOS

2.2.1 Fundamentos de los Algoritmos Genéticos

Un algoritmo es una serie de pasos organizados que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico. En los años 1970, de la mano de John Henry Holland, surgió una de las líneas más prometedoras de la inteligencia artificial, la de los algoritmos genéticos. Son llamados así porque se inspiran en la evolución biológica y su base genético-molecular. Estos algoritmos hacen evolucionar una población de individuos sometiéndola a acciones aleatorias semejantes a las que actúan en la evolución biológica (mutaciones y recombinaciones genéticas), así como también a una selección de acuerdo con algún criterio, en función del cual se decide cuáles son los individuos más adaptados, que sobreviven, y cuáles los menos aptos, que son descartados. Es incluido dentro de los algoritmos evolutivos, que incluyen también las estrategias evolutivas, la



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

programación evolutiva y la programación genética.

Los algoritmos genéticos son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación. Son algoritmos muy efectivos en problemas complejos donde el objetivo es encontrar un máximo o un mínimo global cuando existen varios máximos o mínimos locales en el espacio de soluciones.

Se basan en dos principios básicos: En primer lugar, la codificación de los individuos de la población en cromosomas, conteniendo cada cromosoma tantos genes como parámetros a optimizar tenga el problema. Normalmente se representan los genes mediante parámetros reales. En segundo lugar, la ejecución de una serie de operadores genéticos inspirados en las leyes de la genética para ir mejorando las poblaciones (conjuntos de soluciones).

Los algoritmos genéticos se inician con la creación de la población de individuos inicial (soluciones) de manera aleatoria. A continuación, mediante alteraciones aleatorias de la población (cruzamiento y/o mutación) se genera descendencia. Posteriormente, se evalúan las características de cada individuo con respecto a la función objetivo y a las restricciones del problema, y en función de su adaptación al ambiente, compiten en un proceso de selección. Finalmente, los individuos más aptos quedan como los progenitores de la siguiente generación y el proceso se repite hasta que se cumple una condición de finalización determinada, que suele ser la convergencia del algoritmo genético o un número de generaciones establecido.

En resumen, un algoritmo genético consiste en lo siguiente: hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y alteraciones que generan diversidad. En las siguientes secciones se verán cada uno de los aspectos de un algoritmo genético. La Figura 6 muestra la representación gráfica del proceso que tiene lugar en el algoritmo genético:

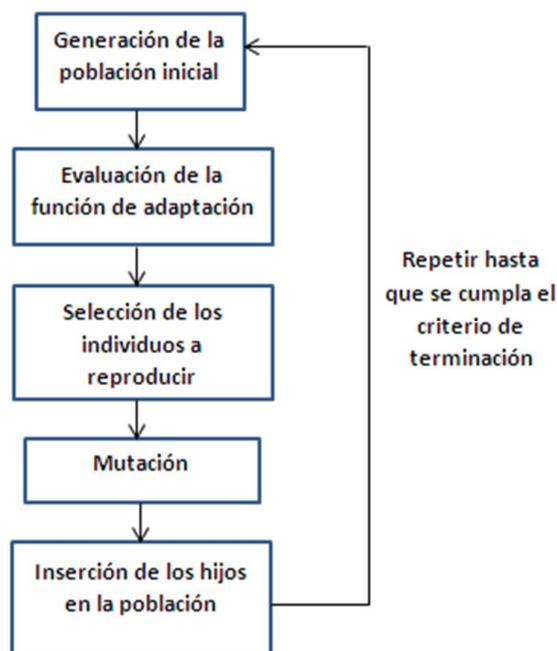


Figura 6 – Esquema de un algoritmo genético



2.2.2 Procedimiento de los algoritmos genéticos

Tal y como se muestra en la figura 6 el esquema seguido por los algoritmos genéticos sigue los siguientes pasos básicos:

- **Generación de la población inicial:** Es el primer paso a realizar en los algoritmos genéticos, y consiste en crear un conjunto inicial de soluciones (población) de manera aleatoria, aunque en ocasiones se incluyen soluciones con algún material cromosómico en particular. Ésta última técnica, asegura, en general, una convergencia más rápida, pero se corre el riesgo de perder diversidad en la población, lo que puede llevar a una convergencia prematura del algoritmo. Se debe especificar además un tamaño de la población suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones.
- **Evaluación de la función de adaptación:** A cada uno de los individuos de esta población se le aplicará la función de aptitud para saber qué tan "buena" es la solución que se está codificando. Se decodifica el gen, convirtiéndose en una serie de parámetros de un problema, se halla la solución del problema a partir de esos parámetros, y se le da una puntuación a esa solución en función de lo cerca que esté de la mejor solución. A esta puntuación se le llama *fitness*. El *fitness* determina siempre los cromosomas que se van a reproducir, y aquellos que se van a eliminar.
- **Selección y Reemplazo de los individuos a reproducir:** Los individuos de la nueva población corresponderán a aquellas soluciones que hayan sobrevivido al proceso de selección. Una vez evaluado el *fitness*, se tiene que crear la nueva población teniendo en cuenta que los buenos rasgos de los mejores se transmitan a esta. Para ello, hay que seleccionar a una serie de individuos encargados de tan ardua tarea. De esta forma, el *fitness* determina los individuos de la población que obtienen soluciones más exitosas, y que por tanto se van a reproducir, y por otro lado, elimina los individuos que obtienen las peores soluciones de acuerdo al criterio de selección.
- **Cruce o *crossover*:** Consiste en el intercambio de material genético entre dos cromosomas (a veces más). El *crossover* es el principal operador genético, hasta el punto que se puede decir que no es un algoritmo genético si no tiene *crossover*, y, sin embargo, puede serlo perfectamente sin mutación. Para aplicar el cruce, entrecruzamiento o recombinación, se escogen aleatoriamente dos miembros de la población. No pasa nada si se emparejan dos descendientes de los mismos padres; ello garantiza la perpetuación de un individuo con buena puntuación. Sin embargo, si esto sucede demasiado a menudo, puede crear problemas ya que toda la población puede aparecer dominada por los descendientes de algún gen, que, además, puede tener caracteres no deseados. Esto se suele denominar en otros métodos de optimización como atranque en un mínimo local, y es uno de los principales problemas con los que se enfrentan los que aplican algoritmos genéticos.
- **Mutación:** En la evolución una mutación es un suceso bastante poco común (sucede aproximadamente una de cada mil replicaciones). En la mayoría de los casos las mutaciones son letales, pero en promedio, contribuyen a la diversidad genética de la especie. En un algoritmo genético tendrán el mismo papel, y la misma frecuencia (es decir, muy baja). Una vez establecida la frecuencia de mutación, por ejemplo, uno por mil, se examina cada bit de cada cadena cuando se vaya a crear la nueva criatura a partir de sus padres (normalmente se



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

hace de forma simultánea al crossover). Si un número generado aleatoriamente está por debajo de esa probabilidad, se cambiará el bit (es decir, de 0 a 1 o de 1 a 0). Si no, se dejará como está. Dependiendo del número de individuos que haya y del número de bits por individuo, puede resultar que las mutaciones sean extremadamente raras en una sola generación.

Además un algoritmo genético tiene también una serie de parámetros que se tienen que fijar para cada ejecución:

- El tamaño de la población: debe de ser suficiente para garantizar la diversidad de las soluciones, y, además, tiene que crecer más o menos con el número de parámetros del individuo, aunque nadie ha aclarado cómo tiene que hacerlo. Por supuesto, depende también del ordenador en el que se esté ejecutando. Conforme el tamaño de la población aumente más posibilidades existirá de converger a la solución óptima pero esto se hace a costa de incrementar el tiempo de simulación durante el proceso de optimización.
- Condición de terminación: lo más habitual es que la condición de terminación sea la convergencia del algoritmo genético o un número prefijado de generaciones.

En este PFC los parámetros elegidos para los procesos de optimización han sido: 141 generaciones, con 4x7 individuos, un *crossover* o máximo número de iteraciones de 9 y de mutaciones igual al 60%.

La herramienta de optimización por algoritmos genéticos está integrada dentro del programa de simulación electromagnético CST Microwave Studio como comentaremos en el capítulo 3, por lo que únicamente ha sido necesario parametrizar los diseños de las cavidades a optimizar y configurar aquellos parámetros a ser optimizados así como las metas de optimización y los parámetros generales del algoritmo genético: población, generaciones, cruces, etcétera.

2.3- PARAMETROS DE DISPERSION (*Scattering Parameters (S)*)

Los sistemas de guías de ondas y cavidades resonantes eran analizados, en un principio, por su descripción electromagnética, pero según vamos aumentando la frecuencia, la longitud de onda se va haciendo cada vez más pequeña, por lo que las *leyes de Kirchoff* dejan de tener validez. Además, trabajar con tensiones y corrientes se hace más difícil cada vez, ya que dependiendo de la frecuencia en la que estemos, se hace imposible hacer cortocircuitos y circuitos abiertos estables. La teoría de circuitos de microondas surgió ante la necesidad de estudiar, de una manera más sencilla, este tipo de sistemas.

La combinación de los distintos modos, con propagación positiva y negativa, que se propagan a lo largo de un guía de onda se puede caracterizar mediante los “Parámetros *S*” (*Scattering*) o matriz de dispersión. Estos parámetros permiten caracterizar los circuitos en la banda de microondas.

Se considera una red de microondas conectada al exterior mediante N accesos o líneas de transmisión. Debe definirse un plano de referencia en el que se consideran las ondas de tensión



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS



normalizadas en a_i (dirección entrante al circuito) y b_i (en dirección saliente al circuito) así, la matriz de dispersión del circuito de microondas permitirá relacionar las citadas ondas de tensión normalizadas incidentes y reflejadas.

Un circuito de microondas se conecta con el exterior mediante líneas de transmisión que se denominan accesos o puertos. Para poder caracterizar el circuito, se deben medir las ondas de tensión y corriente para cada puerto, habiendo fijado con anterioridad un plano de referencia. (Se dirá que una corriente es positiva si se dirige hacia la red). De esta forma, se caracterizará una red de N puertos mediante las $2N$ variables (V_i, I_i) , de las cuales, la mitad son independientes. Se pueden observar la red de N puertos y sus respectivas variables en la Figura 7.

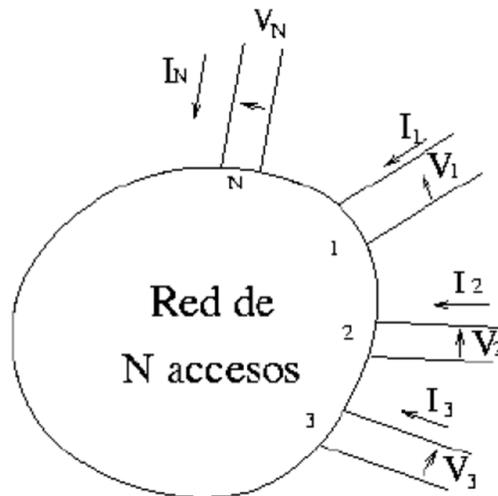


Figura 7 – Red de N accesos

Generalmente, una red se describe a través de sus matrices de impedancias $[Z]$ o admitancias $[Y]$, tal y como indican las ecuaciones siguientes:

$$[V] = [Z] \cdot [I] \quad (2.10)$$

$$[I] = [Y] \cdot [V] \quad (2.11)$$

Siendo, $[Z] = [Y]^{-1}$

Sin embargo, a frecuencias de microondas las matrices $[Z]$ e $[Y]$, presentan grandes inconvenientes, que no hacen su uso apropiado, ya que,

- Un desplazamiento de los planos de referencia de los puertos, produce cambios en los valores de corriente y tensión, y por tanto, modificaciones profundas en la forma de las matrices $[Z]$ e $[Y]$.
- Es difícil producir buenos circuitos abiertos para poder medir adecuadamente los elementos Z_{ij} e Y_{ij} .
- En el caso de dispositivos activos un cortocircuito o circuito abierto puede producir daños



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

irreversibles, oscilaciones u otros efectos indeseados en el circuito.

Si se utilizan las amplitudes de las ondas positiva y negativa de tensión en los planos de referencia para describir la red, en lugar de utilizar tensiones y corrientes, se eliminan los inconvenientes anteriores. De esta manera, se disponen también de $2N$ variables $V_{+i}, V_{-i}, i = 1, 2, \dots, N$, relacionadas linealmente con los $V_i, I_i, i = 1, 2, \dots, N$; según las ecuaciones siguientes:

$$V_i = V_i^+ + V_i^- \quad (2.12)$$

$$I_i = Y_{0i} (V_i^+ - V_i^-) \quad (2.13)$$

Como convenio, se manejarán valores normalizados de tensiones y corrientes:

$$a_i = \bar{V}_i^+ = \frac{V_i^+}{\sqrt{Z_{0i}}} = \sqrt{Y_{0i}} \cdot V_i^+ \quad (2.14)$$

$$b_i = \bar{V}_i^- = \frac{V_i^-}{\sqrt{Z_{0i}}} = \sqrt{Y_{0i}} \cdot V_i^- \quad (2.15)$$

$$I_i^+ = \sqrt{Z_{0i}} \cdot I_i^+ = V_i^+ = a_i \quad (2.16)$$

$$I_i^- = \sqrt{Z_{0i}} \cdot I_i^- = -V_i^- = -b_i \quad (2.17)$$

De manera que se tiene:

$$\bar{V}_i = \sqrt{Y_{0i}} \cdot V_i \quad (2.18)$$

$$\bar{I}_i = \sqrt{Z_{0i}} \cdot I_i \quad (2.19)$$

Sustituyendo en las ecuaciones, se obtiene que:

$$V_i = \sqrt{Y_{0i}} \cdot (V_i^+ + V_i^-) = a_i + b_i \quad (2.20)$$

$$I_i = \sqrt{Z_{0i}} \cdot \frac{1}{Z_{0i}} (V_i^+ - V_i^-) = a_i - b_i \quad (2.21)$$

Resultando que:

$$P_i^+ = \frac{|V_i^+|^2}{2Z_{0i}} = \frac{1}{2} |V_i^+|^2 = \frac{1}{2} |a_i|^2 \quad (2.22)$$

$$P_i^- = \frac{|V_i^-|^2}{2Z_{0i}} = \frac{1}{2} |V_i^-|^2 = \frac{1}{2} |b_i|^2 \quad (2.23)$$

Finalmente, en función de estas variables se define la matriz de dispersión, $[S]$, mediante la relación:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Donde se observa que $[b]$ y $[a]$ representan los vectores columna de dimensiones $N \times 1$ cuyas componentes son, respectivamente, ondas salientes b_i y entrantes a_i del circuito bajo estudio, mientras que S designa a la matriz de parámetros de dispersión de dicho circuito, que será de tamaño $N \times N$.



La matriz de dispersión, proporciona las amplitudes normalizadas de las ondas negativas o reflejadas ($[b]$) en función de las amplitudes de las ondas positivas o incidentes ($[a]$).

Si nos fijamos en la fila j -ésima:

$$b_j = S_{j1}a_1 + S_{j2}a_2 + \dots + S_{ji}a_i + \dots S_{jN}a_N \quad (2.23)$$

Según la definición, los elementos S_{ji} , también llamados parámetros S , vienen dados por la expresión (2.16) y (2.17).

$$S_{ji} = \left. \frac{b_j}{a_i} \right|_{a_k=0(k \neq i)} = \left. \frac{\overline{V}_j^-}{\overline{V}_i^+} \right|_{\overline{V}_k^+=0(k \neq i)} \quad (2.24)$$

Para conseguir la condición $a_k = 0$ en el k -ésimo acceso (es decir, el acceso k -ésimo está terminado, la carga se encuentra adaptada a la línea), se debe situar en algún plano del mismo una resistencia de valor igual a la impedancia característica de la línea. Esto se puede observar en el esquema de red de N puertos de la Figura 8. Los parámetros S tienen por tanto, el siguiente significado:

- S_{ii} es el coeficiente de reflexión visto desde el plano de referencia i -ésimo cuando se sitúa en este acceso un generador y todos los demás accesos están terminados.
- S_{ji} es el coeficiente de transmisión (señal saliente en el plano de referencia j dividida por señal entrante en el plano de referencia i en la misma situación anterior, es decir con un generador en el acceso i y todos los demás terminados.

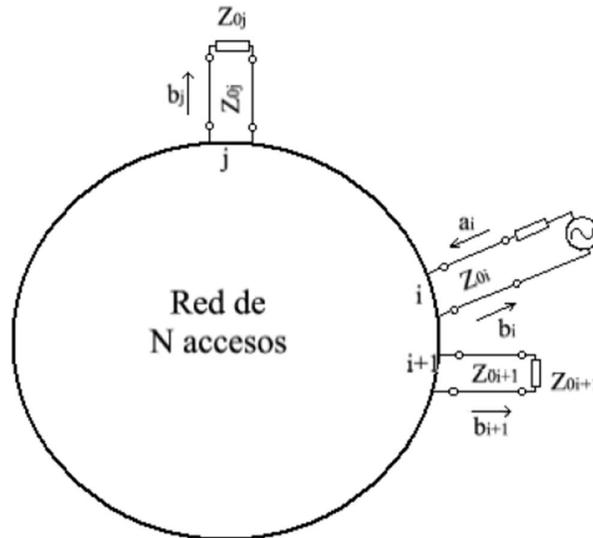


Figura 8 – Significado de S_{ii} y S_{ji}

Se puede comprobar que los inconvenientes del uso de matrices de impedancias y admitancias quedan solventados, ya que en este caso:

- Un desplazamiento de planos de referencia produce solamente cambios de fase de las ondas positivas y negativas, y por lo tanto solamente cambios de fase en los valores S_{ij} .



CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS



- La condición de acceso terminado es independiente del plano donde se sitúe la terminación.
- Por lo que se refiere a dispositivos activos, la medida se realiza en condiciones de carga resistiva, menos peligrosa que con un cortocircuito o circuito abierto.



CAPÍTULO 3: HERRAMIENTA DE TRABAJO CST MICROWAVE STUDIO

3.1- INTRODUCCIÓN A CST MICROWAVE STUDIO

En este capítulo se exponen la herramienta de trabajo CST Microwave Studio que ha sido usada en el proyecto “Nuevo procedimiento de diseño de cavidades multimodo con agitadores de modo”. Además, se explicarán algunos de los conceptos importantes relacionados con el programa usado. No obstante, no se explicarán detalladamente todas las funciones de las que el programa dispone, ya que en “Ayuda” dispone de un extenso manual detallando su funcionamiento. Estará centrado en aquellas herramientas de carácter importante y que han sido utilizadas durante el desarrollo del proyecto.

CST Microwave Studio, es una herramienta especializada para la simulación de componentes en alta frecuencia. Sus aplicaciones abarcan desde comunicaciones móviles, diseño sin hilos e integridad de la señal, hasta diseño y análisis de campos electromagnéticos en general. Además, esta herramienta permite una simulación electromagnética en 3D.

El programa CST Microwave Studio 9, una vez guardado, genera un archivo “.cst”, así como una carpeta con el mismo nombre del archivo donde se guardan los diferentes resultados y tablas.

Para la resolución de los diferentes problemas electromagnéticos, CST Microwave Studio utiliza la *Técnica de Integración Finita (FIT)*, consistente en la reformulación discreta de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral. De esta manera, se permite la simulación de problemas reales de campos electromagnéticos, con un amplio rango de frecuencias y geometrías complejas.

El programa proporciona manuales de usuario, diversos ejemplos de diseños y una interfaz gráfica sencilla e intuitiva, que facilita el diseño. Gracias a este software, distintos sectores de las Telecomunicaciones, Defensa, Automovilismo, Medicina, Electrónica, etc, y diversas empresas multinacionales relacionadas con todos estos campos, pueden desarrollar sus productos que interactúan con campos electromagnéticos. Los resultados simulados son muy fiables al comportamiento real final.

La ventana principal del programa CST Microwave Studio 9 está dividida en cuatro partes principalmente tal y como se aprecia en la Figura 9. Estas partes se encargan de lo siguiente:

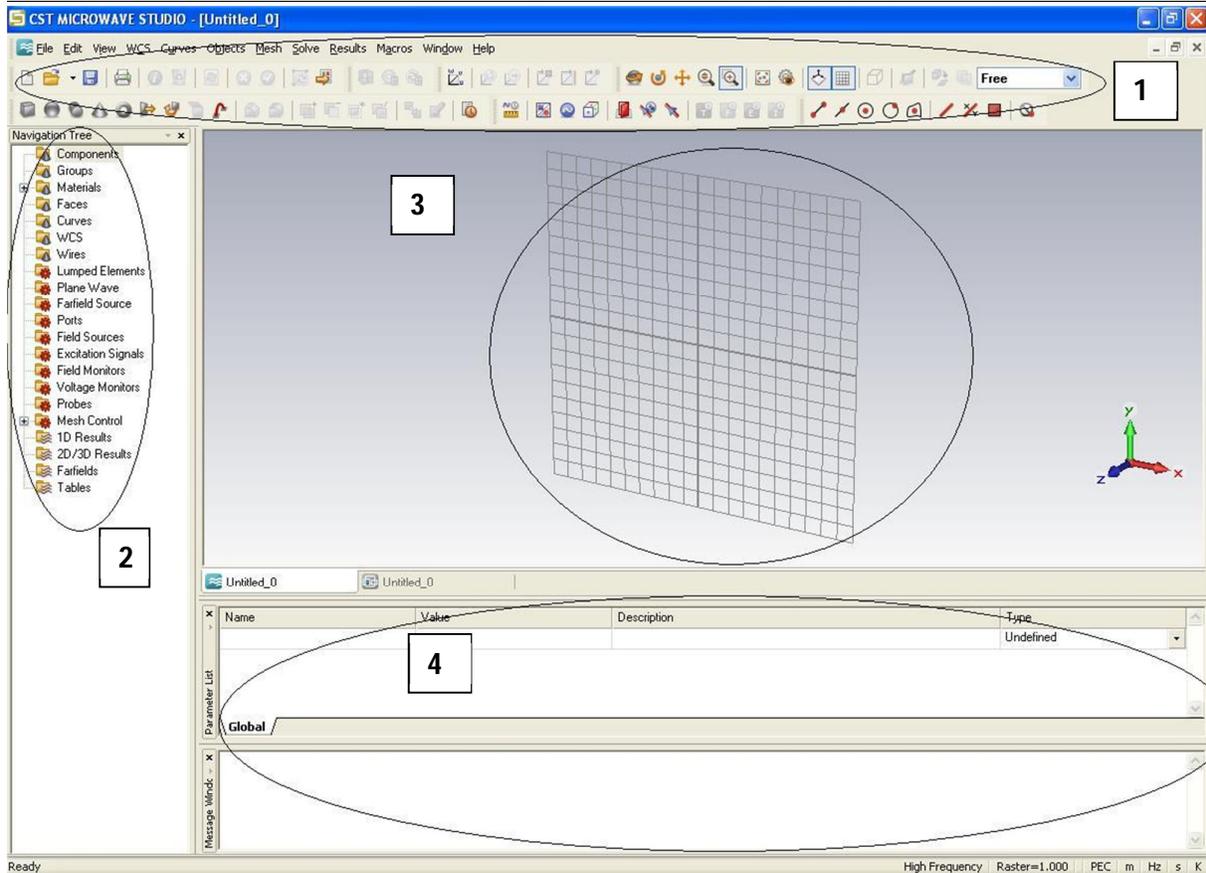


Figura 9 – Ventana principal de inicio

- En la zona “1” se encuentran los menús principales con la totalidad de herramientas de que dispone CST Microwave para trabajar en un proyecto. También dispone de barras de herramientas de acceso rápido a las distintas funciones del programa. Son una forma muy flexible de acceder a comandos del menú usados frecuentemente.
- La zona “2” es el árbol de navegación. Es una parte esencial de la interfaz de usuario. Desde aquí se puede acceder a elementos estructurales así como resultados de simulación.
- La zona “3” es el plano de dibujo sobre el cual se dibujarán las estructuras geométricas. Este modelador te permite cambiar la posición y orientación del plano de dibujo por medio de herramientas diversas, este rasgo es lo que lo hace muy poderoso. También se visualizan los resultados gráficamente, como son el campo eléctrico o las gráficas de parámetros S .
- Y por último, en la zona “4” se encuentran dos ventanas con distintas utilidades. En la ventana de arriba se exponen las diferentes variables creadas por el usuario, con sus valores y descripción, mientras que en la ventana de abajo, se muestra la carga del proyecto y los distintos pasos de la simulación. En esta última ventana aparecerán los errores y *warnings* que se pudieran cometer.

3.2- PROYECTO GENERAL

En este apartado se expondrán los diferentes pasos para el diseño del proyecto principal con las distintas características utilizadas. También se analizarán los archivos generados. No ha sido



CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS DE TRABAJO CST MICROWAVE STUDIO



necesario realizar macros por programación directa en este PFC ya que la nueva versión de CST permite, de una manera sencilla, la construcción del diseño por módulos, detallando las distintas características de cada uno de ellos a través de parámetros que pueden ser optimizados. Más adelante se verá que en una parte del proyecto si se ha hecho uso de código en MATLAB para obtener el valor del campo eléctrico en diferentes puntos de la muestra.

En primer lugar debemos fijar las condiciones iniciales para la posterior construcción de la macro en la pestaña *Solve* tal y como se muestra en la Figura 10.

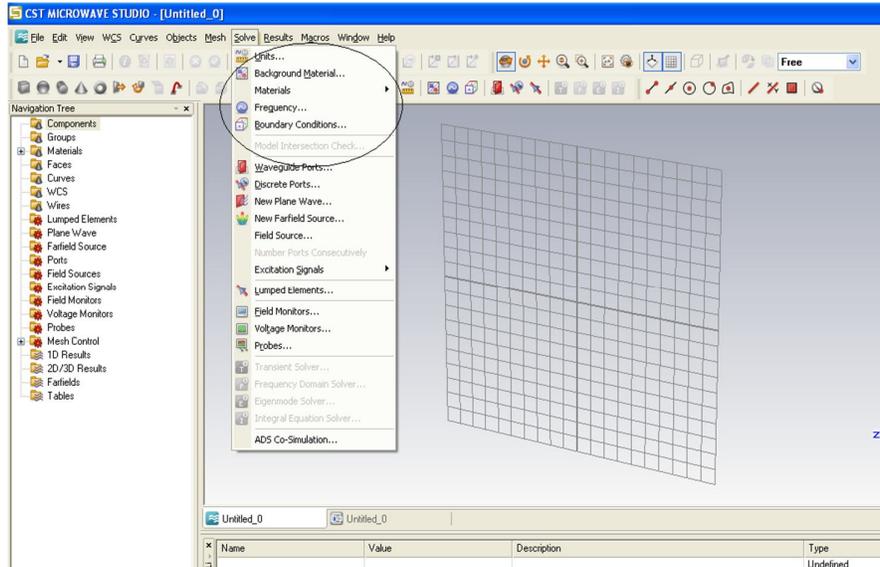


Figura 10 – Pantalla con características iniciales

Entre las opciones más importantes a la hora de configurar el programa se encuentran:

- *Units*: fija las unidades con las que se trabaja, tanto en frecuencia, longitud, temperatura y tiempo.
- *Background Material*: permite elegir el material principal, que será el existente mientras que no se construyan los diferentes módulos con sus respectivos materiales.
- *Materials*: define los distintos materiales que se van a utilizar para el diseño de la cavidad multimodo. Permite tanto cargar materiales de la *Library*, como fabricarlos por uno mismo con las características que se deseen.
- *Frequency*” se establece el rango de frecuencias en el que se quiere trabajar, que para nuestro proyecto será en torno a los 2.45GHz.
- *Boundary Condition*” situamos las condiciones de contorno.

Una vez establecidas las condiciones iniciales del proyecto, pasaremos a diseñar los diferentes componentes de nuestro horno. Para formar estos componentes, CST dispone de una serie de estructuras básicas a partir de las cuales se pueden crear formas más complejas. La Figura 11 muestra una visión de los accesos directos para las distintas estructuras básicas. También se puede acceder manualmente en la pestaña *Objects*→*Basic shapes*. Generalmente, en este proyecto la estructura más utilizada será de tipo “*brick*” o ladrillo.



Figura 11 – Formas básicas disponibles con acceso directo



A la hora de definir las características de la estructura “brick” o ladrillo, como se puede observar en la ventana de Figura 12, se pueden establecer las dimensiones para los eje X, Y y Z. También se puede elegir una componente existente desde la lista o crear una nueva. En este PFC siempre será el mismo “component1” pues solo consta de un componente global donde se insertarán otras estructuras. Por último, en esta ventana se podrá elegir el material existente o definir uno nuevo material desde la lista. En este último caso se abrirá una nueva ventana. En esta se podrá especificar el nombre del material y el tipo.



Figura 12 – Menú de un rectángulo

Una vez visto cómo se define una estructura, la manera de proceder hasta alcanzar el diseño final será integrar unas estructuras con otras. Otro paso importante en el diseño se trata de dotarlo de unos puertos de entrada o salida con el fin de una posterior simulación de las ondas electromagnéticas a lo largo del diseño. Para ello, uno se dirige a la pestaña *Solve* → *Waveguide Ports* desde el menú principal. La Figura 13 muestra el menú para cada uno de los puertos.

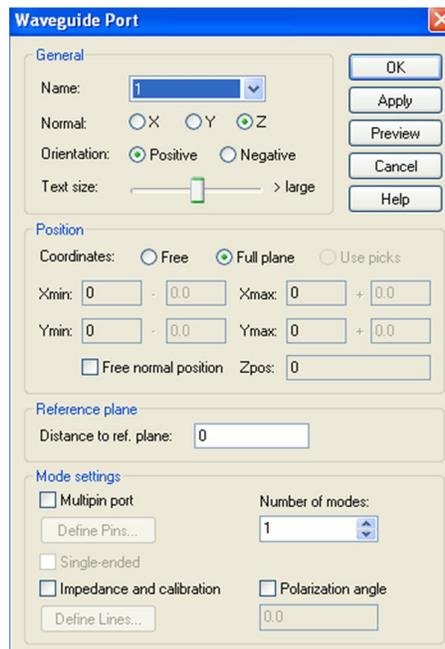


Figura 13 – Menú Puertos



Finalmente, y cuando se han situado los puertos de entrada o salida, es posible simular para observar el comportamiento de las ondas electromagnéticas que se excitarán en el puerto 1 de la cavidad y volverán reflejadas de nuevo hacia él.

Para ello CST dispone de 4 módulos de cálculo: *Transient Solver*, *Frecuency Domain Solver*, *Eigenmode Solver* e *Integral Equation Solver*. La que se va a utilizar para optimizar en este proyecto es *Transient Solver*, que se encuentra en la pestaña *Solve* → *Transient Solver*. En la Figura 14 se puede observar el menú *Transient Solver* con sus diferentes características:

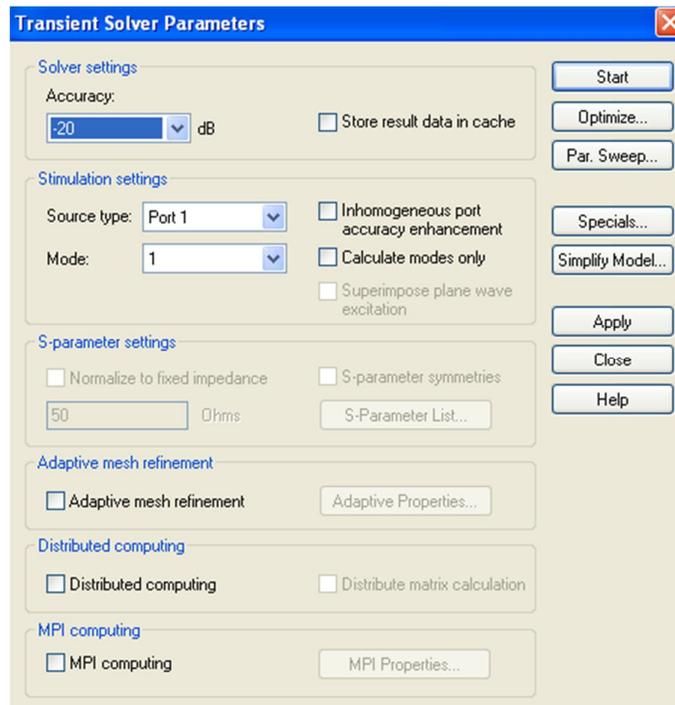


Figura 14 – Menú Puertos

De los menús u opciones a la derecha de la Figura 14, destaca la optimización de parámetros *Optimize* que será analizada más adelante y que es incorporada en la última versión. También podemos elegir la precisión que se quiere lograr por medio de *Accuracy*. En el caso de este proyecto se elige -20dB para permitir acelerar las simulaciones ya de por sí extensas en el tiempo.

En la pestaña *Stimulations Settings* se puede especificar cual columna de la matriz *S* deberá ser calculada. Por consiguiente se selecciona en “*Source type*” el puerto para el cual el acoplamiento a todos los otros puertos será calculado durante una simulación simple. En el ejemplo, se fija el “*Source type*” para el puerto1, los parámetros *S* (*S11*, *S21*) serán calculados.

Se puede ahora iniciar la simulación presionando el botón “*Start*”. En poco una barra de progreso aparecerá a través de la cual se visualizarán los siguientes procesos:

1. *Checking model*: Durante este paso, el modelo de entrada será chequeado para errores tales como invalidar materiales superpuestos, etc.
2. *Calculating matrix and dual matrix*: Durante estos pasos el sistema de ecuaciones será solucionado.



3. *Calculating the port modes*: En este paso se calcula distribución del campo de modo de puerto y las características de propagación así como las impedancias de los puertos. Esta información será utilizada posteriormente en el análisis de dominio del tiempo de la estructura.

4. *Processing excitation*: Durante esta etapa una señal de entrada será alimentada dentro del puerto de simulación. El solucionador entonces calculará los campos de distribución resultantes en el interior de la estructura al igual que el modo de amplitudes de todos los otros puertos. Con esta información, la frecuencia dependiente de los parámetros S será calculada en un segundo paso usando una transformada de Fourier.

5. *Transient field analysis*: Después de que el pulso de excitación haya desaparecido, hay aún una energía de campo electromagnético en el interior de la estructura. El solucionador entonces continúa para calcular la distribución de campo y los parámetros S hasta que la energía interior de la estructura haya decaído por debajo de cierto límite.

6. Para esta simple estructura, el análisis de entrada tomará solamente unos pocos segundos para completarse.

Después de que el solucionador haya completado el modo de cálculo de los puertos se puede tener una visión de los resultados (incluso si el *transient* está aún corriendo).

A fin de visualizar los resultados que nos interesan en este PFC, primeramente se tiene que elegir la solución desde el árbol de navegación o *Navigation Tree*. En este proyecto se trata del *coeficiente de reflexión* o parámetro S_{11} y del campo eléctrico. Para visualizar S_{11} , hay que seguir la siguiente ruta 1D Results→|S|dB→S1,1 para visualizar la gráfica en decibelios. También se puede visualizar en lineal si se desea, en 1D Results→|S|linear→S1,1. En el caso del campo eléctrico la ruta es 2D/3D Results→E-field→e-field(f=2.45)→Abs.

3.2.1 – MACRO con CST

Como se verá más adelante, es necesario para la realización de nuestro proyecto conocer el valor de S_{11} y del campo eléctrico para cada frecuencia. Para ello CST dispone de unas herramientas muy útiles para llevar a cabo estas tareas.

En el caso de S_{11} , desde la ruta 1D Results→|S|linear→S1,1, presionando el botón derecho del ratón, se abre un menú donde si pulsamos *Copy*, se extraerá el valor de S_{11} para cada frecuencia pudiéndolo guardar en cualquier documento de texto.

Por otro lado, para obtener el campo eléctrico en diferentes puntos de la muestra no se dispone de una opción tan útil como en el caso de S_{11} como se ha comentado anteriormente. Por este motivo para obtener el valor del campo eléctrico promedio en función de la frecuencia para cada una de las posiciones de manera que se pueda visualizar un promedio de cómo afecta el campo eléctrico a la muestra por el conjunto de las distintas posiciones del *stirrer* es necesario realizar una macro.

Esta macro se puede realizar desde el propio programa CST Microwave. Para ello se puede proceder de dos formas. La primera es empezando desde cero, creándose una nueva macro en la pestaña *Macros* →*Open VBA Macro Editor* e insertando todo el código desde el principio. La segunda se trata aprovechando ya nuestro diseño CST te permite transformar



todas esas operaciones a código para la macro, rellenando únicamente nosotros el código que falta para realizar las operaciones que se desean. Para realizar esto, hay que dirigirse a la pestaña *Edit* → *History List*, se seleccionan las operaciones que se quieren pasar a código y se pulsa el botón Macro, obteniendo una macro con el código.

3.3- ESTRUCTURAS SIMULADAS

La estructura general en la que se basa este proyecto es una cavidad rectangular con aire en su interior y con un agitador de modos o *stirrer* el cual está sujeto a la cavidad por medio de una pieza en forma de cilindro. En el interior de la cavidad se ha colocado una muestra dieléctrica con pérdidas que será analizada para ver como se ve afectada por el campo eléctrico. En la Figura 15 se muestran todos los componentes (o módulos) que forman parte de la estructura final de nuestro proyecto y de los cuales hablaremos detalladamente a continuación.



Figura 15 – Lista de componentes

La primera gran estructura se trata de la cavidad rectangular (o aplicador), la cual está formada por dos componentes: *cavidadint* y *metalcavidad*.

“*Metalcavidad*” modela la pared conductora de la cavidad por lo que se ha escogido el tipo de material metálico o PEC y se le ha dado un grosor de 2mm.

Por otro lado el objeto “*Cavidadint*” modela el interior de la cavidad que al estar con aire en su interior se ha escogido como material “*Vacuum*”. Se puede observar como el valor que se ha dado a los dos componentes en *X*, *Y* y *Z* están en función de las variables siguientes:

- *Lcavx*: se trata de la longitud de la cavidad rectangular en el eje *X*.



- L_{cavy} : se trata de la longitud de la cavidad rectangular en el eje Y.
- L_{cavz} : se trata de la longitud de la cavidad rectangular en el eje Z.

Esto es así para que cuando se realice la simulación el valor vaya variando entre unos determinados valores con el objetivo de encontrar los valores más óptimos. La configuración que se ha dado a estos dos componentes se muestra en la Figura 16:

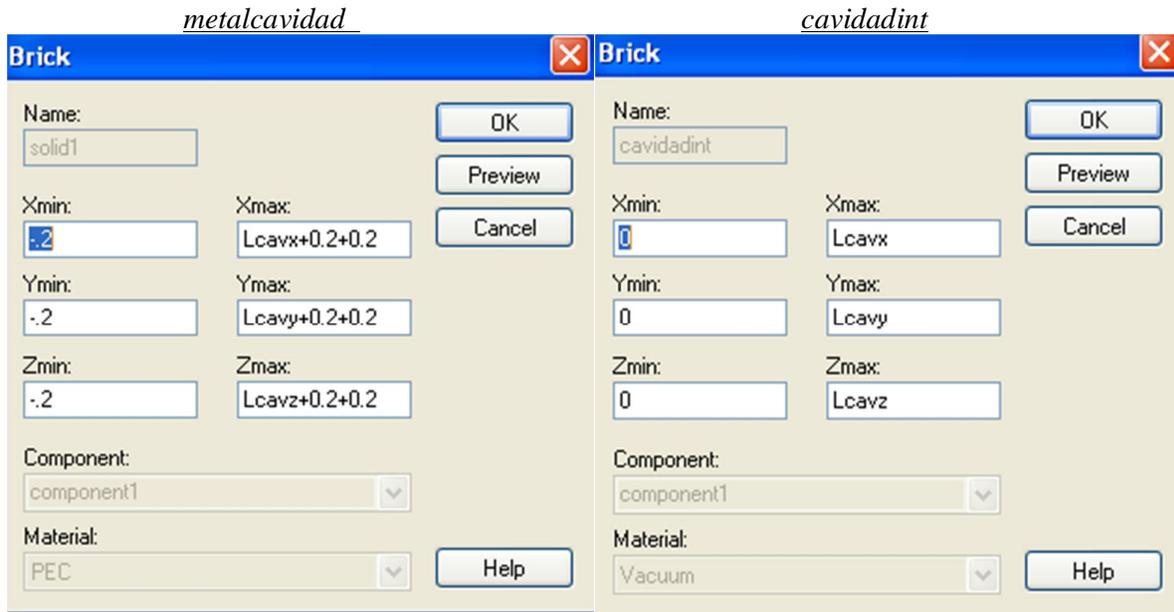


Figura 16 – Dimensiones de la cavidad rectangular

Otra estructura básica de un sistema de calentamiento por microondas, como se explicó en la parte teórica, es el tramo de guía de ondas que conecta el generador con la cavidad. Esta estructura consta de los componentes: *metalguía*, *interiorguía* y de *ranura*, *ranura_1*.....*ranura_6*. Sobre esta estructura es donde se ha colocado el puerto de entrada que se ha creado, en donde si se hiciera de manera real estaría colocado el analizador de redes. En la Figura 17 se aprecia donde se ha colocado exactamente el puerto de entrada.

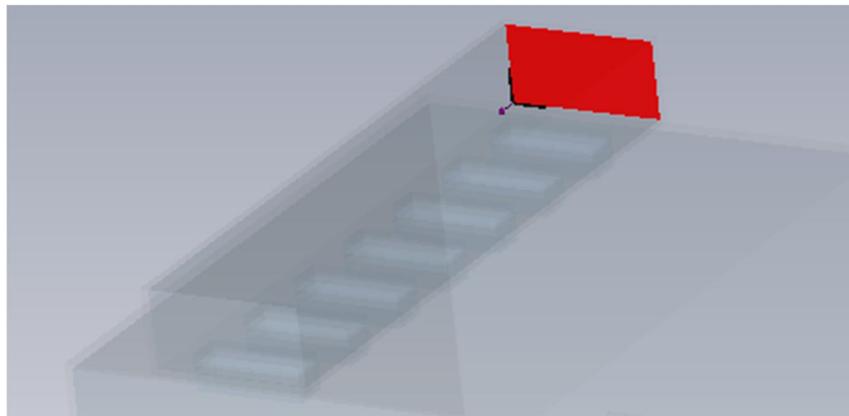


Figura 17 – Puerto de entrada en la guía de ondas



Al igual que en la cavidad, la guía de ondas también está formada de dos componentes que forman la estructura principal: *metalguía* e *interiorguía*. La primera se trata de la pared conductora de la guía con un espesor de 2 mm y la segunda se trata del interior relleno de aire de la guía. Para definirlos se ha usado una nuevo parámetro llamado “*L1*” que define a que distancia sobre el eje X va a estar posicionada la guía sobre la cavidad y que también será optimizado. Por otro lado las constantes “8.6” y “4.3” definen el ancho y la altura de la guía respectivamente. Estos dos componentes se han definido como muestra la Figura 18:

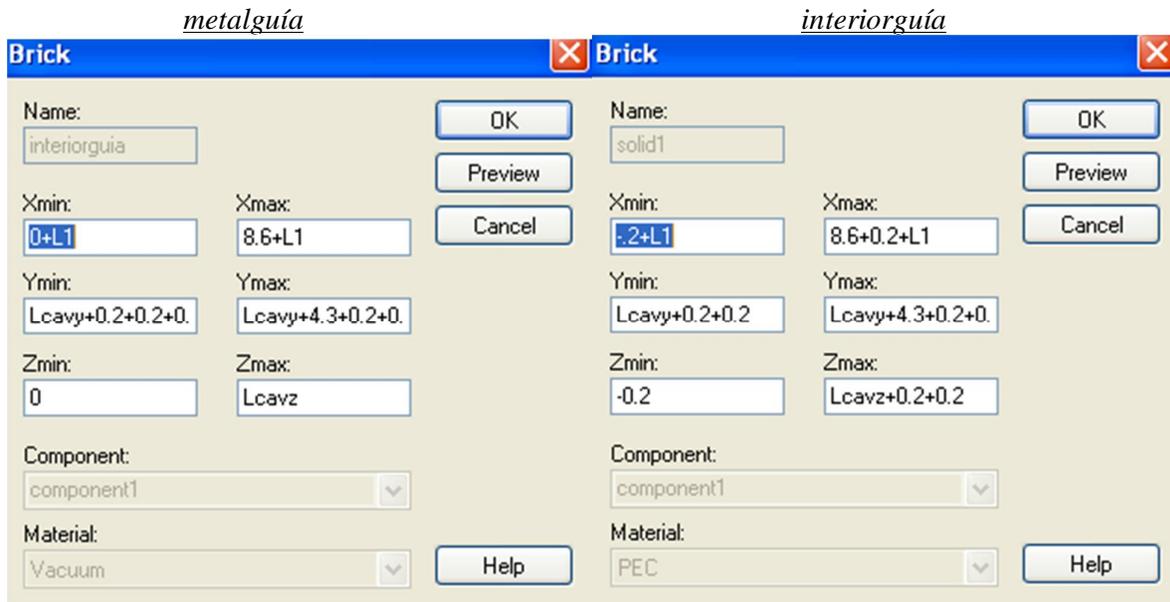


Figura 18 – Dimensiones de la guía de ondas

Las ranuras de la guía de onda actúan como antenas y excitan varios modos al tener varias localizaciones en las que se produce la radiación de microondas. Las dimensiones de las ranuras y su posición modifican la cantidad de energía que irradia la guía de onda. Estas ranuras están representadas por los 7 componentes *ranura* en el proyecto cuyas dimensiones características son las indicadas en la Figura 19:

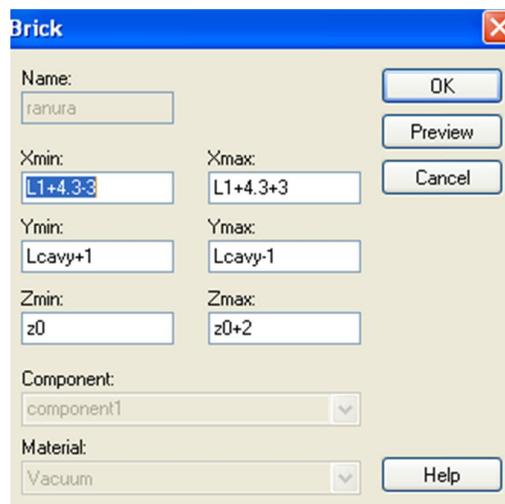


Figura 19 – Dimensiones de la ranura



Un nuevo parámetro ha aparecido a la hora de definir las dimensiones de las ranuras. Se trata de “*z0*” que define la posición de comienzo de la ranura en el eje *Z* y al igual que en los casos anteriores será uno de los parámetros a optimizar. Por otro las ranuras tendrán un valor constante de 2 cm de altura por 2 cm de anchura.

Para evitar tener que repetir la misma operación para cada una de las 7 ranuras, CST Microwave permite realizar una copia del componente por medio de la opción *Transform*. Para ello, sobre el menú de componentes de la izquierda se pulsa el botón derecho sobre el componente, eligiendo la opción *Transform*. O también desde el menú en la pestaña *Objects* → *Transform*. Para el objetivo que se persigue, el menú se ha rellenado como muestra la Figura 20:

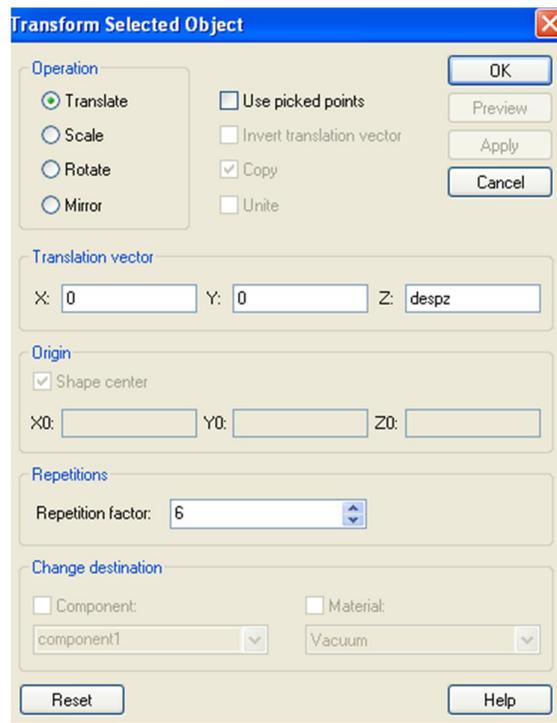


Figura 20 – Opción *Translate*

Se elige la opción *Translate* pues permite trasladar la figura en cualquier dirección. En este caso se quiere trasladar el componente *ranura*. Y se elige un factor de repetición de “6”, realizando seis copias del mismo componente con una separación entre ranuras definida por el parámetro “*despz*” (sobre el eje *Z*) el cual será también optimizado en la simulación con el objetivo de alcanzar su valor más óptimo.

Los parámetros geométricos de la siguiente estructura del diseño se muestran en la Figura 21. Se trata de la muestra dieléctrica o del material que va a recibir el calentamiento por microondas. En esta estructura, cuyo componente recibe el nombre de *muestra*, se estudiará cómo afecta el campo eléctrico a su volumen.

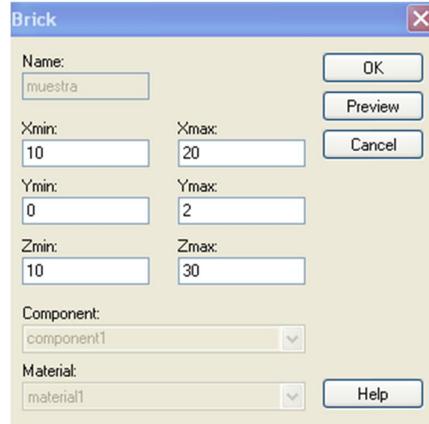
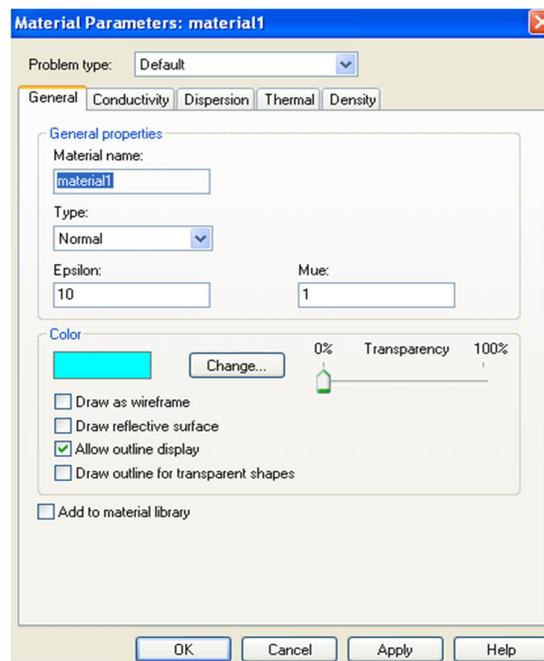


Figura 21 – Dimensiones muestra

En este componente en particular, a diferencia de los que se han visto hasta entonces, las dimensiones no van a depender de ningún parámetro y van a ser invariables durante todo el proceso en X , Y y Z . Otra particularidad de este componente es que está compuesto por un nuevo material llamado “*material1*” el cual se ha definido con una constante dieléctrica con valor $\epsilon' = 10$, un factor de pérdidas con valor $\epsilon'' = 1$ y una tangente de pérdidas con valor $\tan \delta = 0.1$. En la Figura 22 se puede visualizar como se ha definido este nuevo material:

Figura 22 – Configuración *material1*

Al igual que en la muestra, en el siguiente componente las dimensiones van a ser constantes e invariables durante todo el proyecto. Este componente es el cilindro (de nombre *cilindro*) que sujeta el *stirrer* a la cavidad. En el caso del cilindro que sujeta el *stirrer*, el componente no se trata de una *basic shape* del tipo *brick*, sino que se ha utilizado el tipo *cylinder*. Las medidas escogidas se pueden ver en la Figuras 23. El cilindro tendrá un radio de 0.5 cm, una longitud de 3 cm y estará situado justo en el centro de la cara derecha de la cavidad.



Figura 23 – Dimensiones cilindro

Como última estructura del diseño se encuentra el *stirrer* o agitador de modos. Los componentes que lo forman son los siguientes: *stirrer1*, *stirrer1_1*, *solid1*, *solid1_1* y *solid1_2*. Las “palas” del *stirrer* son el componente *stirrer1* y *stirrer1_1*. Como en las ranuras de la guía de ondas, se ha usado la herramienta *Transform* para hacer una copia de *stirrer1* gracias a la herramienta *Translate*.

Pero aparte de la opción *Translate*, *Transform* permite otra serie de operaciones que van a ser de gran ayuda para cumplir el objetivo de diseño. En nuestro proyecto se ha elegido un *stirrer* cuya estructura estará formada por dos palas en forma de cruz. Para llegar a este diseño, habiendo realizado una copia del componente *stirrer1*, se deberá hacer otro *Transform* en este caso del tipo *Rotate*. Esta opción se utiliza para rotar alrededor de los ejes de coordenados a través de un ángulo fijo. En nuestro caso se gira 90° sobre el eje X, como se indica en la Figura 24. Esta herramienta también facilitará la tarea para ir rotando el *stirrer* con una determinada inclinación como se verá más adelante.

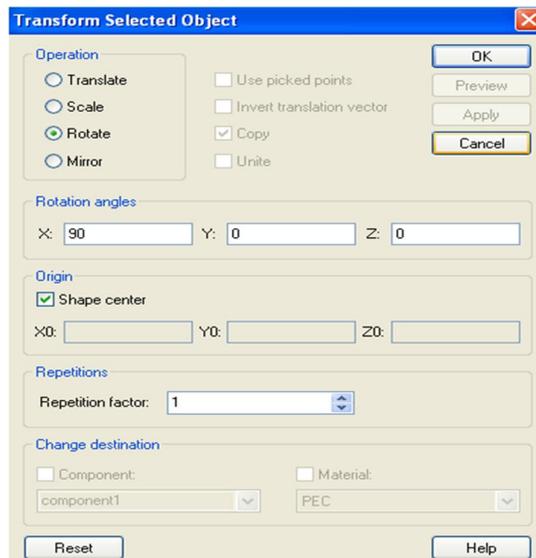


Figura 24 – Operación Rotate



Para finalizar con el diseño del *stirrer* se deben definir las dimensiones y posición de las corrugaciones. Las corrugaciones están representadas por los componentes *solid1_i*. Al igual que en los casos anteriores se ha hecho uso de la herramienta *Transform* \rightarrow *Translate* para hacer una copia del mismo componente. En este PFC se ha diseñado un *stirrer* cuyas palas tienen 3 corrugaciones. Las corrugaciones se han diseñado de manera asimétrica porque teóricamente son con las que mejores resultados se obtienen. La configuración de este componente se muestra en la Figura 25:

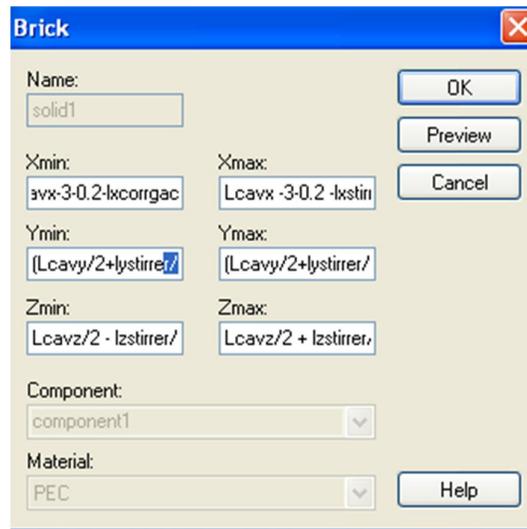


Figura 25 – Medidas corrugación stirrer

Como se puede apreciar en la última figura, seis nuevos parámetros han aparecido: *lxstirrer*, *lystirrer*, *lzzstirrer*, *lxcorgac* y *lycorgac*. Estos parámetros definen lo siguiente:

- *lxstirrer*: longitud del *stirrer* en el eje X.
- *lystirrer*: longitud del *stirrer* en el eje Y.
- *lzzstirrer*: longitud del *stirrer* en el eje Z.
- *lxcorgac* es la longitud de la corrugación en X.
- *lycorgac* es la longitud de la corrugación en Y.

Todos los parámetros descritos anteriormente serán optimizados. No se ha definido un parámetro *lzcorgac* que modificara la corrugación en Z pues la longitud del *stirrer* en Z así como el de su corrugación en Z debe ser siempre el mismo para que el diseño y sus resultados sean correctos.

La estructura que queda, como resultado de haber definido todos los componentes anteriores con un valor por defecto de las variables, sería la que muestra la Figura 26:

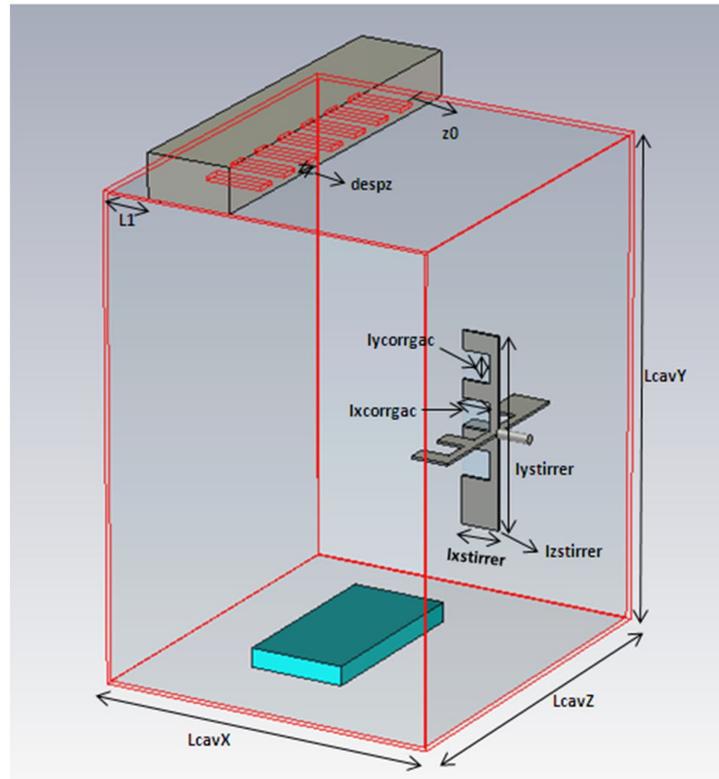


Figura 26 – Cavity rectangular con stirrer

A continuación se muestra en la Tabla I un resumen de todas las variables o parámetros usados en la definición de la cavity de microondas y sus componentes y que van a formar parte de la optimización:

PARÁMETRO	DEFINICIÓN
$Lcavx$	Longitud de la cavity rectangular en el eje X .
$Lcavy$	Longitud de la cavity rectangular en el eje Y .
$Lcavz$	Longitud de la cavity rectangular en el eje Z .
Ll	Define a que distancia sobre el eje X va a estar posicionada la guía sobre la cavity.
$z0$	Define la posición de comienzo de la ranura en el eje Z .
$despz$	Distancia de repetición entre ranuras de la guía.
$lxstirrer$	Longitud del <i>stirrer</i> en el eje X .
$lystirrer$	Longitud del <i>stirrer</i> en el eje Y .
$lzstirrer$	Longitud del <i>stirrer</i> en el eje Z .
$lxcorrnac$	Longitud de la corrugación del <i>stirrer</i> en X
$lycorrnac$	Longitud de la corrugación del <i>stirrer</i> en Y

TABLA 1 – Definición de parámetros

3.3.1 Optimización del proyecto

Con el diseño del prototipo inicial de la cavity ya construido, tras un proceso de estudio y análisis, se plantea la necesidad de darle a ese diseño una configuración óptima, con el objetivo en mente de obtener la eficiencia del proceso de calentamiento. Para ello se debe obtener la combinación de



distancias en la cavidad resonante, las dimensiones de la guía y del *stirrer* que sea óptima. Con esta finalidad se plantea la optimización del aplicador, que se realizará a través de un proceso iterativo con múltiples simulaciones gobernadas por los algoritmos genéticos.

CST Microwave 9 incorpora la herramienta de Optimización de Parámetros *Optimizer* como se dijo anteriormente. Con esta herramienta se establece un rango con un máximo y un mínimo donde el valor de las distintos parámetros va a ir fluctuando, obteniendo resultados diferentes en el parámetro S_{11} y en el campo eléctrico. En la Figura 27 se muestra el menú *Optimizer* con los parámetros de nuestro proyecto a optimizar:

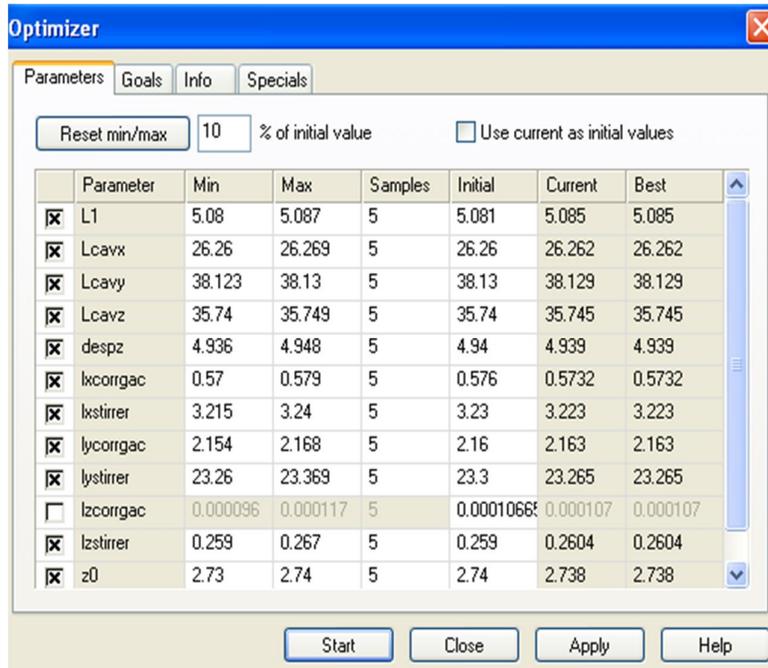


Figura 27– Menú optimización de parámetros

La optimización de parámetro funciona de la siguiente manera:

- 1) A la hora de definir los distintos componentes que componen el proyecto, las dimensiones pueden ser fijas o pueden ser definidas por variables. Si se quiere optimizar una longitud, se define como una variable asignando un nombre a esa longitud.
- 2) Una vez definidas las distintas variables del proyecto, en el menú *Optimizer*, dentro de la pestaña *Parameter*, se seleccionan los parámetros que se quieren optimizar.
- 3) La pestaña *Goal* asigna la meta o finalidad de la optimización tal y como muestra la Figura 28.

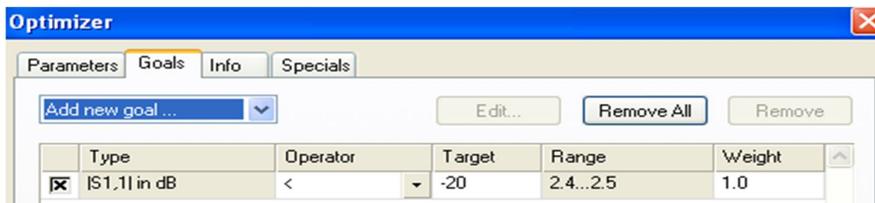


Figura 28 – Menú de metas buscadas en la simulación



En este proyecto, lo que se pretende es que el módulo de S_{11} en un rango de frecuencias de entre 2.4 y 2.5 GHz, se encuentre por debajo de -20dB para una frecuencia de trabajo nominal de 2.45 GHz o al menos por debajo de -10dB.

4) Por último, la pestaña *Specials* permite usar los diferentes tipos de optimización, así como el número de simulaciones que se quieran para la optimización. En este proyecto siempre se usa el algoritmo genético en las simulaciones seleccionándolo como se muestra en la Figura 29.

Se han configurado los algoritmos genéticos para tener un máximo de 30 iteraciones, 621 *solver evaluations* o evaluaciones del problema y una tasa de mutación del 60%. La Figura 29 muestra la opción escogida en este proyecto:

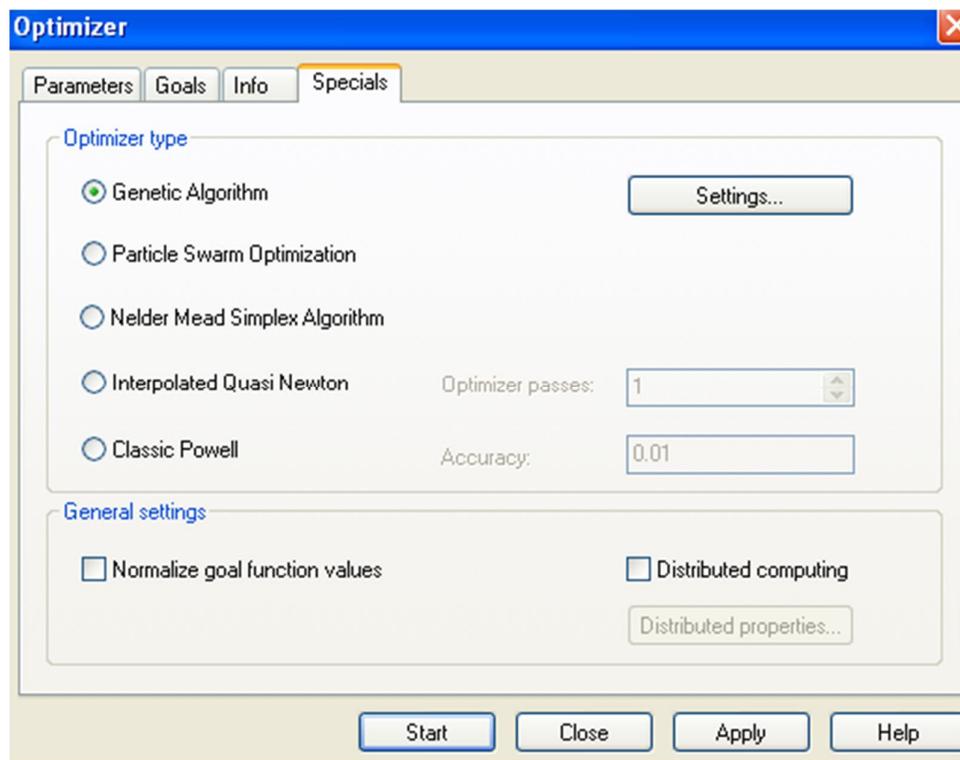


Figura 29– Menú de tipos de optimización

Cabe destacar que la optimización de parámetros utiliza muchos recursos del ordenador y la hace bastante costosa en tiempo. De hecho, con esta configuración, la optimización de la estructura podría llegar a durar una semana en un ordenador *Intel Core Duo* el cual tiene una potencia bastante aceptable.

La solución ha sido llevar a cabo menos evaluaciones del problema y observar los resultados que se van obteniendo. De esta manera observando los resultados en donde se obtiene una mejor optimización se ha ido acotando el rango de máximos y mínimos en el que los parámetros fluctuarán a la hora de optimizar. Los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones pueden verse una vez finalizada la simulación completa, en la pestaña *Results* → *View Logfiles* → *Optimizer Logfile*.



CAPÍTULO 3: HERRAMIENTAS DE TRABAJO CST MICROWAVE STUDIO



En el siguiente capítulo se recogen los resultados obtenidos de todas las variables así como de las dimensiones del diseño una vez realizadas las simulaciones.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este nuevo capítulo se recogen los resultados de las distintas simulaciones realizadas para la optimización de los parámetros de la cavidad, el *stirrer* y la guía de onda. También se recogen los resultados de la optimización de los distintos parámetros descritos en el apartado 3.3.1.

La optimización de los parámetros constructivos del aplicador se ha hecho con el objetivo de encontrar la configuración óptima que consiga un valor del módulo de S_{11} menor de -20 dB o al menos por debajo de los -10 dB en el rango de frecuencias 2.4 a 2.5 GHz. Posteriormente se comprobará la homogeneidad del campo eléctrico al aplicar la rotación del *stirrer*.

En un principio se optimizará la cavidad sin rotar el *stirrer*, estando éste en una posición fija en donde las palas del *stirrer* están en forma de cruz como se ha podido visualizar en el anterior capítulo. Una vez alcanzado este objetivo, se procederá a rotar el *stirrer* en intervalos de 10° hasta completar un movimiento completo de 360°. El objetivo es estudiar si se sigue cumpliendo la optimización de S_{11} cuando promediamos la eficiencia en los diferentes movimientos de rotación del *stirrer*.

Los resultados de campo eléctrico promedio que se muestran en este PFC son los valores obtenidos con la cavidad óptima en torno a la frecuencia nominal de trabajo a 2.45GHz.

Para concluir, se volverán a realizar los pasos citados anteriormente para una cavidad de dimensiones menores para comprobar que la optimización que se obtiene con el procedimiento de este proyecto sigue siendo válida.

En base a las consideraciones anteriores, es importante mencionar que para representar los resultados promedios se han implementado una serie de aplicaciones en MATLAB.

4.2 OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS Y RESULTADOS

Como se ha comentado en el punto anterior, se va a comenzar por optimizar la cavidad para conseguir un módulo del *coeficiente de reflexión* o parámetro S_{11} en el puerto de entrada por debajo



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

de -20 dB o al menos que este valor sea inferior a -10 dB. Para ello se han realizado numerosas simulaciones como se ha explicado en el apartado 3.3.1.

El método que se ha seguido, es hacer optimizaciones con el algoritmo genético con 199 *solver evaluations* o simulaciones del problema y observar en las diferentes simulaciones con que parámetros se han obtenido mejores resultados. Esto se puede ver en la pestaña *Results* → *View Logfiles* → *Optimizer Logfile*. Ahí se puede observar los parámetros que han obtenido mejores resultados e ir acotando esos parámetros en las simulaciones posteriores para obtener una simulación más eficiente y más rápida a la hora de llegar a la mejor optimización.

Como resultado final de las simulaciones, los parámetros han convergido hasta su valor más óptimo. Este resultado se muestra en la Tabla 2:

Parámetro	Valor optimizado
<i>Ll</i>	5.0850223446146
<i>Lcavx</i>	26.261911007794
<i>Lcavy</i>	38.128725923288
<i>Lcavz</i>	35.74475806655
<i>despz</i>	4.9391438232516
<i>z0</i>	2.7376586297918
<i>lxstirrer</i>	3.2230081492124
<i>lystirrer</i>	23.265371511212
<i>lzstirrer</i>	0.26042723917752
<i>lxcorgac</i>	2.1629406258167
<i>lycorgac</i>	2.1629406258167

Tabla 2 – Valores de los parámetros optimizados

A consecuencia d estos nuevos valores, el diseño ha cambiado respecto al original (ver Figura 26) al que se le dio unos valores por defecto antes de empezar a simular. Para ilustrar esto, el nuevo resultado gráfico se muestra en la Figura 30. Con este diseño se obtiene la mejor optimización en cuanto a la eficiencia de la energía de microondas al minimizar S_{11} .



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

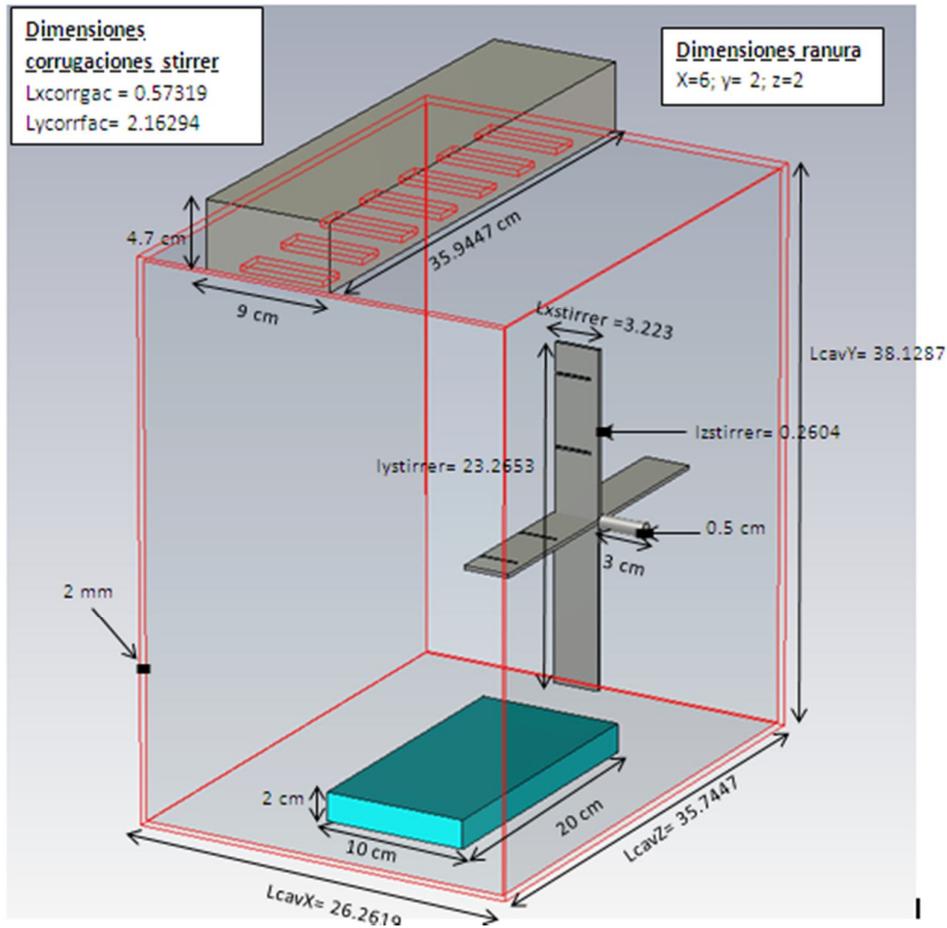


Figura 30- Cavity optimizada final

En la Figura 31 se puede observar la evolución de S_{11} en función de la frecuencia para este diseño optimizado.

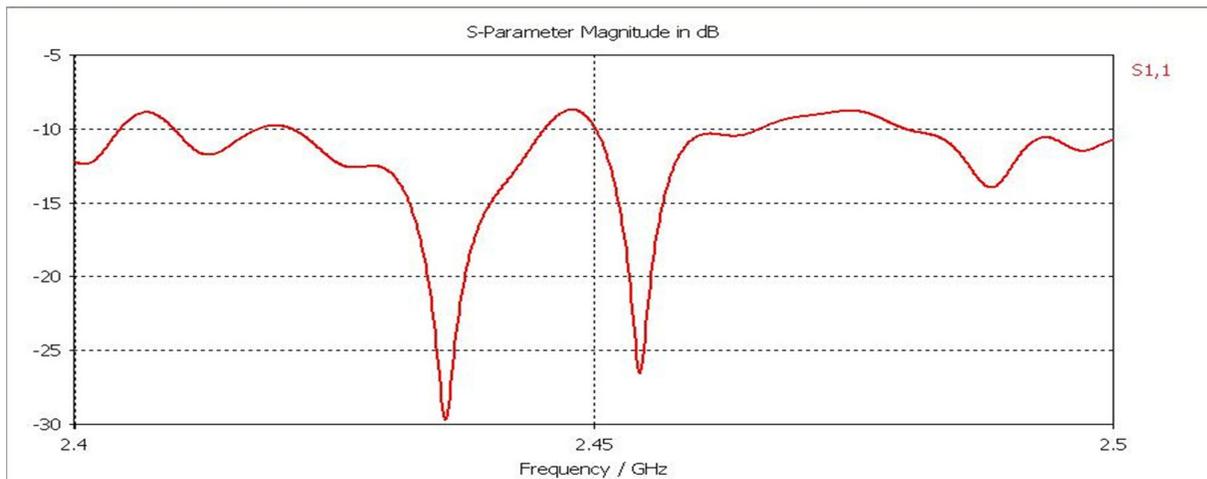


Figura 31- Módulo S_{11}



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



Se puede apreciar en la figura como aproximadamente para el valor de frecuencia 2.46 GHz, muy cerca de donde se sitúa la frecuencia que trabaja el magnetrón, se obtiene un buen resultado para S_{11} de acuerdo con los razonamientos que se han venido realizando. Se observa claramente como el módulo de S_{11} supera con claridad el objetivo deseado de -20 dB. Sin embargo, para el resto del rango de frecuencias, prácticamente el valor de S_{11} no alcanza los -20 dB. No obstante, el módulo se mantiene estable y por debajo de -10 dB prácticamente durante todo el rango de frecuencias.

Posteriormente, cuando se obtenga la gráfica en MATLAB del promediado del módulo S_{11} para las diferentes rotaciones del *stirrer* podremos verificar si el diseño obtenido a partir de los parámetros optimizados es realmente válido.

El siguiente paso, es analizar la homogeneidad obtenida por el campo eléctrico. Cabe decir que la representación del campo eléctrico en la muestra va a ir en base a una escala de colores en función del valor obtenido para el campo eléctrico en un determinado punto del volumen de la muestra. Para ilustrar esto, en la Figura 32 se muestra el orden que sigue esta escala de valores:

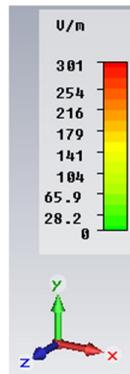


Figura 32 – Escala del campo eléctrico

En relación con esta última gráfica, los tonos indicarán el grado de calentamiento que sufre la muestra en un determinado punto de su volumen de acuerdo con el valor del campo eléctrico. El resultado obtenido para el campo eléctrico por nuestro diseño optimizado es el que se muestra en la Figura 33:

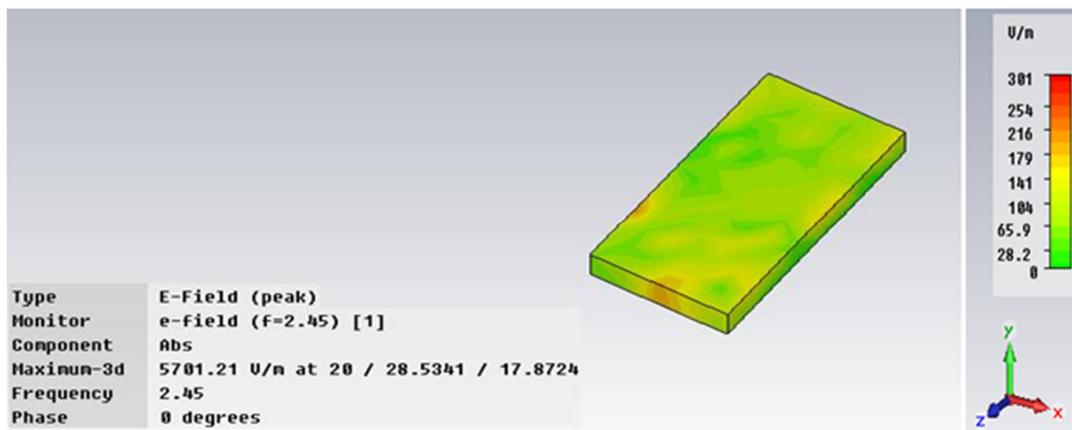


Figura 33– Campo eléctrico en la muestra



Como puede observarse, nuestro diseño optimizado tiende a que haya un mayor calentamiento en las zonas de los bordes de la muestra (campo eléctrico más elevado). La distribución del campo eléctrico es bastante poco uniforme puesto que se observan dos máximos localizados en los bordes de la muestra y varias zonas con campo mínimo.

Por esta razón al igual que para S_{II} , en apartados posteriores se estudiará el promediado del campo eléctrico para las diferentes rotaciones del *stirrer* de manera que se verifique si se consigue una homogeneidad aceptable o si la tendencia de nuestro diseño optimizado es obtener un grado de calentamiento mayor en los bordes que en el resto del volumen de la muestra.

Una vez llegados a este punto, se va a estudiar el efecto que produce el *stirrer* al rotar. En este caso ya no se optimizará la cavidad sino que se usarán los parámetros de la Tabla 2 y se cambiará la posición del agitador de modos o *stirrer*.

4.2.1 Efecto del agitador de modos al rotar

Después de las consideraciones anteriores donde se ha obtenido la optimización de la cavidad con el *stirrer* sin moverlo, el siguiente paso a realizar en este proyecto es rotar el *stirrer* en intervalos de 10° .

En primer lugar se va a realizar un *Transform* \rightarrow *Rotate* eligiendo en el eje X unos “10” en la casilla *Rotation Angle*. Como el *stirrer* no es simétrico, no podemos establecer un plano de simetría para reducir el tiempo de simulación en un factor de 2. Por lo tanto, ha sido necesario rotar 360° (una vuelta completa) para observar el campo eléctrico y la atenuación en todas sus posiciones. Es decir, se han realizado 36 simulaciones.

Con la rotación del *stirrer* se aprecia como variando levemente las condiciones de la cavidad optimizada se obtienen resultados muy diferentes. Para ilustrar lo anterior, en la Tabla 3 se muestran dos configuraciones con diferentes ángulos de rotación con resultados muy distintos entre ellos. Denominaremos en este Proyecto Fin de Carrera al ángulo de giro del agitador de modos como α .



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



α de rotación stirrer	S_{11}	Campo eléctrico
$\alpha=200^\circ$		
$\alpha=340^\circ$		

Tabla 3. Cambios en la adaptación y la distribución de campo eléctrico para diferentes posiciones del agitador de modos

Como se puede ver se han escogido dos ángulos diferentes de inclinación $\alpha=200^\circ$ y $\alpha=340^\circ$. En el primer caso, se obtienen unos valores excelentes en la distribución homogénea del campo eléctrico. En toda su superficie el resultado es prácticamente el mismo y no se observan ningún máximo en los bordes. Por el contrario, en el segundo caso se observa la tendencia que ya se ha advertido anteriormente, en los bordes de la muestra se obtiene generalmente un mayor calentamiento respecto al resto de superficie, con unos máximos bien visibles. En este caso la configuración del *stirrer* para ese ángulo de inclinación no alcanza buenos niveles.

Respecto al módulo de S_{11} , se puede apreciar como también varía ante un cambio en la posición del *stirrer*. En este caso, en ambas configuraciones durante determinados tramos del rango de frecuencias el módulo S_{11} se encuentra claramente por encima de -10 dB. Esto debería significar que para el caso de $\alpha=200^\circ$ la homogeneidad del campo eléctrico no debería ser muy buena. También se puede apreciar como para el caso $\alpha=200^\circ$ el resultado obtenido se mantiene en un mayor número de frecuencias por debajo de los objetivos marcados que en el caso de $\alpha=340^\circ$.



De todo esto se desprende, que no hay una relación exacta para conocer en función de los valores que se obtienen en la gráfica del módulo S_{11} saber si va afectar de mejor o peor manera a la homogeneidad del campo eléctrico.

4.3 REPRESENTACIÓN EN MATLAB DE S_{11} Y EL CAMPO ELÉCTRICO DEL *STIRRER* AL ROTAR

Como se ha comentado en el apartado 4.2, es necesario hacer un promediado de S_{11} y el campo eléctrico para cada una de las posiciones del *stirrer*. De este modo podemos evaluar si el diseño optimizado sigue obteniendo unos resultados óptimos cuando el *stirrer* rota.

Primeramente, ha sido necesario capturar el valor de S_{11} y el campo eléctrico para cada valor de frecuencia. En el caso del campo eléctrico, se ha implementado con CST una Macro como se explica en el apartado 3.2.1. El código implementado de esta macro se encuentra en el Anexo 1 del Capítulo 7 de este proyecto. Por el contrario para S_{11} no ha sido necesario, pues con CST se pueden extraer de manera directa estos datos a un documento de texto.

Una vez que se han obtenido los distintos valores de campo eléctrico y S_{11} para cada una de las posiciones del *stirrer*, el siguiente paso que se ha realizado es representar estos parámetros con la ayuda de MATLAB.

4.4.1 Representación del coeficiente de reflexión o S_{11}

En primer lugar, se va a verificar el coeficiente de transmisión S_{11} . Es necesario disponer de un archivo de texto para cada una de las configuraciones, con todos los valores.

Para representar en MATLAB, se han implementado varias aplicaciones que detallan por tramos de 90° de rotación del *stirrer* cómo se comporta en función de la frecuencia el parámetro S_{11} tanto en decibelios como en lineal. El código de esta aplicación se encuentra en el Anexo 2. En la aplicación de MATLAB se ha hecho uso de la fórmula (2.8) del capítulo 2.1.3.

Por último, se mostrará el resultado medio total de haber rotado el *stirrer* con un incremento en el ángulo de inclinación de 10° .

La representación obtenida al ejecutar la aplicación en MATLAB para el primer tramo del *stirrer* que va de 0° a 80° se muestra a continuación:



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

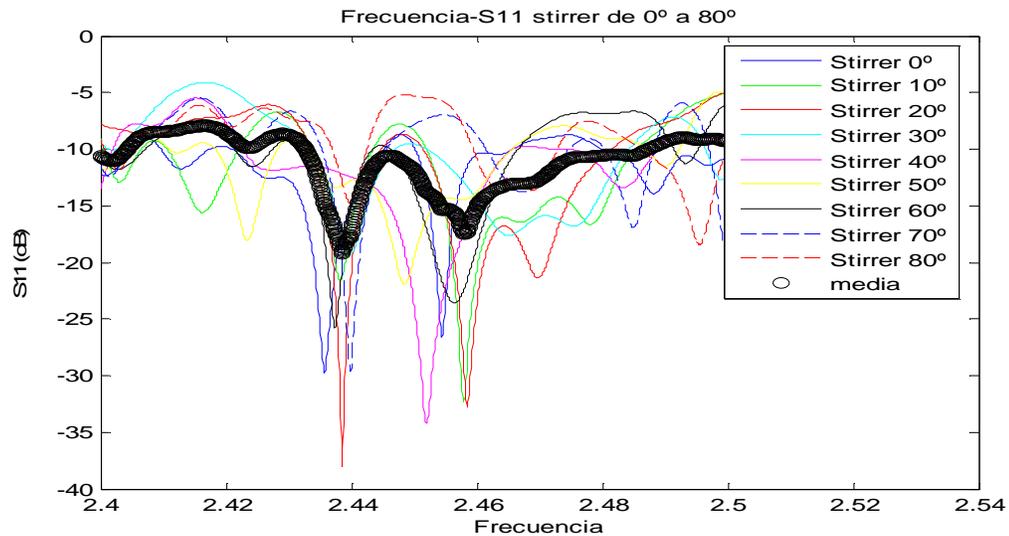


Figura 34- S11 - stirrer de 0° a 80°

El resultado obtenido es bastante bueno pues la gráfica es bastante estable situándose prácticamente alrededor de los -10 dB durante todo el rango de frecuencias, excepto para la frecuencia donde trabaja el magnetrón donde obtiene un módulo de S_{11} que se va acercando al objetivo deseado que son los -20dB.

La representación obtenida al ejecutar la aplicación en MATLAB para el segundo tramo del *stirrer* que va de 90° a 170° se muestra a continuación:

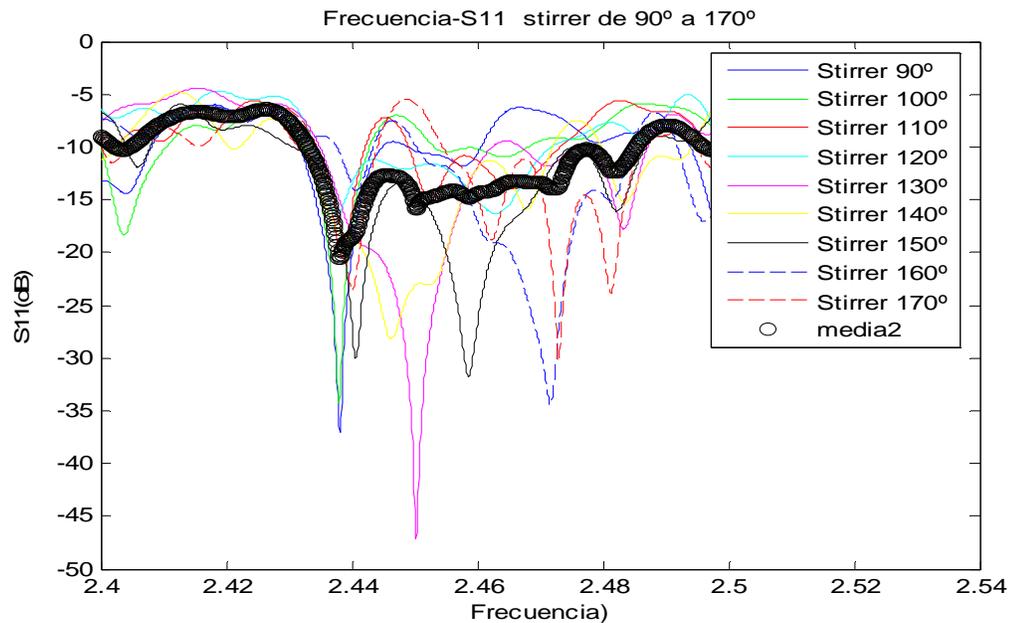


Figura 35- S11 - stirrer de 90° a 170°



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



En el segundo tramo, de 90° a 170° , salvo en las frecuencias iniciales donde se obtiene un módulo por encima de -10 dB, en el resto del rango de frecuencias el resultado se mantiene estable alrededor de los -15 dB.

En cuanto al tercer tramo del *stirrer* que va de 180° a 260° , la Figura 36 muestra el resultado:

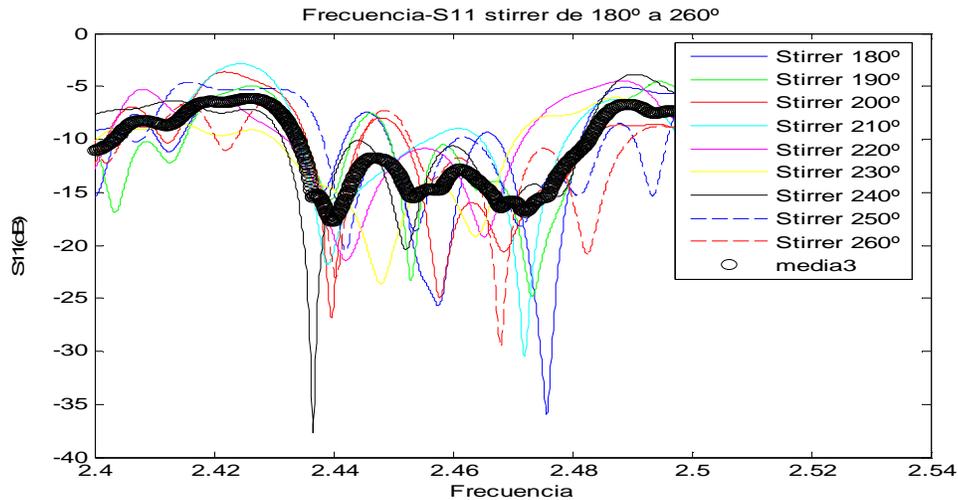


Figura 36– S11- stirrer de 180° a 260°

En el tercer tramo, se logra un resultado más acorde a lo que se anda buscando, pues alrededor de la frecuencia donde trabaja el magnetrón se observa una especie de “valle” formado por unos resultados más óptimos en módulo para el rango de frecuencias donde trabaja el magnetrón.

Y por último, el cuarto tramo del *stirrer* que va de 270° a 350° se muestra en la Figura 37:

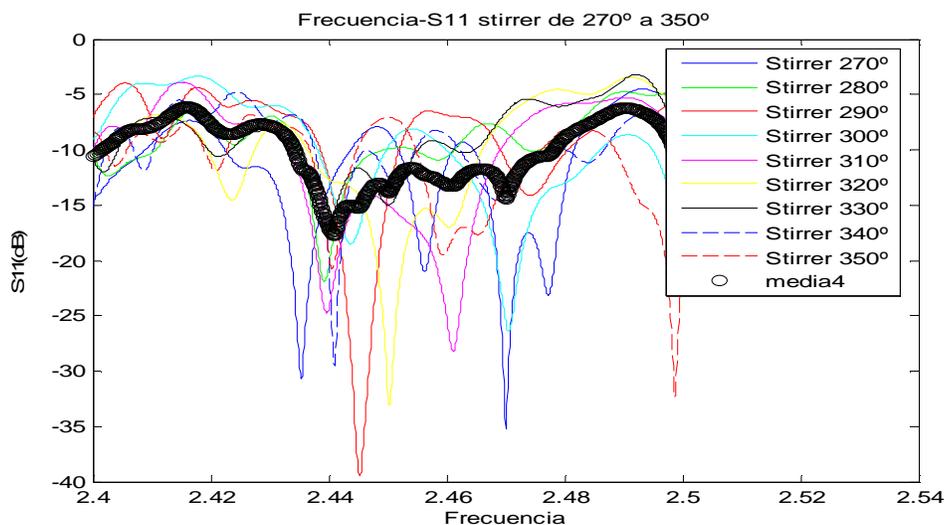


Figura 37– S11- stirrer de 270° a 350°

En éste último tramo, el resultado es muy similar al anterior, obteniendo también unos



resultados bastante buenos pero un poco inferiores al anterior tramo al obtener un módulo mayor.

La aplicación en MATLAB para la representación final, se encuentra en el Anexo 3. En la Figura 38, se muestra el promedio de los anteriores cuatro tramos, y una visión global de los resultados para una vuelta completa del *stirrer*.

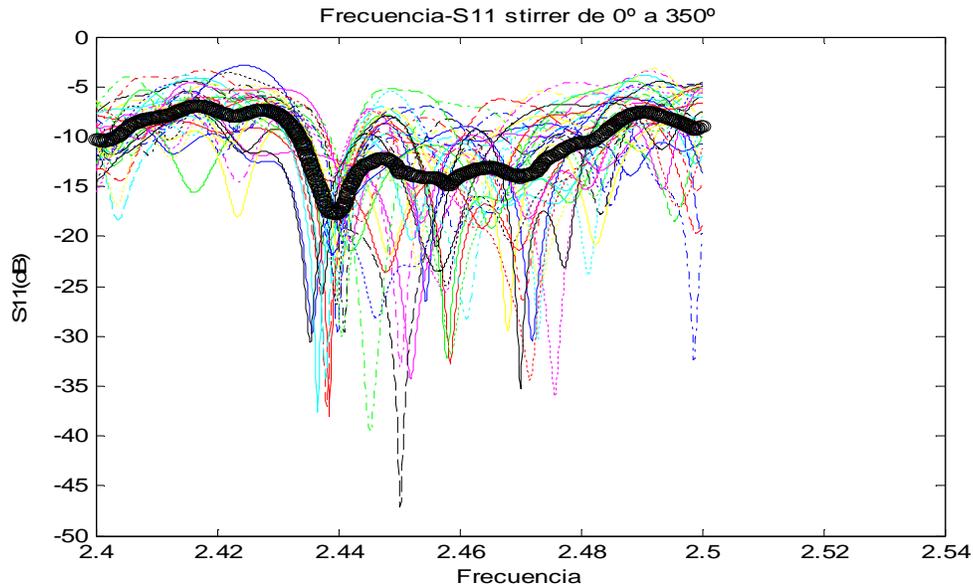


Figura 38– S11- stirrer de 0° a 350°

Como se puede apreciar el resultado global obtenido no es excelente pero si está en los objetivos que se pretendía conseguir en este proyecto.

4.4.2 Representación eficiencia promedio

El siguiente aspecto a evaluar del diseño optimizado de nuestro proyecto se trata de la eficiencia promedio. Se debe asegurar que la eficiencia del horno sea alta para que no se desperdicie la energía reflejándose de vuelta hacia el magnetrón.

Como en el caso anterior se ha procedido a realizar una aplicación. Esta aplicación se encuentra en el Anexo 4. En este caso la aplicación calcula la eficiencia promedio, para ello se ha hecho uso de la fórmula (2.9) del capítulo 2.1.3.

El resultado de ejecutar esta aplicación, se muestra en la Figura 39:

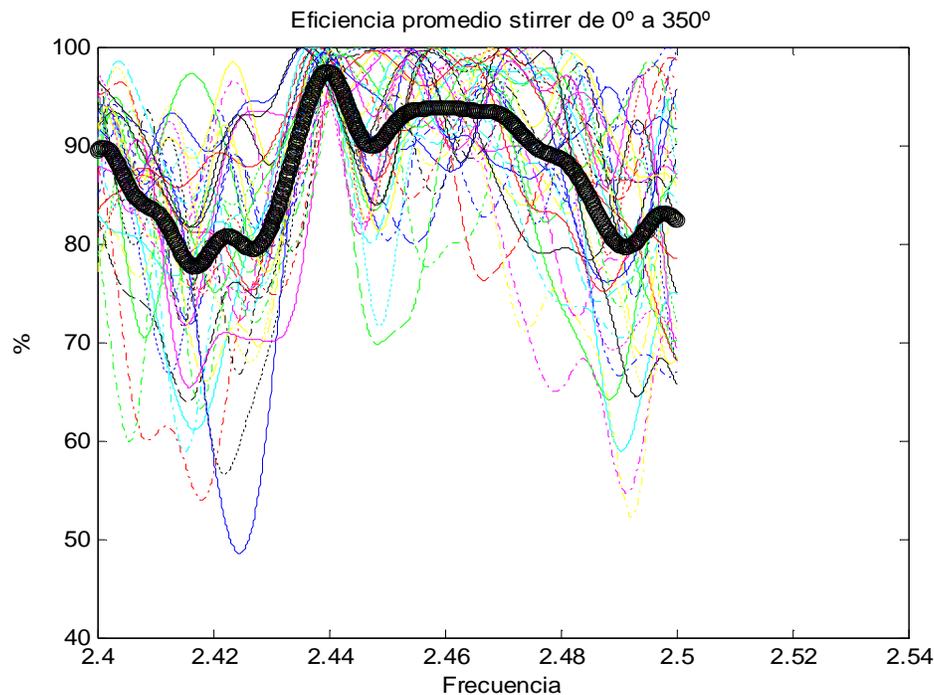


Figura 39– Eficiencia promedio

Se puede apreciar que para las frecuencias cercanas a las que trabaja el magnetrón la eficiencia obtenida es más alta. Implica que las reflexiones y acoplo de las fuentes es bastante óptimo.

4.4.3 Representación campo eléctrico

Por último, queda representar como ha influido el campo eléctrico promedio en la muestra de todas las simulaciones del *stirrer*.

Para ello como se ha comentado en el apartado 4.3 ha sido necesario capturar el campo eléctrico por medio de una macro en CST Microwave. Cuando esta macro se ejecute en CST Microwave nos dará una serie de archivos por cada posición del *stirrer* con los valores del campo eléctrico. El siguiente paso es representar, en base a los valores obtenidos con la macro y guardados en los documentos de texto, el campo eléctrico en la muestra mediante una aplicación con MATLAB. Esta aplicación es más compleja que las vistas anteriores y utiliza unas funciones específicas para mostrar vectores en 3 dimensiones (X , Y y Z).

Para el cálculo del campo eléctrico se ha hecho uso de la fórmula (2.7) del capítulo 2.1.3. La aplicación se encuentra en el Anexo 1.

El resultado de esta aplicación es la representación del campo eléctrico cuyo resultado se muestra a continuación:

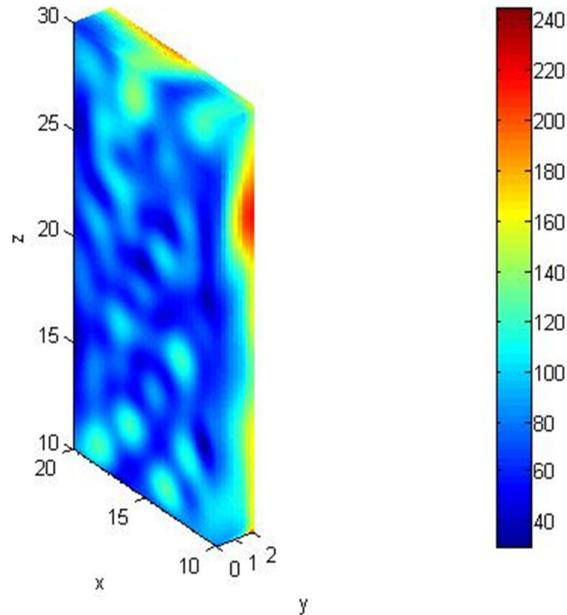


Figura 40– Campo eléctrico

Se puede apreciar que la distribución del campo eléctrica es poco homogénea y que no hay zonas con un calentamiento superior sobre la superficie de la muestra. Excepto en la zona de los bordes que como se indicó en capítulos anteriores es propenso a tener máximos.

4.5 ESTUDIO DE UNA CAVIDAD MENOR

4.5.1 Introducción

Como último punto de este capítulo y del proyecto, queda por comprobar que el procedimiento para el diseño utilizado en el anterior horno es igualmente válido para una cavidad de un tamaño menor. De este modo se han reducido las dimensiones de la anterior cavidad en una proporción aproximada de 2/3.

Para esta nueva cavidad se va a proceder de la misma manera que en la anterior. Se optimizarán las dimensiones tanto de la cavidad, como del *stirrer* y se capturarán los datos de S_{11} y campo eléctrico. Este último nuevamente con la realización de una macro con CST Microwave. Y por último, se hará uso de MATLAB para implementar las aplicaciones con las que se obtengan las representaciones del coeficiente de reflexión, la eficiencia y el campo eléctrico.

Conforme se vayan obteniendo las representaciones, se valorarán los resultados obtenidos comparándolos con los del anterior diseño para verificar si han sido igual de óptimos.



4.5.2 Resultados

Como se ha comentado, la forma de proceder para optimizar es la misma que en el anterior diseño. Se pretende realizar un gran número de simulaciones con el objetivo de lograr un módulo para el parámetro S_{11} por debajo de -20 dB y que la distribución del campo eléctrico sea homogénea.

Como resultado de esta simulación las dimensiones del diseño del horno han sido las siguientes:

Parámetro	Valor optimizado
$L1$	5.0850223446146
$Lcavx$	17.247
$Lcavy$	25.996
$Lcavz$	21.4371
$despz$	2.78585
$z0$	1.6177
$lxstirrer$	1.80851
$lystirrer$	13.8804
$lzstirrer$	0.154352
$lxcorgac$	0.349289
$lycorgac$	1.30677

Tabla 4 – Valores de los parámetros optimizados

Con estas dimensiones el resultado gráfico del diseño del horno se muestra a continuación:



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

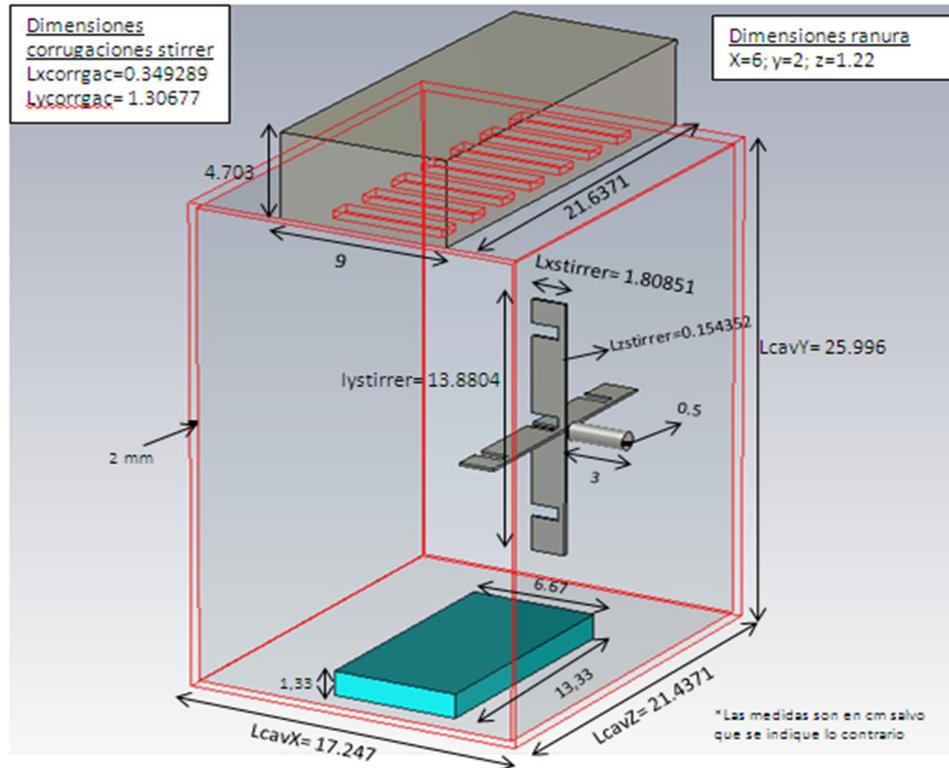


Figura 41 – Dimensiones de las variables optimizadas del filtro final

Debido al tamaño inferior de la cavidad se ha disminuido en dos terceras partes el tamaño de la muestra respecto al tamaño de la muestra del anterior diseño. A diferencia del diseño anterior en este caso, las corrugaciones del *stirrer* son bien apreciables a simple vista cosa que en el caso anterior eran inapreciables.

En cuanto al resultado que se ha obtenido del módulo S_{11} con el nuevo diseño optimizado, en la Figura 42 se muestra su representación:

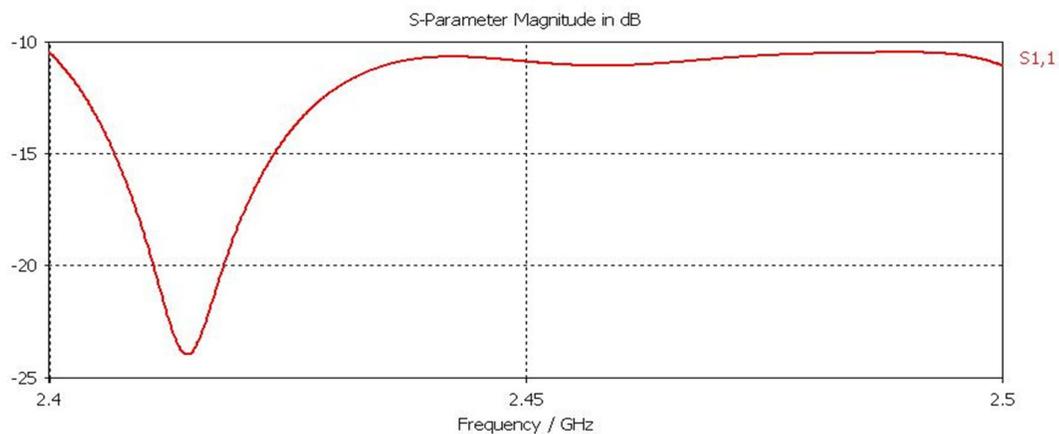


Figura 42 – Módulo S_{11}



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



El mejor valor se obtiene algo desplazado a la izquierda respecto a la frecuencia que trabaja el magnetrón, pero el valor que se obtiene en el resto de frecuencias es bastante estable y siempre por debajo de -10dB por lo que se sigue obteniendo una buena optimización.

Respecto al campo eléctrico, para este primer tramo en donde no se rota el *stirrer* se observa una tendencia parecida al anterior diseño. La tendencia hace que vuelva apreciarse cierto máximo en el borde de la muestra. No obstante en la superficie se obtiene un mayor campo eléctrico respecto al anterior diseño que era más bajo.

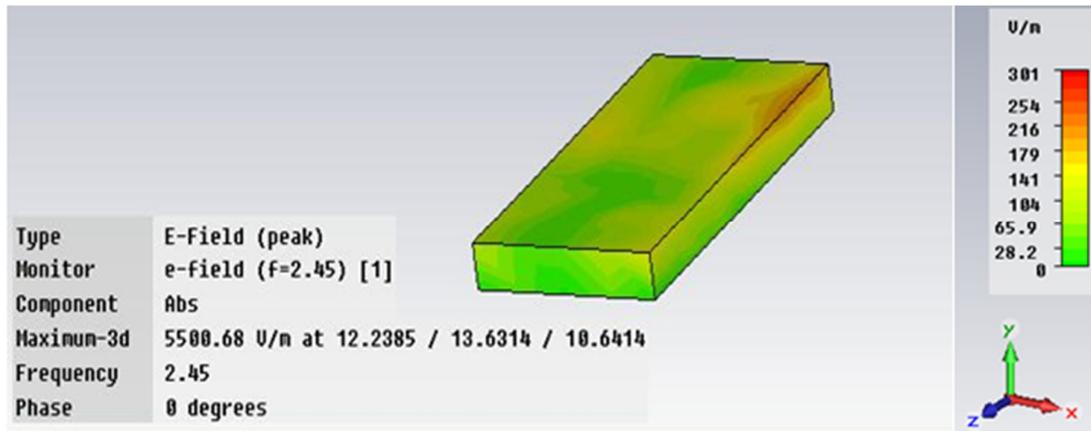


Figura 43 – Campo eléctrico en la muestra

Una vez visto el primer punto, como en el punto 4.2, una vez optimizado este diseño se procede a comprobar el campo eléctrico y el módulo S_{II} rotando el *stirrer* en intervalos de 10° hasta completar una vuelta completa, lo cual hace 36 simulaciones.

Por ahora, se ha demostrado que se puede obtener con este procedimiento un diseño de menores dimensiones que a priori va a dar también unos resultados dentro de los objetivos marcados como en el anterior diseño. Para ratificarlo se va a proceder a representar los datos obtenidos con MATLAB.

Para ello se procede de la misma manera que en el diseño anterior, se va a realizar una macro con CST para capturar el campo eléctrico en multitud de posiciones de la muestra. Va a ser el mismo código con una única variación. La muestra como se ha comentado anteriormente se ha debido reducir para adaptarse al nuevo diseño más pequeño y esto ha de ser tenido en cuenta a la hora de establecer los valores de las variables y desde que posición se debe de empezar a capturar el campo eléctrico en la muestra.

Para el caso del módulo S_{II} se ha hecho uso de la herramienta de CST para copiar los datos y pegarlas en un documento de texto tanto en decibelios como en lineal, como se explicó en el apartado 4.3.

Una vez que se tienen los datos de S_{II} y el campo eléctrico en documentos de texto para cada una de las simulaciones, se crean las aplicaciones de MATLAB para poder representarlos. Al igual que con la macro, el código para representar el módulo de S_{II} y la



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



eficiencia es el mismo que en el anterior diseño ya que lo único que varía son los datos de donde se van a extraer los datos que se van a representar.

La representación del diseño optimizado se muestra en la Figura 44:

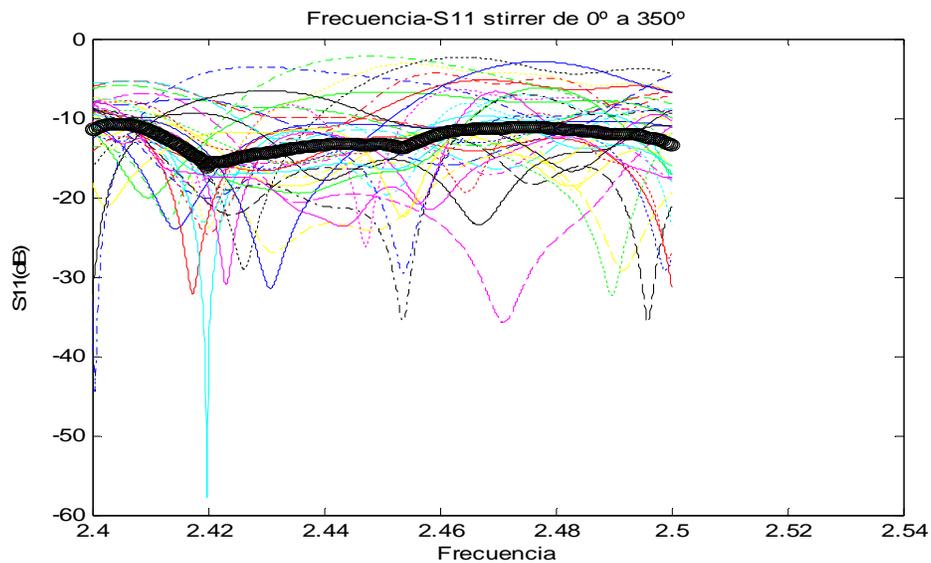


Figura 44 – Representación MATLAB S_{11}

El resultado es muy estable a lo largo del rango de frecuencias y se encuentra siempre por debajo de los -10dB. El resultado es mejor que en el caso anterior tanto por la estabilidad como por el valor del módulo que se obtiene.

Para el caso de la eficiencia, la Figura 45 muestra la representación:

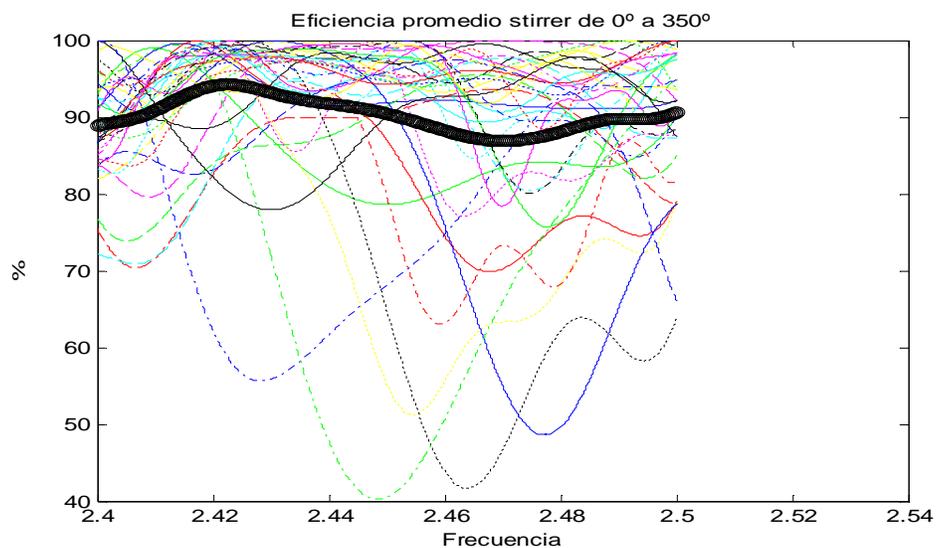


Figura 45 – Representación MATLAB S_{11}



CAPÍTULO 4: RESULTADOS



En la eficiencia se obtiene un resultado al igual que en S_{II} bastante estable, pero en determinadas frecuencias la eficiencia del anterior diseño es mayor sobre todo en las cercanas a la frecuencia de trabajo del magnetrón.

Para concluir, se procede a representar el campo eléctrico con MATLAB con la misma aplicación que en el diseño anterior con la única modificación de la posición de la muestra debido a su tamaño que es distinta al caso anterior.

El resultado se muestra en la Figura 46:

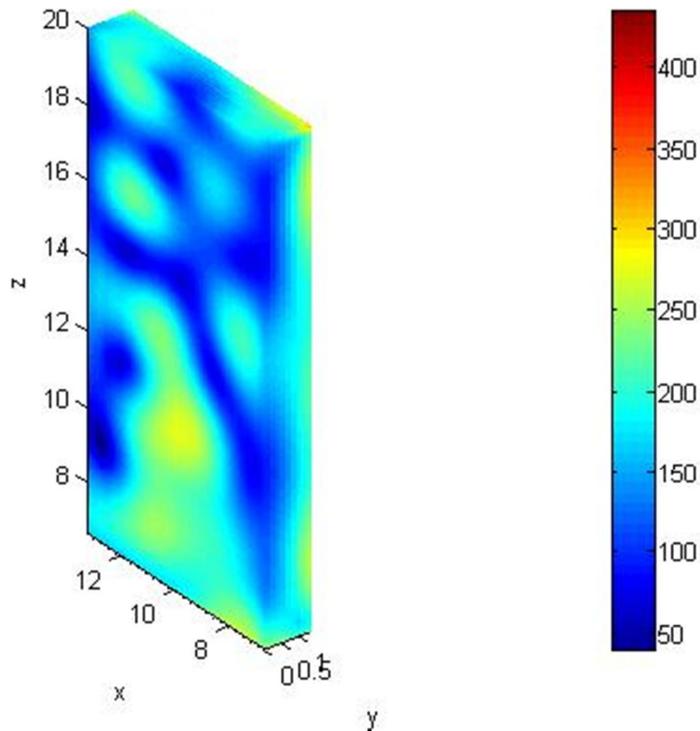


Figura 46 – Representación MATLAB S_{II}

En este caso, el calentamiento en la superficie no es tan homogéneo como en el caso anterior y se sigue apreciando la tendencia a que el campo eléctrico sea mayor en la zona de los bordes obteniéndose un mayor número de máximos. También hay un máximo sobre la superficie con un valor del campo eléctrico mayor al resto de la superficie.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

El objetivo fundamental de este proyecto era el estudio de un nuevo procedimiento para la optimización de un horno de microondas. Para ello se ha incorporado a la cavidad rectangular un agitador de modos o *stirrer*.

La optimización lograda en nuestro primer diseño ha sido aceptable. Buscábamos para el parámetro S_{11} unos niveles por debajo de -20dB, valor que en determinados rangos de frecuencia se ha superado. Sin embargo en otros no se ha logrado, consiguiendo valores muy cercanos pero lo importante es que donde sí se han conseguido es en el rango de frecuencias donde trabaja el magnetrón. De este modo se han conseguido unos niveles de eficiencia muy buenos haciendo que el diseño del horno apenas desperdicie energía. Esta optimización para S_{11} también se ha logrado en la segunda cavidad de dimensiones más reducidas verificando que este procedimiento es igualmente válido para cavidades de menor tamaño. En este caso el resultado ha sido más estable a lo largo del rango de frecuencias y los mejores resultados no se han obtenido en la frecuencia donde trabaja el magnetrón pero son igualmente buenos y válidos.

En cuanto al calentamiento sobre la superficie de la muestra o material, los resultados han sido satisfactorios también. En el primer diseño, el campo eléctrico presenta una ligera tendencia a ser más elevado en los bordes de la muestra aunque no tan elevado como para echar por tierra la optimización ya que el resto de la superficie presenta una mayor homogeneidad. En el caso de la cavidad más pequeña también presenta la tendencia a que el campo eléctrico sea más elevado en los bordes y se ha conseguido sobre la superficie una menor homogeneidad y un calentamiento mayor respecto al primer diseño. A pesar de esto el resultado también es satisfactorio.

Como líneas futuras, viendo el resultado obtenido en el primer diseño donde el tamaño de la corrugación del *stirrer* es bastante reducido, se podría estudiar la utilización de un *stirrer* sin corrugaciones para comprobar si se obtienen mejores resultados que con ellas. También se podría estudiar la asimetría de las corrugaciones para mejorar la optimización. Dado que en este proyecto se han usado 3 corrugaciones, dotarlas a cada una de variables propias para obtener corrugaciones de diferentes dimensiones. Incluso se podría diseñar un modelo de *stirrer* con un menor o mayor número de corrugaciones. Dejando a un lado las corrugaciones, otra línea futura sería hacer este mismo estudio para diferentes tipos de materiales en la muestra para observar en cuáles de ellos se obtienen mejores resultados.



CAPÍTULO 6: BIBLIOGRAFÍA

- Wikipedia – <http://www.wikipedia.es>
- Díaz Morcillo y J. Monzó Cabrera, “*Líneas de Transmisión, Guías de Onda y Cavidades Resonantes*”, UPCT, 2007.
- Juan Sebastián Solano Cavas, “*Diseño de Filtros Multimodo basados en Cavidades dentro de Guías de Ondas*”, Proyecto Fin de Carrera ETSIT, UPCT Junio 2011.
- Odlanier Medina Viera, “*Estudio y aplicación del CST Microwave Studio 5 como herramienta de simulación de antenas*”, Instituto Superior Politécnico.
- Francisco J. Clemente-Fernández, “*Analysis of Reactive and Resistive Open Waveguide Filters for Use in Microwave-Heating Applicators* “.UPCT.
- Maria Teresa Iglesias Otero “*Algoritmos Genéticos*”.



CAPÍTULO 7: ANEXO

ANEXO 1– MACRO CST Campo Eléctrico

' ultima2

Sub Main ()

Dim VXRE As Double
Dim VYRE As Double
Dim VZRE As Double

Dim VXIM As Double
Dim VYIM As Double
Dim VZIM As Double
Dim modulo_VX As Double
Dim modulo_VY As Double
Dim modulo_VZ As Double
Dim Eabs As Double

'Dimensiones del lado del horno

Xh=Lcavx
Yh=Lcavy
Zh=Lcavz

'Dimensiones muestra

Xm=10
Ym=2
Zm=20

'Numero de posiciones de los agitadores de modos

NumPos=36

'Numero de puntos para coger el campo

lx=140
ly=3
lz=140
'@ define units

.....
....."SIMULACIÓN".....
.....
.....
.....

pasox=Xm/lx
pasoy=Ym/ly



pasoz=Zm/lz

'Vamos moviendo el agitador de modos y obteniendo el campo en la muestra para cada posición del agitador de modos

```
For contador=1 To NumPos STEP 1
DeleteResults
```

```
With Transform
.Reset
.Name "component1:stirrer1"
.Origin "CommonCenter"
.Center "0", "0", "0"
.Angle "10", "0", "0"
.MultipleObjects "False"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.RotateAdvanced
End With
```

```
With Transform
.Reset
.Name "component1:stirrer1_1"
.Origin "CommonCenter"
.Center "0", "0", "0"
.Angle "10", "0", "0"
.MultipleObjects "False"
.GroupObjects "False"
.Repetitions "1"
.MultipleSelection "False"
.RotateAdvanced
End With
```

'Se crea un fichero para ir imprimiendo esos valores en un documento de texto. *Open* y *close* se hace para borrar los datos de la simulación anterior.

```
aux=contador 'Subíndice del fichero
id= CStr(aux)
```

```
NombreCompleto=id & "CampoF1.txt"
NombreCompleto2=id & "CampoF2.txt"
Open NombreCompleto For Output As #4
Close #4
Open NombreCompleto2 For Output As #5
Close #5
```

```
Solver.Start
```

'Imprimimos los resultados de la simulación en los ficheros para la muestra

```
Open NombreCompleto For Append As #4
For contz= 0 To lz STEP 1
Zfield= 10 + pasoz*contz
```



```
For conty= 0 To ly STEP 1  
Yfield= 0 + pasoy*conty
```

```
For contx= 0 To lx STEP 1  
Xfield=10+ pasox*contx
```

```
SelectTreeltem "2D/3D Results\E-Field\e-field (f=2.45) [1]\Abs"  
GetFieldVector(Xfield,Yfield,Zfield,VXRE,VYRE,VZRE,VXIM,VYIM,VZIM)
```

'Al metodo GetFieldVector hay que pasarle coordenadas globales

```
modulo_VX=Sqr((VXRE*VXRE)+(VXIM*VXIM))  
modulo_VY=Sqr((VYRE*VYRE)+(VYIM*VYIM))  
modulo_VZ=Sqr((VZRE*VZRE)+(VZIM*VZIM))  
Eabs=Sqr((modulo_VX*modulo_VX)+(modulo_VY*modulo_VY)+(modulo_VZ*modulo_VZ))
```

```
Print #4, Eabs  
Next contx  
Next conty  
Next contz  
Close #4  
Next contador  
End Sub
```

ANEXO 2 – Aplicación en MATLAB para representar el módulo S_{11} por tramos

Stirrer de 0° a 80°

```
f=lineal(:,1);
```

```
plot(f(1:1001),valor(1:1001)), hold on  
plot(f(1002:2002),valor(1002:2002),'g')  
plot(f(2003:3003),valor(2003:3003),'r')  
plot(f(3004:4004),valor(3004:4004),'c')  
plot(f(4005:5005),valor(4005:5005),'m')  
plot(f(5006:6006),valor(5006:6006),'y')  
plot(f(6007:7007),valor(6007:7007),'k')  
plot(f(7008:8008),valor(7008:8008),'b--')  
plot(f(8009:9009),valor(8009:9009),'r--')  
title('Frecuencia-S11 stirrer de 0° a 80°')  
xlabel('Frecuencia')  
ylabel('S11 (dB)')
```

%Representación gráfica

```
media=(valor(1:1001)+valor(1002:2002)+valor(2003:3003)+valor(3004:4004)+valor(4005:5005)+valor(5006:6006)+valor(6007:7007)+valor(7008:8008)+valor(8009:9009))/9;
```

```
plot(f(1:1001),media,'ko'),hold on  
legend('Stirrer 0°','Stirrer 10°','Stirrer 20°','Stirrer 30°','Stirrer 40°','Stirrer 50°','Stirrer 60°','Stirrer 70°','Stirrer 80°',  
'media')
```



Stirrer de 90° a 170°

```
f=lineal(:,1);
```

```
plot(f(9010:10010),valor(9010:10010)), hold on
plot(f(10011:11011),valor(10011:11011),'g')
plot(f(11012:12012),valor(11012:12012),'r')
plot(f(12013:13013),valor(12013:13013),'c')
plot(f(13014:14014),valor(13014:14014),'m')
plot(f(14015:15015),valor(14015:15015),'y')
plot(f(15016:16016),valor(15016:16016),'k')
plot(f(16017:17017),valor(16017:17017),'b--')
plot(f(17018:18018),valor(17018:18018),'r--')
title('Frecuencia-S11 stirrer de 90° a 170°')
xlabel('Frecuencia')
ylabel('S11(dB)')
```

```
media2=(valor(9010:10010)+valor(10011:11011)+valor(11012:12012)+valor(12013:13013)+valor(13014:14014)+valor(
14015:15015)+valor(15016:16016)+valor(16017:17017)+valor(17018:18018))/9;
plot(f(1:1001),media2,'ko'),hold on
legend('Stirrer 90°', 'Stirrer 100°', 'Stirrer 110°', 'Stirrer 120°', 'Stirrer 130°', 'Stirrer 140°', 'Stirrer 150°', 'Stirrer
160°', 'Stirrer 170°', 'media2')
```

Stirrer de 170° a 260°

```
f=lineal(:,1);
```

```
plot(f(18019:19019),valor(18019:19019)), hold on
plot(f(19020:20020),valor(19020:20020),'g')
plot(f(20021:21021),valor(20021:21021),'r')
plot(f(21022:22022),valor(21022:22022),'c')
plot(f(22023:23023),valor(22023:23023),'m')
plot(f(23024:24024),valor(23024:24024),'y')
plot(f(24025:25025),valor(24025:25025),'k')
plot(f(25026:26026),valor(25026:26026),'b--')
plot(f(26027:27027),valor(26027:27027),'r--')
title('Frecuencia-S11 stirrer de 180° a 260°')
xlabel('Frecuencia')
ylabel('S11(dB)')
```

```
media3=(valor(18019:19019)+valor(19020:20020)+valor(20021:21021)+valor(21022:22022)+valor(22023:23023)+valor(
23024:24024)+valor(24025:25025)+valor(25026:26026)+valor(26027:27027))/9;
plot(f(1:1001),media3,'ko'),hold on
legend('Stirrer 180°', 'Stirrer 190°', 'Stirrer 200°', 'Stirrer 210°', 'Stirrer 220°', 'Stirrer 230°', 'Stirrer 240°', 'Stirrer
250°', 'Stirrer 260°', 'media3')
```

**Stirrer de 260° a 350°**

```
f=lineal(:,1);
```

```
plot(f(27028:28028),valor(27028:28028)), hold on
plot(f(28029:29029),valor(28029:29029),'g')
plot(f(29030:30030),valor(29030:30030),'r')
plot(f(30031:31031),valor(30031:31031),'c')
plot(f(31032:32032),valor(31032:32032),'m')
plot(f(32033:33033),valor(32033:33033),'y')
plot(f(33034:34034),valor(33034:34034),'k')
plot(f(34035:35035),valor(34035:35035),'b--')
plot(f(35036:36036),valor(35036:36036),'r--')
title('Frecuencia-S11 stirrer de 270° a 350°')
xlabel('Frecuencia')
ylabel('S11(dB)')
```

```
media4=(valor(27028:28028)+valor(28029:29029)+valor(29030:30030)+valor(30031:31031)+valor(31032:32032)+valor(32033:33033)+valor(33034:34034)+valor(34035:35035)+valor(35036:36036))/9;
plot(f(1:1001),media4,'ko'),hold on
legend('Stirrer 270°', 'Stirrer 280°','Stirrer 290°','Stirrer 300°','Stirrer 310°','Stirrer 320°','Stirrer 330°','Stirrer 340°','Stirrer 350°', 'media4')
```

ANEXO 3 – Aplicación MATLAB para representar el módulo del coeficiente de reflexión o S_{11}

```
f=lineal(:,1);
```

```
plot(f(1:1001),valor(1:1001)), hold on
plot(f(1002:2002),valor(1002:2002),'g')
plot(f(2003:3003),valor(2003:3003),'r')
plot(f(3004:4004),valor(3004:4004),'c')
plot(f(4005:5005),valor(4005:5005),'m')
plot(f(5006:6006),valor(5006:6006),'y')
plot(f(6007:7007),valor(6007:7007),'k')
plot(f(7008:8008),valor(7008:8008),'b--')
plot(f(8009:9009),valor(8009:9009),'g--')
plot(f(9010:10010),valor(9010:10010),'r--')
plot(f(10011:11011),valor(10011:11011),'c--')
plot(f(11012:12012),valor(11012:12012),'m--')
plot(f(12013:13013),valor(12013:13013),'y--')
plot(f(13014:14014),valor(13014:14014),'k--')
plot(f(14015:15015),valor(14015:15015),'b:')
plot(f(15016:16016),valor(15016:16016),'g:')
plot(f(16017:17017),valor(16017:17017),'r:')
plot(f(17018:18018),valor(17018:18018),'c:')
plot(f(18019:19019),valor(18019:19019),'m:')
plot(f(19020:20020),valor(19020:20020),'y:')
plot(f(20021:21021),valor(20021:21021),'k:')
plot(f(21022:22022),valor(21022:22022),'b-')
plot(f(22023:23023),valor(22023:23023),'g-')
plot(f(23024:24024),valor(23024:24024),'r-')
plot(f(24025:25025),valor(24025:25025),'c-')
plot(f(25026:26026),valor(25026:26026),'m-')
plot(f(26027:27027),valor(26027:27027),'y-')
```



```
plot(f(27028:28028),valor(27028:28028),'k-')
plot(f(28029:29029),valor(28029:29029),'b-.')
plot(f(29030:30030),valor(29030:30030),'g-')
plot(f(30031:31031),valor(30031:31031),'r-')
plot(f(31032:32032),valor(31032:32032),'c-')
plot(f(32033:33033),valor(32033:33033),'m-')
plot(f(33034:34034),valor(33034:34034),'y-')
plot(f(34035:35035),valor(34035:35035),'k-')
plot(f(35036:36036),valor(35036:36036),'b-.')
title('Frecuencia-S11 stirrer de 0° a 350°')
xlabel('Frecuencia')
ylabel('S11(dB)')
```

%Representación gráfica

```
media=(valor(1:1001)+valor(1002:2002)+valor(2003:3003)+valor(3004:4004)+valor(4005:5005)+valor(5006:6006)+valor(6007:7007)+valor(7008:8008)+valor(8009:9009)+valor(9010:10010)+valor(10011:11011)+valor(11012:12012)+valor(12013:13013)+valor(13014:14014)+valor(14015:15015)+valor(15016:16016)+valor(16017:17017)+valor(17018:18018)+valor(18019:19019)+valor(19020:20020)+valor(20021:21021)+valor(21022:22022)+valor(22023:23023)+valor(23024:24024)+valor(24025:25025)+valor(25026:26026)+valor(26027:27027)+valor(27028:28028)+valor(28029:29029)+valor(29030:30030)+valor(30031:31031)+valor(31032:32032)+valor(32033:33033)+valor(33034:34034)+valor(34035:35035)+valor(35036:36036))/36;
```

```
plot(f(1:1001),media,'ko'),hold on
%legend('Stirrer 0°','Stirrer 10°','Stirrer 20°','Stirrer 30°','Stirrer 40°','Stirrer 50°','Stirrer 60°','Stirrer 70°','Stirrer 80°','Stirrer 90°','Stirrer 100°','Stirrer 110°','Stirrer 120°','Stirrer 130°','Stirrer 140°','Stirrer 150°','Stirrer 160°','Stirrer 170°','Stirrer 180°','Stirrer 190°','Stirrer 200°','Stirrer 210°','Stirrer 220°','Stirrer 230°','Stirrer 240°','Stirrer 250°','Stirrer 260°','Stirrer 270°','Stirrer 280°','Stirrer 290°','Stirrer 300°','Stirrer 310°','Stirrer 320°','Stirrer 330°','Stirrer 340°','Stirrer 350°','media')
```

ANEXO 4 – Aplicación MATLAB para representar la eficiencia

Operación de cálculo de la eficiencia promedio

```
f=lineal(:,1)
valor=lineal(:,2)

for j=1:1:36036
    valor(j)=(1-(valor(j)^2))*100
end
```

Representación de la eficiencia promedio

```
f=lineal(:,1);

plot(f(1:1001),valor(1:1001)), hold on
plot(f(1002:2002),valor(1002:2002),'g')
plot(f(2003:3003),valor(2003:3003),'r')
plot(f(3004:4004),valor(3004:4004),'c')
plot(f(4005:5005),valor(4005:5005),'m')
plot(f(5006:6006),valor(5006:6006),'y')
plot(f(6007:7007),valor(6007:7007),'k')
plot(f(7008:8008),valor(7008:8008),'b--')
```



```
plot(f(8009:9009),valor(8009:9009),'g--')
plot(f(9010:10010),valor(9010:10010),'r--')
plot(f(10011:11011),valor(10011:11011),'c--')
plot(f(11012:12012),valor(11012:12012),'m--')
plot(f(12013:13013),valor(12013:13013),'y--')
plot(f(13014:14014),valor(13014:14014),'k--')
plot(f(14015:15015),valor(14015:15015),'b:')
plot(f(15016:16016),valor(15016:16016),'g:')
plot(f(16017:17017),valor(16017:17017),'r:')
plot(f(17018:18018),valor(17018:18018),'c:')
plot(f(18019:19019),valor(18019:19019),'m:')
plot(f(19020:20020),valor(19020:20020),'y:')
plot(f(20021:21021),valor(20021:21021),'k:')
plot(f(21022:22022),valor(21022:22022),'b-')
plot(f(22023:23023),valor(22023:23023),'g-')
plot(f(23024:24024),valor(23024:24024),'r-')
plot(f(24025:25025),valor(24025:25025),'c-')
plot(f(25026:26026),valor(25026:26026),'m-')
plot(f(26027:27027),valor(26027:27027),'y-')
plot(f(27028:28028),valor(27028:28028),'k-')
plot(f(28029:29029),valor(28029:29029),'b-')
plot(f(29030:30030),valor(29030:30030),'g-')
plot(f(30031:31031),valor(30031:31031),'r-')
plot(f(31032:32032),valor(31032:32032),'c-')
plot(f(32033:33033),valor(32033:33033),'m-')
plot(f(33034:34034),valor(33034:34034),'y-')
plot(f(34035:35035),valor(34035:35035),'k-')
plot(f(35036:36036),valor(35036:36036),'b-')
title('Eficiencia promedio stirrer de 0° a 350°')
xlabel('Frecuencia')
ylabel('%')
```

%Representación gráfica

```
media=(valor(1:1001)+valor(1002:2002)+valor(2003:3003)+valor(3004:4004)+valor(4005:5005)+valor(5006:6006)+valor(6007:7007)+valor(7008:8008)+valor(8009:9009)+valor(9010:10010)+valor(10011:11011)+valor(11012:12012)+valor(12013:13013)+valor(13014:14014)+valor(14015:15015)+valor(15016:16016)+valor(16017:17017)+valor(17018:18018)+valor(18019:19019)+valor(19020:20020)+valor(20021:21021)+valor(21022:22022)+valor(22023:23023)+valor(23024:24024)+valor(24025:25025)+valor(25026:26026)+valor(26027:27027)+valor(27028:28028)+valor(28029:29029)+valor(29030:30030)+valor(30031:31031)+valor(31032:32032)+valor(32033:33033)+valor(33034:34034)+valor(34035:35035)+valor(35036:36036))/36;
```

```
plot(f(1:1001),media,'ko'),hold on
```

```
%legend('Stirrer 0°','Stirrer 10°','Stirrer 20°','Stirrer 30°','Stirrer 40°','Stirrer 50°','Stirrer 60°','Stirrer 70°','Stirrer 80°','Stirrer 90°','Stirrer 100°','Stirrer 110°','Stirrer 120°','Stirrer 130°','Stirrer 140°','Stirrer 150°','Stirrer 160°','Stirrer 170°','Stirrer 180°','Stirrer 190°','Stirrer 200°','Stirrer 210°','Stirrer 220°','Stirrer 230°','Stirrer 240°','Stirrer 250°','Stirrer 260°','Stirrer 270°','Stirrer 280°','Stirrer 290°','Stirrer 300°','Stirrer 310°','Stirrer 320°','Stirrer 330°','Stirrer 340°','Stirrer 350°','media')
```