

# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN  
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN  
Y LAS COMUNICACIONES**



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

**INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN**

**Estudio experimental para la  
optimización energética y  
termográfica en aplicaciones de  
calentamiento por microondas**

**TITULACIÓN:** Ingeniero de Telecomunicación  
**DIRECTOR:** Juan Luis Pedreño Molina  
**AUTOR:** Alejandro Ataúlfo Almansa Morales

**CURSO ACADÉMICO  
2006/2007**



<b>Autor</b>	Alejandro Ataúlfo Almansa Morales
<b>E-mail del Autor</b>	alealmansa@coit.es
<b>Director(es)</b>	Juan Luis Pedreño Molina
<b>E-mail del Director</b>	Juan.PMolina@upct.es
<b>Codirector(es)</b>	
<b>Título del PFC</b>	Estudio experimental para la optimización energética y termográfica en aplicaciones de calentamiento por microondas.
<b>Descriptores</b>	Microondas, calentamiento, termográfico.
<p><b>Resúmen</b></p> <p>Este proyecto presenta un procedimiento de ‘auto-calibración’ que permite a cualquier horno de microondas, tanto doméstico como industrial, trabajar en condiciones óptimas de eficiencia energética, sin que dependa de las características dieléctricas, ni de la forma o las dimensiones del material que se desea calentar. Éste método se basa en una simple calibración en línea y un proceso de medida con baja potencia, y un posterior dispositivo mecánico que sitúa la muestra en la posición de máxima eficiencia y, después de esto, radiar, con suficiente energía de microondas, para que la muestra se caliente. Este método podría ser aplicado de forma inmediata en hornos existentes, puesto que no añade elementos externos caros, aparte de un eje y una plataforma de transporte de reducido coste.</p>	
<b>Titulación</b>	Ingeniero de Telecomunicación
<b>Intensificación</b>	Planificación y Gestión de Telecomunicaciones
<b>Departamento</b>	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
<b>Fecha de Presentación</b>	Junio- 2007

A mi tutor, Juan Luis Pedreño, y a Juan Monzó,

A mis amigos y compañeros de carrera,

A mi familia, sobretodo a mis padres,

Y, muy especialmente, **a Carmen.**



<b>1. Introducción.</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Reseña histórica</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Descripción del proyecto</b>	<b>1</b>
<b>2. Expresiones matemáticas para el calentamiento en hornos microondas</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Ecuaciones de Maxwell y generalidades</b>	<b>4</b>
<b>2.2. Propagación de ondas planas en dieléctricos sin pérdidas</b>	<b>7</b>
Interpretación de las soluciones	7
Campo magnético, impedancia del medio y potencia de una onda plana	8
<b>2.3. Propagación de ondas planas en dieléctricos con pérdidas</b>	<b>9</b>
La ley de Lambert	13
<b>2.4. Características de la materia (permitividad y permeabilidad)</b>	<b>15</b>
2.4.1. Las pérdidas dieléctricas ( $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ )	15
2.4.2. La permitividad	19
2.4.3. El factor de pérdidas magnético	22
<b>2.5. Interacción microondas-materia</b>	<b>23</b>
2.5.1. La transferencia de calor tradicional	24
2.5.2. El calentamiento por microondas	25
2.5.3. La transferencia de masa	27
2.5.4. Secado y calentamiento selectivo	32
<b>2.6. Guías de onda y Cavidades resonantes</b>	<b>32</b>
2.6.1. Guías de onda rectangulares	33
2.6.2. Cavidades rectangulares multimodo:	34
<b>3. Generación, medida y simulación de microondas.</b>	<b>36</b>
<b>3.1. Microondas. Generación.</b>	<b>36</b>
<b>3.2. Medida de la energía de microondas.</b>	<b>38</b>
<b>3.3. Simulación CAD de la cavidad de microondas.</b>	<b>39</b>
<b>3.4. Procedimiento de medida de <math> S_{11} </math>.</b>	<b>40</b>
Cavidad metálica.	40
Sistema de medida.	44
Sistema de posicionamiento.	45
Interfaz de control.	49
<b>3.5. Procedimiento de medida de alta potencia</b>	<b>51</b>
El magnetrón	52
Launcher	53
Tapa perforada y rejilla	56
Cámara termográfica	61



<b>4. Resultados experimentales.</b>	<b>64</b>
<b>4.1. Medidas en baja potencia.</b>	<b>65</b>
<b>4.2. Sensor de temperatura.</b>	<b>70</b>
Calibración de la cámara termográfica – Efecto de atenuación de la rejilla.	71
<b>4.3. Curvas de calentamiento.</b>	<b>73</b>
Espectro de frecuencia del magnetrón.	73
Curvas de calentamiento.	74
<b>4.4. Análisis de uniformidad.</b>	<b>79</b>
Imágenes tomadas antes y después de calentar.	84
<b>5. Conclusiones</b>	<b>91</b>
<b>6. Bibliografía.</b>	<b>93</b>

# **1. Introducción**



## 1. Introducción.

### 1.1. *Reseña histórica*

Al igual que muchos de los grandes inventos que hoy son comodidad, o incluso necesidad, el horno microondas es, de hecho, un subproducto de otra tecnología.

Fue durante el curso de un proyecto de investigación relacionado con el radar, alrededor de 1946, cuando el doctor Percy Spencer (ingeniero de la Raytheon Corporation) notó algo muy peculiar; estaba probando un nuevo tubo al vacío llamado *magnetron*, cuando descubrió que un dulce que tenía en su bolsa se había derretido.

Tras repetir el experimento con unas semillas de maíz para hacer palomitas, con un huevo de gallina y demás... el doctor Spencer diseñó una caja metálica con una abertura en la que introdujo energía de microondas, la cual no podía escapar, y creaba por tanto un campo electromagnético de mayor densidad.

Cuando se le colocaba alimento se producía energía de microondas y la temperatura del alimento aumentaba rápidamente. El doctor Spencer había inventado lo que revolucionaría la forma de cocinar, y sentaba las bases de una industria multimillonaria, la del calentamiento mediante el uso de las microondas.

### 1.2. *Descripción del proyecto*

Una vez visto cómo comenzó el camino hacia la utilización de las microondas fuera del campo militar y las comunicaciones. Pasamos ya a centrarnos en el presente proyecto, recordando el título del mismo, “*Estudio experimental para la optimización energética y termográfica en aplicaciones de calentamiento por microondas*”. El planteamiento inicial de este proyecto, como su título indica, ha sido el de avanzar hacia la eficiencia energética a la hora de aplicar las microondas en los procesos de calentamiento de la materia.

Los métodos tradicionales de adaptación en hornos microondas son bien conocidos. Están basados en la modificación de impedancia medida desde el magnetron mediante la colocación de materiales metálicos en guías de onda o en sus salidas [Metzas 193]. Algunos de estos métodos se basan en colocar discontinuidades metálicas dentro del iris del



magnetron [Meredith 1998]. Otros se basan en la utilización de múltiples sintonizadores variables, implementados como tornillos que son introducidos dentro de la guíaonda con una configuración específica [Meredith 1998]. Los problemas de todos estos métodos es la elevada sensibilidad a la variación de las propiedades dieléctricas, forma y dimensión de la muestra a calentar. Es más, otros métodos permiten estimar la eficiencia del proceso de calentamiento en estas cavidades, lo hacen midiendo el parámetro de dispersión,  $S_{11}$ , o la tasa de onda estacionaria (VSWR Stationary Wave Rate).

Diferentes simulaciones experimentales han demostrado que para un mismo horno, la eficiencia de calentamiento de una muestra varía en función de las propiedades dieléctricas y las características geométricas de ésta. De hecho, para un mismo tipo de material la eficiencia varía con la distancia al magnetron. Algunos resultados relevantes extraídos de plataformas de simulación [Requena-Pérez 2005] muestran que la dependencia entre la eficiencia y la distancia entre la muestra y el magnetron es una función no lineal con fuertes diferencias entre los valores máximo y mínimo de  $S_{11}$ . Así, para una misma muestra es posible observar variaciones de hasta el 60% en la eficiencia de calentamiento entre dos posiciones separadas por unos pocos milímetros. El procedimiento de control de feedback para situar la muestra a una distancia apropiada respecto del magnetron, en términos de óptima eficiencia, se implementa en este proyecto por medio de un horno microondas real, de 60cm x 60cm x 60cm, un sistema electrónico de posicionamiento y un software de calibración.

Este proyecto presenta un procedimiento de 'auto-calibración' que permite a cualquier horno de microondas, tanto doméstico como industrial, trabajar en condiciones óptimas de eficiencia energética, sin que dependa de las características dieléctricas, ni de la forma o las dimensiones del material que se desea calentar. Éste método se basa en una simple calibración en línea y un proceso de medida con baja potencia, y un posterior dispositivo mecánico que sitúa la muestra en la posición de máxima eficiencia y, después de esto, radiar, con suficiente energía de microondas, para que la muestra se caliente. Este método podría ser aplicado de forma inmediata en hornos existentes, puesto que no añade elementos externos caros, aparte de un eje y una plataforma de transporte de reducido coste.





El proyecto está concebido como la continuación lógica de otros trabajos en los que se ha estado experimentando con una potencia en torno a 1mW, la cual es mucho menor que la que se utiliza en hornos de microondas, ya sean domésticos o industriales.

Así, con este proyecto se pretende verificar los resultados obtenidos en estudios teóricos sobre la utilización de la energía de microondas en el calentamiento de materiales.

Concretamente se tratará de comprobar de una manera empírica que los resultados que se extrajeron en otros trabajos, tanto en simulaciones de alta y baja potencia como en experimentos de baja potencia, se siguen manteniendo dentro de lo deseable al trabajar con una potencia superior, en el rango de las potencias que se utilizan en aplicaciones industriales de las microondas.

Los experimentos se realizarán utilizando una cavidad metálica (horno) con estructura cúbica, de 60 cm de lado, como ya se ha comentado; en el interior de la cual se ha dispuesto un mecanismo deslizante que permite el desplazamiento automatizado de la muestra en cuestión.

Para poder llevar a cabo estos experimentos ha sido necesario también diseñar un sistema mecánico que permita conectar el magnetrón de un horno microondas doméstico a la cavidad, de manera que no se produzcan fugas de energía que, además de desvirtuar la medición, serían potencialmente muy perjudiciales para la salud.

Con estos experimentos también se persigue comprobar la uniformidad del campo eléctrico, y por tanto la uniformidad de la temperatura que alcanza el material que está siendo expuesto a la energía de microondas.

El método que se ha elegido para comprobar la uniformidad del calor adquirido por la muestra, consiste en el empleo de una cámara termográfica, con la que se tomarán imágenes térmicas del material, tanto antes como después de la exposición de éste a la energía de microondas generada por el magnetrón.

## **2. Expresiones matemáticas para el calentamiento en hornos microondas**



## 2. Expresiones matemáticas para el calentamiento en hornos microondas

En este apartado se describirán los parámetros físicos y constructivos que tienen un papel importante en la interacción de los cuerpos con la energía de microondas. Se revisarán los fenómenos de propagación en dieléctricos, con y sin pérdidas. La potencia de microondas disipada dentro de un cuerpo se derivará de principios y leyes electromagnéticas

También se verá cómo las microondas afectan a los cuerpos modificando su sistema termodinámico (temperatura y cambios de fase en su interior).

Por último, se presenta el modo de funcionamiento y características técnicas de los dispositivos más utilizados en el calentamiento asistido por microondas.

### 2.1. Ecuaciones de Maxwell y generalidades

Las ecuaciones de Maxwell son las ecuaciones que describen los fenómenos electromagnéticos. Reciben su nombre de James Clerk Maxwell quien recopiló la ley de Gauss para electricidad, la ley de Gauss para magnetismo, la ley de Faraday y la ley de Ampère. La gran contribución de Maxwell fue reunir en estas ecuaciones largos años de resultados experimentales, introduciendo los conceptos de campo y corriente de desplazamiento, y unificando los campos eléctricos y magnéticos en un solo concepto, el campo electromagnético. De las ecuaciones de Maxwell se desprende la existencia de ondas electromagnéticas propagándose con velocidad 'c':

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

El valor numérico de esta cantidad coincide con el valor de la velocidad de la luz en el vacío, con lo cual Maxwell identificó la luz como una onda electromagnética, unificando la óptica con el electromagnetismo.

La formulación original de Maxwell databa de 1865 y contenía 20 ecuaciones de 20 variables. La formulación moderna de las ecuaciones de Maxwell es debida a Oliver



Heaviside y Josiah Willard Gibbs quienes en 1884 reformularon las ecuaciones originales en un sistema abreviado utilizando una notación vectorial, ésta resultaba especialmente atractiva porque remarcaba las simetrías intrínsecas en las ecuaciones haciendo más fácil su utilización e inspirando aplicaciones posteriores.

Los campos electromagnéticos pueden propagarse a través de cualquier medio dieléctrico o magnético siguiendo las leyes de Maxwell:

$$\text{Ley de Faraday:} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\text{Ley de Gauss, para electricidad:} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\text{Ley de Gauss, para magnetismo:} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{Ley de Ampère - Maxwell:} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

donde  $\vec{E}$  es el vector intensidad de campo eléctrico,  $\vec{D}$  es el desplazamiento eléctrico,  $\vec{B}$  es el vector inducción magnética,  $\vec{H}$  es la intensidad de campo magnético,  $\rho$  es la densidad de carga volumétrica y  $\vec{J}$  es la densidad superficial de corriente.

Para poder resolver estas ecuaciones es necesario recordar las ecuaciones constitutivas, que para materiales lineales e isotrópicos se formulan según:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

donde  $\varepsilon$  es la permitividad eléctrica del medio y  $\mu$  la permeabilidad magnética.

Para obtener la potencia absorbida por un material durante el proceso de calentamiento, se a de derivar la potencia que fluye a través de una superficie cerrada mediante la integración del vector de Poynting:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (2.7)$$

Integrando este vector a lo largo de toda la superficie del cuerpo, aplicando el teorema de la divergencia y teniendo en cuenta las leyes de Maxwell, se puede llegar a la siguiente ecuación:



$$\begin{aligned} \int_S (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} &= \int_V \nabla \cdot (\vec{E} \times \vec{H}^*) dV = \\ &= -j\omega \int_V (\mu_0 \mu' \vec{H}^* \cdot \vec{H} - \epsilon_0 \epsilon'' \vec{E} \cdot \vec{E}^*) dV - \int_V \omega \epsilon_0 \epsilon'' \vec{E} \cdot \vec{E}^* dV \end{aligned} \quad (2.8)$$

La potencia media se define como:

$$\bar{P} = -\frac{1}{2} \int_S \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) \cdot d\vec{S} \quad E_y = A_y \cdot e^{-jk_y y} + B_y \cdot e^{jk_y y} \quad (2.9)$$

Al comparar con la ecuación (2.8) obtenemos:

$$P = \frac{1}{2} 2\pi f \epsilon_0 \int_V \epsilon''(V) \vec{E} \cdot \vec{E}^* dV \quad (2.10)$$

donde E viene expresado en valores de pico y se mide en (V/m).

En la ecuación anterior se ha dejado la expresión de potencia disipada en forma integral para recordar que en la mayoría de los casos el campo eléctrico no es constante sino que varía en el espacio (dentro de la cavidad que utilicemos) y a lo largo del cuerpo que se está calentando.

Habitualmente, la potencia disipada en el material se suele expresar, en lugar de en términos totales, integrando a lo largo del cuerpo, utilizando la potencia disipada por unidad de volumen. En este caso el término de calentamiento volumétrico generado por la energía de microondas se puede expresar como:

$$Q_{gen} = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_{rms}|^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (2.11)$$

donde  $Q_{gen}$  representa el calor volumétrico generado por la energía de microondas y el campo eléctrico viene dado según su valor eficaz.

En general, el campo eléctrico a lo largo del cuerpo tampoco tiene por qué ser uniforme. Así, la generación de calor puede ser muy diferente de un punto a otro del cuerpo, en función del diseño del equipo (horno) de calentamiento.



## 2.2. Propagación de ondas planas en dieléctricos sin pérdidas

El estudio de las ondas planas permitirá tener una idea bastante clara de cómo se propaga la energía electromagnética en un dieléctrico.

Partiendo de las Leyes de Maxwell se puede llegar a la conocida ecuación de onda de Helmholtz, que no es más que la ecuación de onda suponiendo variación senoidal a la frecuencia angular  $\omega$ :

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

Resolviendo esta ecuación por separación de variables, para cada una de las componentes del espacio (x,y,z), se puede demostrar que la solución de campo para cada una de las componentes toma la siguiente forma:

$$\begin{aligned} E_x &= A_x \cdot e^{-jk_x x} + B_x \cdot e^{jk_x x} \\ E_y &= A_y \cdot e^{-jk_y y} + B_y \cdot e^{jk_y y} \\ E_z &= A_z \cdot e^{-jk_z z} + B_z \cdot e^{jk_z z} \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde las constantes anteriores son, en general complejas, y  $\vec{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}$  es el vector de onda.

Como se debe cumplir que la divergencia de E sea nula, k y E serán perpendiculares siempre. También se cumplirá que  $k_x^2, k_y^2, k_z^2 > 0$  y que  $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ .

### Interpretación de las soluciones

Como puede comprobarse las ondas planas presentan dos soluciones posibles para cada sentido en la dirección de propagación k:  $E = E_{0+} \cdot e^{-jk_r r} + E_{0-} \cdot e^{jk_r r}$  que representan dos ondas planas propagándose en la dirección de k y -k respectivamente.

Además la fase de cada una de estas dos soluciones permanece constante (es decir los frentes de onda son planos).



La distancia mínima entre planos de cada fase viene dada por la denominada longitud de onda ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{f\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (2.14)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular de la onda,  $\mu$  es la permeabilidad magnética del medio y  $\varepsilon$  es su permitividad eléctrica. Dado que son medios sin pérdidas tanto  $\mu$  como  $\varepsilon$  serán reales, sin parte compleja.

A la expresión  $v_p = 1/\sqrt{\mu\varepsilon}$  se la denomina velocidad de fase y marca a la velocidad a la que viajan los frentes de onda planos.

En el vacío  $\varepsilon=\varepsilon_0$  y  $\mu=\mu_0$  con lo que  $v_p=3\cdot 10^8$  m/s. Sin embargo para otros dieléctricos y medios, la velocidad de propagación será menor.

## **Campo magnético, impedancia del medio y potencia de una onda plana**

Como sabemos el campo magnético  $\vec{H}$  no es independiente de  $\vec{E}$  sino que está relacionado con éste mediante la expresión:

$$\vec{H} = \frac{j}{\omega\mu} \nabla \times \vec{E} \quad (2.15)$$

Aplicando las condiciones de la onda plana se obtiene:

$$\vec{H} = \frac{\vec{k}}{\eta} \times \vec{E} \quad (2.16)$$

Donde  $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$  es la impedancia de onda del medio (para el vacío  $\eta=\eta_0=120 \Omega$ ).

De (2.15) se deduce que el campo magnético es perpendicular tanto al campo eléctrico como a la dirección de propagación. Así, la dirección del producto vectorial entre  $E$  y  $H$  nos proporciona la dirección de propagación de la onda plana.



En cuanto a la potencia media de una onda plana en el dieléctrico según la dirección de propagación se puede obtener según la ecuación  $\vec{P}_m = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\eta} \hat{k}$ .

### 2.3. Propagación de ondas planas en dieléctricos con pérdidas

Hasta ahora se ha considerado la ecuación (2.12) y las soluciones obtenidas para un medio sin pérdidas dadas en (2.13). ¿Qué sucede si ahora  $\varepsilon$  en lugar de ser una constante real la consideramos compleja ( $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$ )?

De hecho, formalmente, nada ha cambiado y las soluciones que obtenemos para la onda plana son exactamente las mismas aunque en este caso la constante de propagación ( $k^*$ ) será compleja. Sin embargo, esto va a forzar un cambio en el comportamiento físico de la onda plana como veremos.

Si consideramos un material con una permitividad compleja tal que:  $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$  y una onda plana que se propaga en el sentido positivo del eje 'z'  $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-jk \cdot \vec{r}} = \vec{E}_0 e^{-jkz}$ .

En este caso se obtendrá una constante compleja de propagación:

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = \omega \sqrt{\mu (\varepsilon' - j\varepsilon'')} = \beta - j\alpha \quad (2.17)$$

donde  $\alpha$  es la denominada constante de atenuación,  $\beta$  la constante de propagación,  $\varepsilon'$  es la constante dieléctrica y  $\varepsilon''$  el denominado factor de pérdidas.

Con lo cual el campo eléctrico instantáneo puede escribirse como:

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}[\vec{E} \cdot e^{j\omega t}] = \text{Re}[\vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} e^{j\omega t}] \quad (2.18)$$

Por tanto, en cualquiera de sus componentes, el campo evolucionaría del siguiente modo:

$$E_z(r, t) = E_{0z} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \phi_i) \quad (2.19)$$

En la figura siguiente se muestra la evolución espacial del campo para diferentes instantes de tiempo. Puede observarse que la amplitud del campo decrece exponencialmente a medida en que avanzamos en la dirección de propagación (en este caso z).



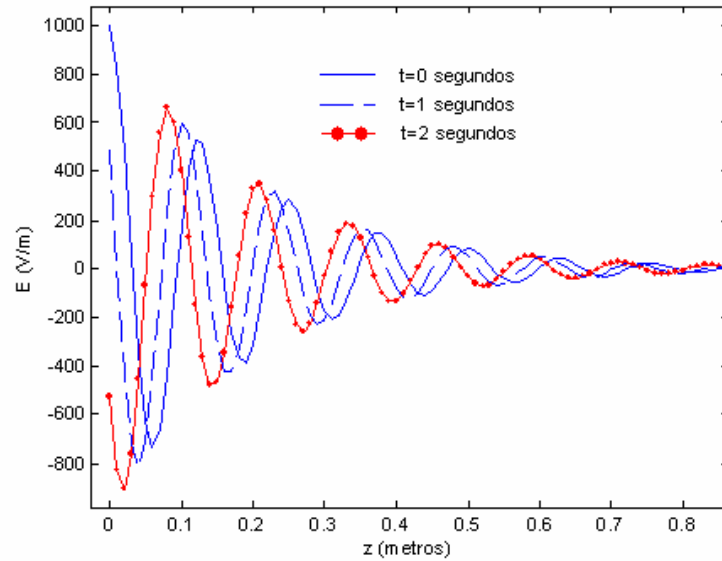


Figura 2.1. Evolución del campo eléctrico (I).

Las constantes de propagación y de atenuación se definen en este caso como:

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu \epsilon'} \left[ \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1}{2} \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\mu \epsilon'} \left[ \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2}}{2} \right]^{1/2} \quad (2.21)$$

Donde a la relación entre el factor de pérdidas y la constante dieléctrica se le denomina **tangente de pérdidas**:

$$tg(\delta) = \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right) \quad (2.22)$$

Del estudio de la ecuación (2.20) se pueden deducir varias cuestiones:

- La atenuación aumenta proporcionalmente con la frecuencia.



- La atenuación aumenta proporcionalmente con la constante dieléctrica y con el factor de pérdidas.
- La atenuación es proporcional a la permeabilidad del material.

La cuestión es: si, en un dieléctrico con pérdidas, la onda plana va perdiendo parte de su energía al propagarse ¿dónde queda dicha energía (ley de conservación de la energía)?

La respuesta es simple, la energía perdida por la onda plana es transformada en el cuerpo en forma de calor. Es decir, a medida que la onda se propaga cede energía al cuerpo, la cual se transforma en calor, tal y como marca la expresión (2.11).

Así, según este criterio las zonas interiores del cuerpo recibirán menos calor que las exteriores. Otra cuestión importante es qué ocurre cuando las pérdidas dieléctricas aumentan en el cuerpo. En la figura se muestra qué ocurre para diferentes coeficientes de atenuación:

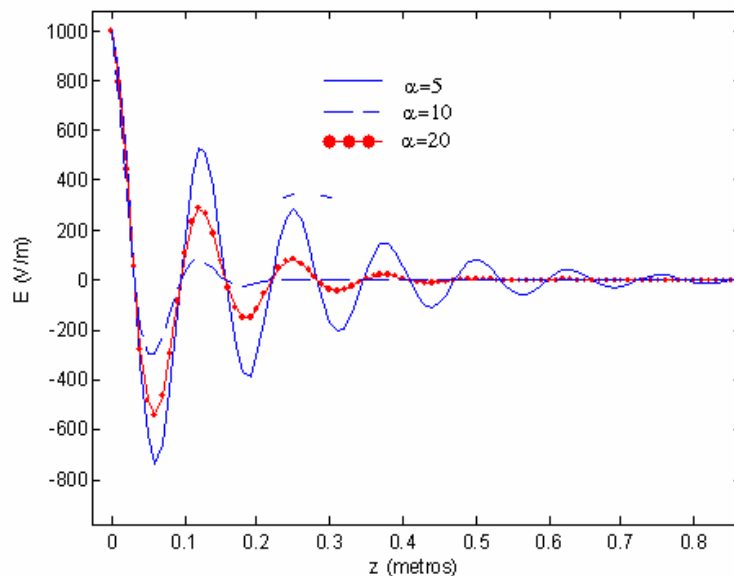


Figura 2.2. Evolución del campo eléctrico (II).

Se puede apreciar que a medida que  $\alpha$  aumenta, la atenuación de la onda es mayor y por lo tanto, las zonas interiores reciben menos campo eléctrico.



Es decir, a medida que aumenten las pérdidas dieléctricas, mayor será la diferencia térmica entre el exterior y el interior del cuerpo.

También resulta interesante observar qué ocurre cuando el coeficiente de propagación,  $\beta$ , aumenta en el cuerpo (por el aumento de la frecuencia, de la constante dieléctrica, de la permeabilidad, o de la tangente de pérdidas). En la figura se muestra qué ocurre para diferentes coeficientes de propagación:

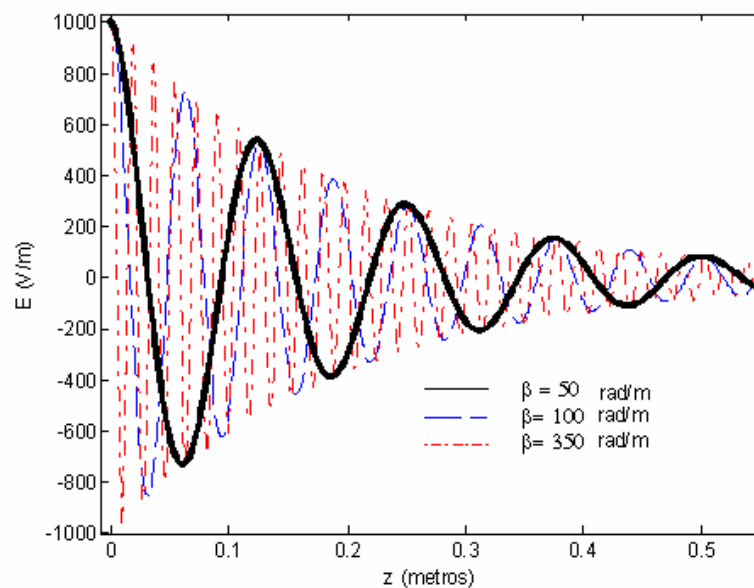


Figura 2.3. Evolución del campo eléctrico (III).

Se puede apreciar que a medida que  $\beta$  aumenta, las oscilaciones del campo eléctrico dentro del cuerpo también lo hacen. Sin embargo, las pérdidas de la onda plana se mantienen iguales en todos los casos.

Es decir,  $\beta$ , tiene relación con la longitud de onda dentro del material, pero no influye en la pérdida de potencia (exponencial compleja: cambio de fase).



## La ley de Lambert

Esta ley se puede encontrar referenciada como un método para hallar el calor volumétrico por microondas ( $Q_{\text{gen}}$  en  $\text{W}/\text{m}^3$ ); e indica que el campo decae exponencialmente. Por tanto podemos establecer un flujo de potencia en la dirección de propagación ( $z$ ) dado por:

$$\bar{P} = P_{\text{superficie}} e^{-2\alpha z} \quad (2.23)$$

También se debe destacar el concepto de *profundidad de penetración*, definida como aquella distancia desde la superficie a la cual la potencia decae hasta  $1/e$ :

$$D_p = \frac{1}{2\alpha} \text{ (m)} \quad (2.24)$$

En la siguiente figura se puede ver cómo el decaimiento del campo eléctrico a lo largo del cuerpo sigue una trayectoria exponencial:

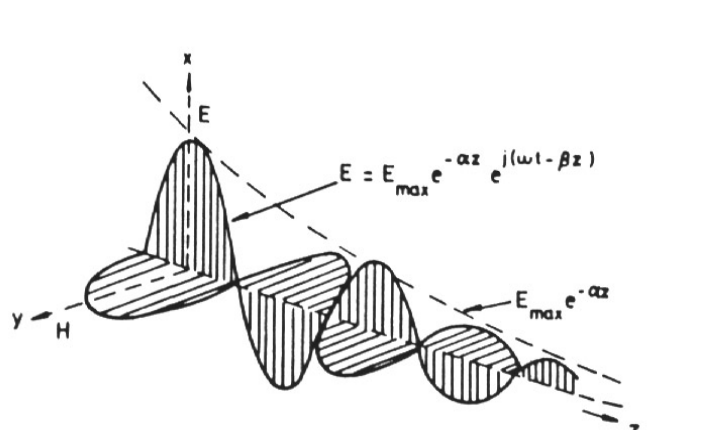


Figura 2.4. Campo electromagnético.

Para cuantificar el término de calor generado por absorción de microondas, según esta ley, se realiza un balance de la potencia absorbida en todo el material. Para ello se considerará que la potencia absorbida por unidad de superficie se puede expresar como:

$$P_s''' = \frac{P_{\text{superficie}}}{2(L_1 L_2 + L_2 L_3 + L_3 L_1)} \quad (2.25)$$

donde  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  son, respectivamente, el grosor y los lados de una muestra rectangular (ver figura 2.5),  $P_{\text{superficie}}$  es la potencia sobre la superficie de la muestra. Se presupone que



toda la potencia incidente sobre la superficie de la muestra es absorbida (existe adaptación en todo momento).

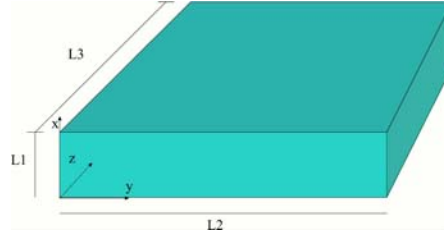


Figura 2.5. Muestra rectangular.

La potencia de microondas por unidad de área que se propaga en la dirección  $x$  desde la superficie será, según la ley de Lambert:

$$P_x'' = P_s'' \cdot e^{-2\alpha x} \quad (2.26)$$

Si ahora se deriva la potencia superficial respecto de  $x$ , y se tienen en cuenta las aportaciones de las dos caras de la muestra, obtendremos la potencia volumétrica absorbida en esta dirección:

$$Q_{gen} = P_x''' = 2\alpha \cdot P_s'' [e^{-2\alpha x} + e^{-2\alpha(L_1-x)}] \quad (2.27)$$

donde  $Q_{gen}$  viene dado en W/m y  $L_1$  es el grosor de la muestra en metros.

*Esta ley ha sido utilizada en muchos trabajos cuando se estudian procesos de secado en hornos microondas multimodo. Sin embargo, las condiciones sobre las que se pueden aplicar (condición de onda plana incidente sobre el dieléctrico) no se cumplen. A pesar de esto se utiliza debido, fundamentalmente, a su sencillez y al hecho de que para dieléctricos con altas pérdidas da unos resultados bastante aproximados al comportamiento experimental utilizado. No obstante, algunos autores desaconsejan su uso indiscriminado sobre todo para dieléctricos con bajas pérdidas.*



## 2.4. Características de la materia (permitividad y permeabilidad)

### 2.4.1. Las pérdidas dieléctricas ( $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ )

En los puntos anteriores se ha visto, desde un punto de vista teórico, por qué se produce el calentamiento asistido por microondas. Este estudio teórico ha llevado a caracterizar los dieléctricos con pérdidas mediante una parte real (constante dieléctrica) y otra imaginaria (factor de pérdidas).

Sin embargo, no se han descrito los mecanismos físicos por los que producen las pérdidas dieléctricas, en las cuales nos centraremos. Básicamente las pérdidas dieléctricas se pueden explicar a partir de dos efectos que, a menudo, se producen simultáneamente, en mayor o menor grado: el efecto de polarización y el de conducción eléctrica.

El calentamiento por microondas consiste en la mayor o menor habilidad del dieléctrico para polarizar sus cargas o mover sus iones positivos y/o negativos a lo largo de su volumen. Este movimiento se ve forzado por el campo eléctrico externo. La imposibilidad de las moléculas polares o los iones para seguir los cambios rápidos del campo eléctrico es lo que provoca la disipación de energía en forma de calor.

La interacción de un campo eléctrico con un dieléctrico tiene su origen en la respuesta de las partículas con carga frente a dicho campo; las partículas se moverán a partir de su posición de equilibrio.

Existen dos mecanismos de polarización básicos: el electrónico (movimiento de los electrones alrededor de su núcleo) y el molecular (distribuciones de carga en los átomos y moléculas no uniforme).

El mecanismo de polarización a su vez puede tener tres orígenes:

- Polarización inducida debida al desplazamiento del núcleo frente al electrón.
- Polarización permanente que se produce porque los dieléctricos contienen moléculas polares con una distribución de carga asimétrica (agua).
- Polarización en las interfaces de diferentes dieléctricos en contacto (carga superficial o mecanismo de Maxwell-Wagner).

En la figura siguiente se muestran los mecanismos de la polarización interfacial y la reorientación de los dipolos bajo el efecto de un campo eléctrico externo.

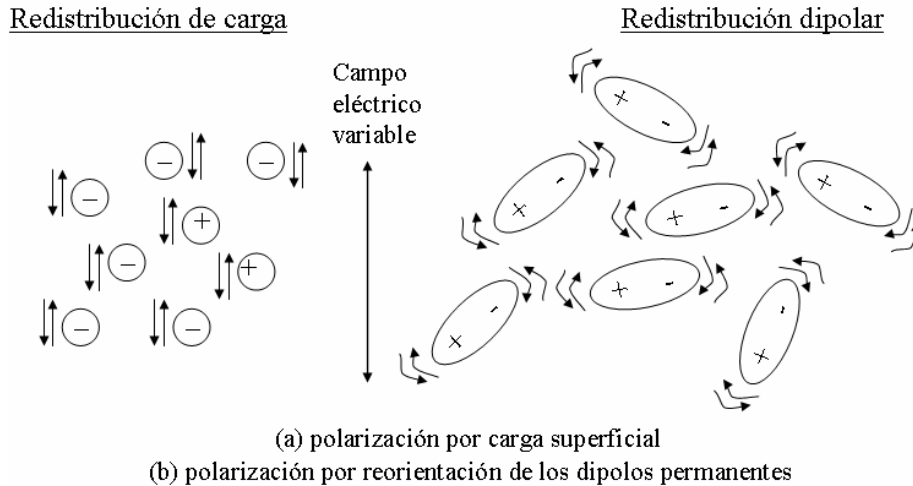


Figura 2.6. Mecanismos de polarización interfacial.

Debido a que con la mayoría de las técnicas de medida resulta difícil separar las pérdidas debido a conducción y a la polarización, se suele expresar el factor de pérdidas definiendo un factor de pérdidas efectivo. Así, el factor de pérdidas se puede expresar como una contribución de ambos mecanismos (conducción y polarización):

$$\varepsilon_{eff}''(\omega) = \varepsilon_d''(\omega) + \varepsilon_e''(\omega) + \varepsilon_a''(\omega) + \varepsilon_{MW}''(\omega) + [\sigma / (\omega \varepsilon_0)] = \varepsilon''(\omega) + [\sigma / (\omega \varepsilon_0)] \quad (2.28)$$

donde los subíndices  $d$ ,  $e$ ,  $a$  y  $MW$  se refieren a las pérdidas dieléctricas debido a los mecanismos dipolares, electrónicos, atómicos y el efecto Maxwell-Wagner.  $\sigma$  representa la conductividad del medio dieléctrico y agrupa las pérdidas por conducción.

El factor de pérdidas presenta una dependencia con la frecuencia, dado que a ciertas frecuencias dominan más unos fenómenos físicos sobre los otros.

Los mecanismos más importantes desde el punto de vista de calentamiento por microondas serán, básicamente, los de polarización (que dependerán de la cantidad de agua o material polar que componga el material) y los de conductividad en continua.



Los demás mecanismos tienen mayor preponderancia a frecuencias cercanas al espectro infrarrojo y visible.

### Las pérdidas dipolares: ecuaciones de Debye

La caracterización frecuencial de la rotación de las moléculas dipolares se lleva a cabo a partir de la rotación de un dipolo esférico que está en un medio viscoso. Así *Debye* llegó a la conclusión para electrolitos de que la dependencia de la permitividad con la frecuencia seguía la forma:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.29)$$

donde  $\varepsilon_s$  y  $\varepsilon_\infty$  son las constantes dieléctricas a corriente continua y a muy alta frecuencia, y  $\tau$  es el *tiempo de relajación del sistema*, que controla el mecanismo de polarización.

Separando las partes real e imaginaria para la permitividad se obtiene:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.30)$$

La interpretación de estas fórmulas indica que a baja frecuencia los dipolos tienen bastante tiempo para seguir las variaciones del campo eléctrico, por lo que el factor de pérdidas es muy pequeño. Por otra parte la constante dieléctrica toma su máximo valor porque la carga ligada toma su máximo valor y toda la energía consigue almacenarse.

Cuando la frecuencia aumenta los dipolos son incapaces de seguir los cambios del campo eléctrico por lo que no pueden volver a su posición original. Se llega a alcanzar un punto en el que el dipolo no puede realinearse contribuyendo menos a la polarización total. Esto hace que el material disipe energía en forma de calor.

### Las pérdidas dipolares: ecuaciones de Maxwell-Wagner

Las pérdidas debido al efecto interfacial o de *Maxwell-Wagner* son muy importantes en dieléctricos heterogéneos, lo cual se da en muchos cuerpos con agua y una matriz sólida





(frutas, cuero, madera). De igual manera al anterior tratamiento, existen formulaciones que caracterizan este tipo de polarización en función de la frecuencia.

Para dos dieléctricos con grosores  $d_1$  y  $d_2$ , la permitividad compleja se puede escribir como:

$$\varepsilon_{MW}^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.31)$$

La parte real de este modelo es la misma que la del modelo de *Debye*, sin embargo, el término de pérdidas incluye la conductividad (término en continua).

### Conclusiones sobre las pérdidas dieléctricas por rotación dipolar

Como conclusión a todo lo comentado se debe tener en cuenta que, cuanto más dipolar sea un material, más pérdidas tendrá debido a los dos efectos anteriores y por lo tanto más calor se generará en su interior.

Uno de los materiales con mayor comportamiento dipolar es el agua con lo que, aquellos materiales que contengan gran cantidad de agua se calentarán al aplicarles un campo a las frecuencias de microondas. A estas frecuencias el mecanismo que predomina en las pérdidas dieléctricas es el dipolar.

A menores frecuencias (en torno a 27.12 MHz, aplicaciones de calentamiento por radiofrecuencia) el fenómeno de calentamiento de agua ya no es dipolar (como se ha indicado antes), sino que ésta se calienta por conducción eléctrica debido a los iones positivos y negativos que el agua no pura presenta, como son el sodio, el cloro, etc.

Así, por ejemplo, el agua presenta a 3Ghz una constante dieléctrica de 76.7 y un factor de pérdidas cercano a 12. Sin embargo, a la misma frecuencia, en un material no polar tal como el crepé natural, caucho no polar, estas mismas magnitudes son 2.15 y 0.005, respectivamente.



## 2.4.2. La permitividad

### Necesidad de su caracterización

El conocimiento de las propiedades dieléctricas de los materiales que van a procesarse en un horno de microondas es fundamental por dos motivos:

- Dichas propiedades marcan cómo se propaga la energía en el cuerpo, determinando la longitud de onda, impedancia, velocidad y constante de propagación.
- También marcan cómo se transforma la energía de microondas en calor en el interior del dieléctrico tal y como indica la ecuación (2.11).

De hecho, un alto factor de pérdidas indica que el material es susceptible de ser tratado con microondas mientras que un factor de pérdidas reducido indica lo contrario, es decir, la permitividad dieléctrica indica si un material es susceptible de ser tratado o no con microondas.

De aquí nace la necesidad de caracterizar las propiedades dieléctricas de los materiales en el contexto de la aplicación de las microondas a efectos de calentamiento.

### Dependencia con el contenido de humedad

Muchas aplicaciones del calentamiento por microondas implican eliminación de humedad del interior de un material o carga. Por tanto, la caracterización de la permitividad en función del contenido de humedad resulta fundamental para el diseño de los dispositivos de secado asistido por microondas.

Para caracterizar la cantidad de agua presente en un cuerpo frente a su masa seca (sin agua) se utiliza el contenido de humedad en base seca:

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.32)$$

donde  $X$  es el contenido de humedad en base seca,  $m$  la masa total del cuerpo en un instante determinado del proceso de deshidratación y  $m_s$  la masa de la matriz sólida del mismo cuerpo. Se suele distinguir entre dos tipos de agua en el interior de los materiales:



- Agua ligada, en contacto con las paredes de la estructura sólida, tiene un movimiento reducido, y
- Agua libre, que se comporta como agua normal y por tanto tiene comportamiento polar.

En la figura se muestra la variación del factor de pérdidas ( $\varepsilon''$ ) en función del contenido de humedad ( $X$ ) de un sólido típico. Se pueden diferenciar claramente dos etapas con diferentes pendientes ligadas a los dos tipos de agua en el interior del cuerpo.

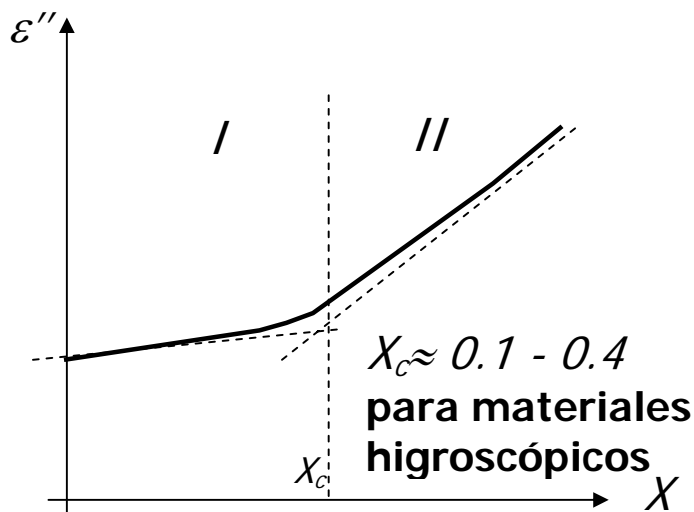


Figura 2.7. Factor de pérdidas en función de la humedad.

La primera parte (con menor pendiente) es debida al agua ligada mientras que la mayor pendiente se observa para contenidos de humedad mayores en los cuales el agua en el cuerpo es fundamentalmente libre. El cambio de pendiente se produce en el denominado contenido de humedad crítico.

La diferencia de comportamientos se debe a que el agua ligada tiene una menor movilidad y por lo tanto no rota tanto como la libre (menor carácter dipolar al estar ligada a la superficie del cuerpo por capilaridad y otro tipo de enlaces).

En la mayoría de las ocasiones se puede representar tanto el factor de pérdidas como la constante dieléctrica con una relación cuadrática:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_o'' + AX + BX^2 \quad (2.33)$$

donde A, B y  $\varepsilon_o''$  son constantes que ajustan el comportamiento experimental medido.



La pendiente de la curva en la zona II es muy importante para las aplicaciones de secado selectivo en las cuales el diferente comportamiento entre la zona I y la II es fundamental para que las partes con mayor humedad absorban mayor energía y por lo tanto se sequen a una mayor velocidad.

El secado selectivo no es tan eficiente para la zona I puesto que las diferencias en la absorción ( $\epsilon''$ ) son mínimas para diferentes porcentajes de humedad.

### Dependencia con la temperatura

Se han realizado multitud de estudios sobre la dependencia de la permitividad con la temperatura en alimentos, agua, madera, etc. De hecho está demostrado que el hielo presenta una permitividad mucho menor que el agua líquida. En la figura 2.8 se muestra  $\epsilon'$  para el Nylon a diferentes temperaturas para una frecuencia de 3Ghz. Puede observarse cómo al aumentar la temperatura aumenta también el factor de pérdidas y su constante dieléctrica.

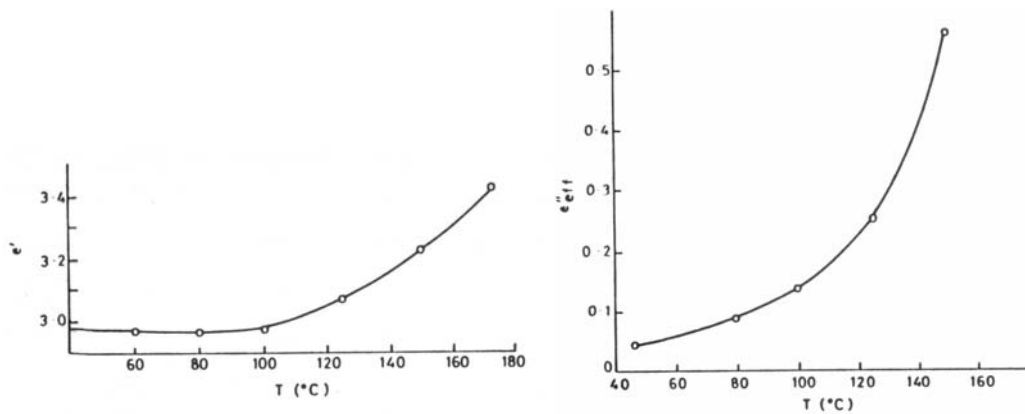


Figura 2.8. Propiedades dieléctricas del nylon a 3Ghz.

Para cada material existe una temperatura crítica (figura 2.9) a la cual el material experimenta un cambio en sus propiedades dieléctricas muy acusado, tal y como ocurriría con la dependencia con la humedad.

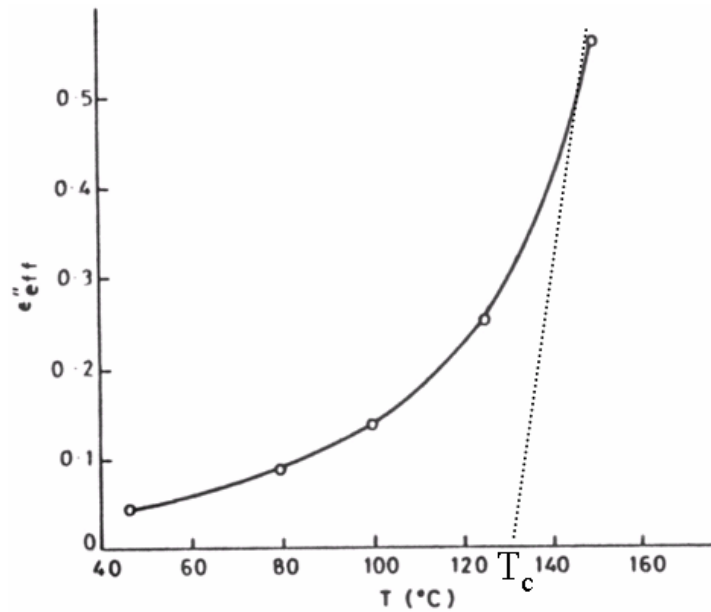


Figura 2.9. Temperatura crítica del nylon a 3 Ghz.

### Avalancha de temperatura ('run away effect')

Si nos fijamos en la ecuación (2.11) y en las propiedades dieléctricas del Nylon presentadas anteriormente (figuras 2.8 y 2.9) se puede llegar a que se produzca un incremento incontrolado de la temperatura denominado avalancha de temperatura o 'run away effect'.

Este hecho se produce porque el factor de pérdidas crece con la temperatura, con lo cual a mayor temperatura mayor absorción de potencia, lo cual redundaría en un crecimiento de temperatura mayor.

Este crecimiento de la temperatura no controlado produce, o puede llegar a producir, daños en el material porque ciertos puntos de éste pueden llegar a calentarse tanto que el material no soporte la temperatura.

### 2.4.3. El factor de pérdidas magnético

Aunque el centro serán las pérdidas dieléctricas, es importante mencionar que existen materiales con pérdidas magnéticas muy altas tanto a frecuencias de microondas como a



otras frecuencias. Cuando existe este tipo de pérdidas, la permeabilidad compleja relativa se define por un número complejo dado por:

$$\mu^* = (\mu' - j\mu''_{eff}) \quad (2.34)$$

Donde  $\mu'$  es la permeabilidad y  $\mu''_{eff}$  es el factor de pérdidas magnético debido a la relajación y resonancia bajo la influencia de un campo magnético externo.

Mediante esta constante se podría relacionar el campo magnético,  $H$ , con la densidad de flujo magnético,  $B$ , según la ecuación:

$$\vec{B} = \mu_o \mu^* \vec{H} \quad (2.35)$$

Estos materiales también se calentarán en función del campo magnético y las pérdidas magnéticas en su interior.

## 2.5. Interacción microondas-materia

Cuando a un material se le aplican microondas pueden darse tres fenómenos simultáneos y relacionados entre sí:

La *transmisión de energía* al sólido generada en su interior lo cual genera el calor necesario para elevar la temperatura del material (ecuación 2.11).

El calor generado también puede utilizarse en el cuerpo para evaporar la humedad que éste contenga. Por lo que se puede producir una *transferencia de humedad*, en estado líquido o gaseoso, desde el interior del material hasta la superficie del mismo, lugar donde pasa a formar parte del medio externo.

El *desarrollo de una energía mecánica*, debida a los flujos de las fases líquidas y a las contracciones, dilataciones y distorsiones de la estructura del material sólido considerado.

Es decir, cuando se aplican microondas se está aportando una energía a un material que anteriormente estaba en equilibrio termodinámico. Esta energía cambiará el estado termodinámico del cuerpo bien incrementando su temperatura, bien evaporando el agua que el cuerpo contuviera.



## 2.5.1. La transferencia de calor tradicional

### Fenómeno de conducción

La transferencia de energía mediante conducción sucede a escala molecular o atómica, los átomos con mayor energía transfieren parte de la misma por colisión con los átomos caracterizados con una menor energía. Así, el calor siempre se propagará desde las zonas de mayor temperatura a las de menor temperatura.

Para modelar materiales heterogéneos con diferentes componentes (humedad, matriz sólida, etc.) se han propuesto muchos modelos, que intentan obtener una conductividad efectiva a partir de las distintas conductividades de las materias que componen el sólido húmedo. Uno de estos modelos es el de Maxwell cuya expresión es:

$$K_T = \frac{K_2 [K_1 + 2 \cdot K_2 - 2(1-e)(K_2 - K_1)]}{[K_1 + 2 \cdot K_2 + (1-e)(K_2 - K_1)]} \quad (2.36)$$

donde  $K_i$  es la conductividad de la fase  $i$  mientras que  $e$  es la fracción de la fase 2 en el total.

### Fenómeno de convección

La convección tiene lugar cuando existe un fluido en movimiento sobre la superficie de un material, estando ambos a diferentes temperaturas. En este caso existen dos mecanismos de transferencia de energía que contribuyen al efecto global de la convección.

Por un lado existe una transferencia de energía debida al movimiento aleatorio de las moléculas en la interfaz del fluido y el sólido, las cuales al chocar se transmiten energía de un modo parecido al proceso de conducción debido al gradiente de temperaturas que aparece entre los dos medios.

Por otro lado, el fluido, con una velocidad dada, puede transferir parte de esta energía a la interfaz del sólido de forma macroscópica, ya que grandes agregados de moléculas se mueven dentro del fluido. Por lo tanto, la convección es un fenómeno superficial.



## Fenómeno de radiación térmica

La radiación térmica es energía emitida por un cuerpo que se encuentra a una determinada temperatura. Esta emisión de energía se produce incluso en el vacío. Esta radiación se atribuye a los cambios de configuración en los electrones y es transportada por medio de ondas electromagnéticas (las cuales pueden propagarse más efectivamente en el vacío que en cualquier otro medio).

Normalmente no se considera relevante este mecanismo de transmisión de calor frente al de convección puesto que su aportación al flujo total de calor suele ser muy pequeña comparada con los mecanismos de convección.

### 2.5.2. El calentamiento por microondas

Desde hace muchos años se conoce la posibilidad de calentar materiales mediante la aplicación de ondas electromagnéticas en la banda de microondas. El origen de este calentamiento nace de la interacción del campo eléctrico con las moléculas o partículas que tienen una distribución de carga no nula, bien desplazándolas de lugar (fenómeno de conducción), bien haciéndolas girar alrededor de su posición de equilibrio (fenómeno de polarización).

Cuando el campo eléctrico cambia de dirección muy rápidamente, las partículas y moléculas intentan seguir estos cambios, bien desplazándose de un lado a otro del material, bien girando sobre sí mismas. Estos movimientos provocan fricciones que generan calor en el interior del material.

La ecuación 2.11, aquí repetida, muestra el calentamiento que se produce en un punto del cuerpo (calor volumétrico) en función de la frecuencia y del campo eléctrico y el factor de pérdidas en dicho punto.

$$Q_{gen} = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' |\vec{E}_{rms}(x, y, z, t)|^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (2.11)$$





## Modelo para la predicción del calentamiento

En la ecuación (2.37) se muestra un modelo que predice la temperatura de un cuerpo expuesto a microondas:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K_T \nabla^2 T + Q_{gen} \quad (2.37)$$

donde  $K_T$  (W/m°C) es la conductividad térmica del material,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) y  $c_p$  (J/kg °C) su densidad y calor específico, respectivamente,  $T$  (°C) su temperatura y  $Q_{gen}$  (W/m<sup>3</sup>) el calor generado por microondas según (2.11).

El término de la izquierda en (2.37) marca el incremento de temperatura en el cuerpo, debe reseñarse que el incremento de  $T$  será menor cuanto mayores sean  $\rho$  y  $c_p$ . El primer término de la parte derecha de la igualdad marca cómo se redistribuye el calor debido al fenómeno de conducción térmica, siendo:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.38)$$

Se debe recordar que  $Q_{gen}$  no tiene porqué ser uniforme a lo largo del espacio sino que dependerá de la cavidad en la que se trate el material y sus propiedades dieléctricas.

Si el material contiene humedad en su interior y ésta se evapora, la ecuación de calentamiento tiene un nuevo término que tiene en cuenta el calor perdido por dicha evaporación:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_T \nabla^2 T + \frac{e_v}{c_p} \Delta H_{ev} \frac{\partial X_l}{\partial t} + \frac{Q_{gen}}{\rho \cdot c_p} \quad (2.39)$$

donde  $e_v$  es el coeficiente de evaporación interna y representa la fracción de agua evaporada en el interior del material frente a la evaporada en su superficie y  $\Delta H_{ev}$  es el vapor latente de evaporación (energía necesaria para evaporar un kilogramo de agua).



### 2.5.3. La transferencia de masa

#### Mecanismos generales

El calor generado también puede utilizarse en el cuerpo para evaporar la humedad que éste contenga. Por lo que se puede producir una *transferencia de masa* desde el interior del material hasta su superficie, lugar donde pasa a formar parte del medio externo.

La deshidratación de un material es uno de los procesos industriales que requieren mayor gasto de energía. De hecho, en los países avanzados, alrededor de un 10% del gasoil utilizado en procesos energéticos se destina a procedimientos de deshidratación. Los secadores industriales más usados, por su simplicidad, son aquellos que emplean aire caliente y ventilación forzada (transmisión de calor convectiva) para transmitir calor al material y eliminar la humedad del producto tratado.

Sin embargo, las técnicas convencionales tienen la desventaja de que el calor requerido para que la humedad sea evaporada, se debe transferir hasta el interior del material a través de su superficie.

En materiales donde la conductividad térmica es baja, o donde las dimensiones son considerables, este tipo de transmisión de calor es, a menudo, poco eficiente y lento.

Además, en el secado con aire forzado, la evaporación del agua se produce principalmente en la superficie del producto por lo que la humedad debe viajar desde el centro del material hasta la superficie para poder ser extraída. Este proceso de migración se produce por diversos mecanismos: difusión de la fase líquida o del vapor de agua, capilaridad, termomigración, evaporación y condensación, etc., los cuales, por regla general, son intrínsecamente lentos y, por consiguiente, condicionan la velocidad de secado.

Por otro lado, las condiciones ambientales pueden limitar la tasa de evaporación puesto que marcan la velocidad a la que el agua superficial se evapora y el contenido de humedad en equilibrio del material.

Los datos relativos al secado deben expresar claramente la pérdida de humedad en el cuerpo en relación con el paso del tiempo. Habitualmente, no se utiliza la pérdida de peso sino el contenido de humedad en base seca ( $X$ ) definido como:



$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.40)$$

donde  $m$  es la masa del cuerpo en un instante determinado del proceso de deshidratación y  $m_s$  es la masa de la matriz sólida de este mismo cuerpo.

Lo más habitual es definir la velocidad de secado como la variación de humedad global con respecto al tiempo  $dX(t)/dt$ , o bien, si se quiere independizar del área expuesta al secado como indica:

$$N_w = \frac{m_d}{A} \cdot \left( -\frac{dX}{dt} \right) \quad (2.41)$$

donde  $N_w$  es la densidad superficial de flujo evaporado, y  $A$  es el área de la muestra expuesta al secado.

Se puede observar una curva típica de esta magnitud en la figura (2.10). De nuevo pueden apreciarse distintas etapas para  $N_w$ . En un primer momento, dicha magnitud crece (entre los puntos AB), hasta llegar a un estado de equilibrio en el que la velocidad de secado se mantiene constante (entre los puntos B y C).

En esta curva existe un punto de inflexión en el material, el punto C en este caso, en el cual la velocidad de secado desciende drásticamente (contenido de humedad crítico).

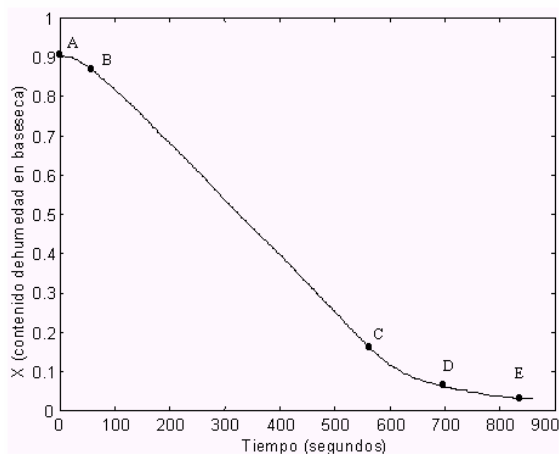


Figura 2.10a. Curva de secado ideal.

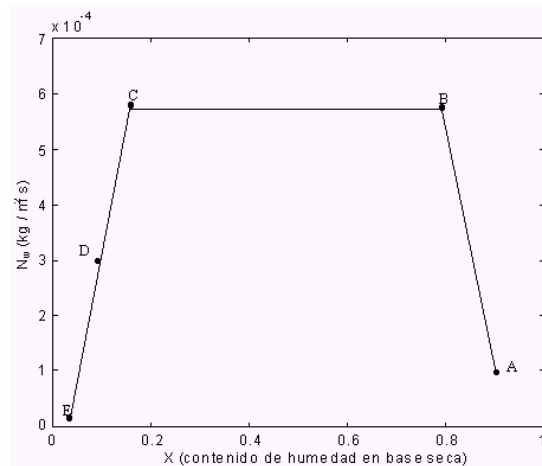


Figura 2.10b. Tasa de secado normalizada.



A partir de estas curvas se pueden definir varios periodos en el secado, los cuales no siempre aparecen para todos los materiales. Esto induce a pensar que se producen varios mecanismos de secado y que en cada periodo un mecanismo es el dominante.

- *Periodo inicial*: es un periodo de calentamiento que transcurre desde que comienza el proceso hasta que el material alcanza la temperatura necesaria para iniciar el secado a la tasa constante (trazo AB).
- *Periodo de evaporación constante*: tiene lugar si el porcentaje de humedad en el sólido es elevado. La evaporación ocurre superficialmente o en el interior del material a velocidad constante si las condiciones de operación se mantienen. El agua superficie es remplazada por agua interior gracias a algunos de los modelos de transferencia de masa que se comentan más adelante (BC).
- *Periodo de tasa de secado a velocidad decreciente*: en él, la velocidad de secado disminuye. Suele darse a bajos contenidos de humedad, y se produce si los mecanismos de transferencia de masa en el interior del sólido son incapaces de saturar la superficie con agua. Así, la migración interna de la humedad no puede igualar la velocidad de evaporación del agua en la superficie. Por ello, en este periodo el secado está controlado por los mecanismos internos (trazo CE).

### **Modelos de transferencia de masa**

La formulación física de un proceso de secado se basa en un sistema de ecuaciones diferenciales que incluyen la variación de energía, masa y, en algunas ocasiones, presión dentro del material. Todas estas magnitudes están acopladas y los coeficientes del sistema suelen depender de las variables independientes (temperatura, contenido de humedad y presión) lo cual hace muy difícil la resolución analítica del sistema de ecuaciones teniendo que recurrir a métodos numéricos para ello. Algunos mecanismos mediante los que se puede explicar cómo el sólido pierde su humedad interna se enumeran a continuación:

- *Ecuación de difusión*: considera que la transferencia de masa se produce, exclusivamente, debido al gradiente de contenido de humedad. Esta ecuación no



*considera la capilaridad, el flujo del vapor de agua ni la influencia de la presión interna.*

- *Termodinámica irreversible:* plantea el hecho de que el secado puede ser descrito por la interacción de tres magnitudes fundamentales: el contenido de humedad, la temperatura y la presión interna. De este modo se establece un sistema de tres ecuaciones diferenciales acopladas donde los coeficientes no son constantes, sino que dependen de alguna o varias de estas magnitudes independientes.
- *Modelos multifase:* En este tipo de modelos se suele considerar que existen tres fases dentro del material (la matriz sólida del cuerpo poroso, el agua en estado líquido y la fase de vapor, la cual incluye tanto el vapor de agua como el aire). Este tipo de modelos suele dar mejores resultados y, además, incluyen la presión y la temperatura como fuerzas conductoras del flujo de humedad.
- *Modelos analíticos:* principalmente para el secado asistido por microondas. El mayor inconveniente de este tipo de modelos es que parten de suposiciones difíciles de encontrar en las aplicaciones y materiales reales. Por otro lado, no suelen tener en cuenta las relaciones que existen entre las diferentes magnitudes que intervienen en el proceso.
- *Ecuaciones analíticas con parámetros estadísticos* para modelar el contenido medio de humedad bajo ciertas condiciones. Si bien estos modelos son válidos para tener una idea aproximada de cómo se va a desarrollar el proceso de secado, no explican los fenómenos que influyen en la cinética de secado y cómo se pueden aprovechar para optimizar el proceso.

### **Modelo de difusividad**

La denominada Ley de Fick relaciona la velocidad de secado de un sólido con el denominado coeficiente de difusión, o difusividad, y el gradiente espacial de concentraciones de humedad, como indica la ecuación.



$$\frac{\partial X}{\partial t} = D \nabla^2 X \quad (2.42)$$

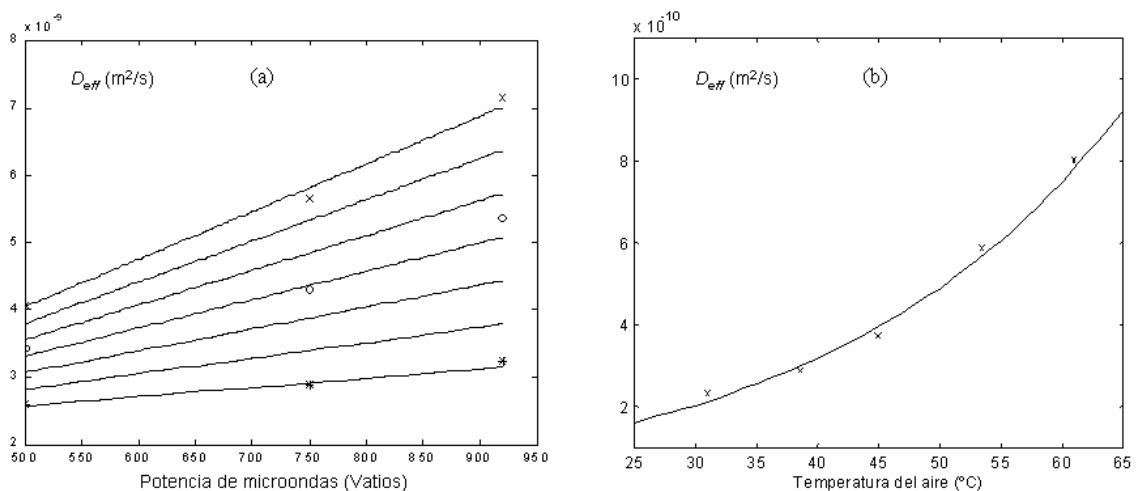
donde  $t$  es el tiempo y  $D$  es el coeficiente efectivo de difusión y  $\nabla^2$  es la operación:

$$\nabla^2 X = \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} \quad (2.43)$$

Generalmente, existen diversos mecanismos de transferencia de masa que pueden darse conjuntamente (migración del vapor de agua, del agua libre o del agua ligada, evaporación y condensación del vapor, etc.). En este caso, el significado físico del coeficiente de difusión efectivo se pierde o se interpreta como un coeficiente que tiene en cuenta todos los efectos simultáneos de los diversos mecanismos que intervienen en la transferencia de masa. La difusividad marca lo rápido que se traslada la humedad en el interior de un cuerpo.

El efecto de introducir las microondas en el proceso de secado, frente al secado tradicional (convectivo) es el de aumentar el coeficiente de difusión (lo cual hace que la humedad viaje más rápido en el interior del cuerpo) y por lo tanto el cuerpo se deshidratará antes.

Así, en el ejemplo de la figura 2.11, puede observarse cómo al introducir las microondas la difusividad es diez veces mayor que la medida en el proceso de secado con aire. Esto es debido a que al introducir las microondas el agua adquiere más energía con lo cual tiene mayor movilidad.



Datos experimentales para la difusividad en el cuero (a) secado asistido por microondas (b) secado convencional (aire caliente)



Figura 2.11. Ejemplo de difusividad en el cuero.

#### 2.5.4. Secado y calentamiento selectivo

En muchos procesos y aplicaciones industriales es importante que ciertas partes de un material se calienten y otras lo hagan a una velocidad mucho menor. Ejemplos:

- Desinsectación de cereales (proceso de calentamiento).
- Desinsectación de maderas (proceso de calentamiento).
- Secado de materiales (interesa que las partes más mojadas absorban más energía).

Esto no es posible hacerlo con técnicas tradicionales de transmisión de calor, pero sí que se puede realizar con las microondas, debido a que para un mismo campo eléctrico, partes de un mismo material con diferentes factores de pérdidas se calentarán a diferentes velocidades:

$$\text{Si } \epsilon_1'' > \epsilon_2'' \text{ entonces } Q_{gen1} = 2\pi f \epsilon_o \epsilon_1'' |\vec{E}_{rms}|^2 > Q_{gen2} = 2\pi f \epsilon_o \epsilon_2'' |\vec{E}_{rms}|^2 \quad (2.44)$$

#### 2.6. Guías de onda y Cavidades resonantes

Los procesos de calentamiento por microondas deben cumplir unos requisitos de protección para los operarios en cuanto a la máxima radiación que éstos deben recibir para que se encuentren en márgenes de microondas.

Se debe decir que las microondas, hasta lo que se conoce, no son radiaciones ionizantes sino que únicamente provocan incremento de temperatura. De todos modos, para evitar quemaduras y/o lesiones oculares o de otro tipo, se debe confinar la energía de microondas en el interior de una cavidad metálica, que evite las fugas de campo eléctrico.

En España el límite lo marca la norma EN-55011 revisada en octubre de 2000. Para los equipos de clase B y está en torno a los 110 dB $\mu$ V/m (aproximadamente 1 mW/cm<sup>2</sup>) midiendo con un receptor con detector de pico.



Las guías de onda y las cavidades resonantes permiten guiar y confinar el campo eléctrico y magnético en una región cerrada del espacio para que se cumpla la ley de conservación de la energía.

### 2.6.1. Guías de onda rectangulares

Son estructuras pensadas fundamentalmente para transferir energía desde el magnetron (fuente de potencia) hasta el aplicador o cavidad (destino de la potencia).

Las frecuencias de corte se obtienen a partir de:

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (2.45)$$

En el modo  $TE_{10}$  no existe la componente  $E_z$  ni la  $E_x$ :

$$E_y^+ = -A_{10} \frac{\beta_x}{\epsilon} \sin(\beta_x x) \cdot e^{-j\beta_z z} \quad (\text{siendo } \beta_x = \pi/a) \quad (2.46)$$

En la siguiente imagen se puede apreciar cómo se distribuye el campo en el interior de una guía rectangular, del tipo WR340, guía que se ha utilizado en este trabajo:

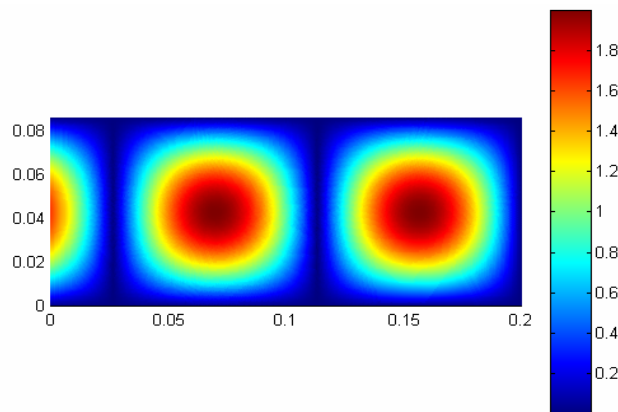


Figura 2.12. Módulo del campo eléctrico en guía WR340 cortocircuitada





## 2.6.2. Cavidades rectangulares multimodo:

El aplicador de microondas más usado es el multimodo rectangular, figura 2.13. Es fácil de construir, y acepta gran cantidad de tipos de cargas y materiales.

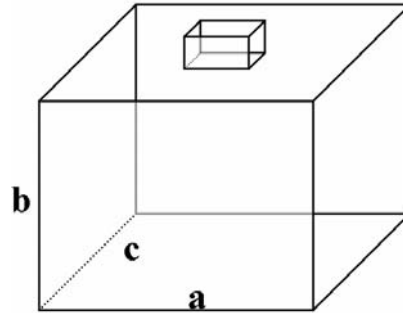


Figura 2.13. Esquema de cavidad rectangular.

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  $E_{lmn}$  y  $H_{lmn}$  que se pueden dar en esta cavidad cumplen con la igualdad:

$$\left(\frac{l\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{d}\right)^2 = \left(\frac{\omega_{lmn}}{c}\right)^2 \quad (2.47)$$

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

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

Cuando las cavidades están parcialmente rellenas, se debe recurrir a métodos numéricos para hallar la distribución de campo en su interior.

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).
  - Perturba la distribución instantánea del campo eléctrico.
  - Generalmente consiste en un ventilador metálico colocado en el interior de la cavidad.

### **3. Generación, medida y simulación de microondas**



### 3. Generación, medida y simulación de microondas.

#### 3.1. Microondas. Generación.

El elemento generador de microondas (a frecuencia entre los Mhz y los Ghz) es el **magnetron** (figura 3.1). Un magnetron es una válvula de vacío que se emplea para generar microondas. Su funcionamiento se basa en el movimiento de los electrones sometidos a un campo eléctrico y magnético, éstos describen órbitas circulares y esa circulación genera oscilaciones de alta frecuencia en cavidades metálicas.

El magnetron está formado por un cátodo caldeado por un filamento, un ánodo y un imán que rodea el conjunto.

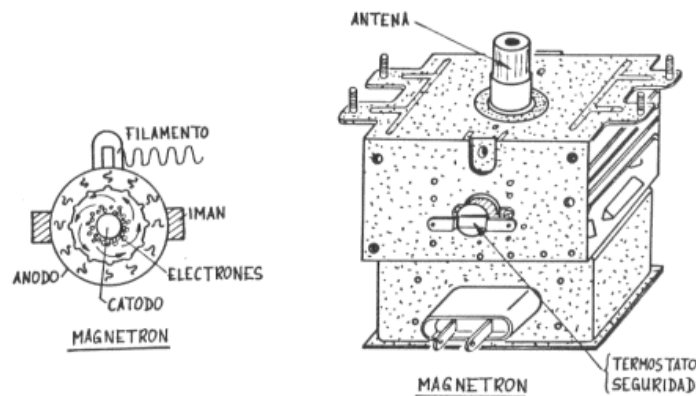


Figura 3.1: Esquema del magnetron de un horno microondas doméstico.

Cuando se aplica tensión al filamento, éste calienta el cátodo y emite electrones que son atraídos por la alta tensión aplicada al ánodo. Los electrones, que en condiciones normales saldrían en línea recta en dirección al ánodo, se ven frenados por el campo magnético y obligados a moverse en una órbita situada entre el ánodo y el cátodo.

El paso de los electrones por las proximidades del ánodo, donde están situadas pequeñas cavidades resonantes, produce oscilaciones de alta frecuencia, entorno a 2.500 Mhz.



Aunque la intensidad electrónica que es capaz de emitir un cátodo es muy pequeña, como la tensión de ánodo es muy grande, la potencia total suministrada es relativamente grande, del orden de Kw. La energía de microondas es radiada por una antena (parte superior de la figura 3.2) dispuesta en el magnetrón e introducida en una guía-onda, launcher (figura 3.4), que la dirige a la cavidad metálica, el horno, pasando también por una guía de paso (figura 3.3):

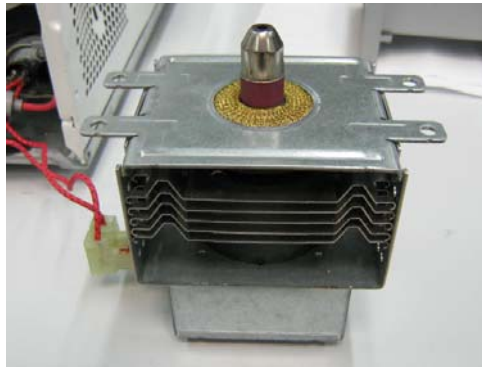


Figura 3.2: Magnetrón.



Figura 3.3: Guía de paso.



Figura 3.4: Launcher.

En la figura 3.5 se puede ver el montaje completo para que la energía emitida por el magnetrón llegue a la cavidad.

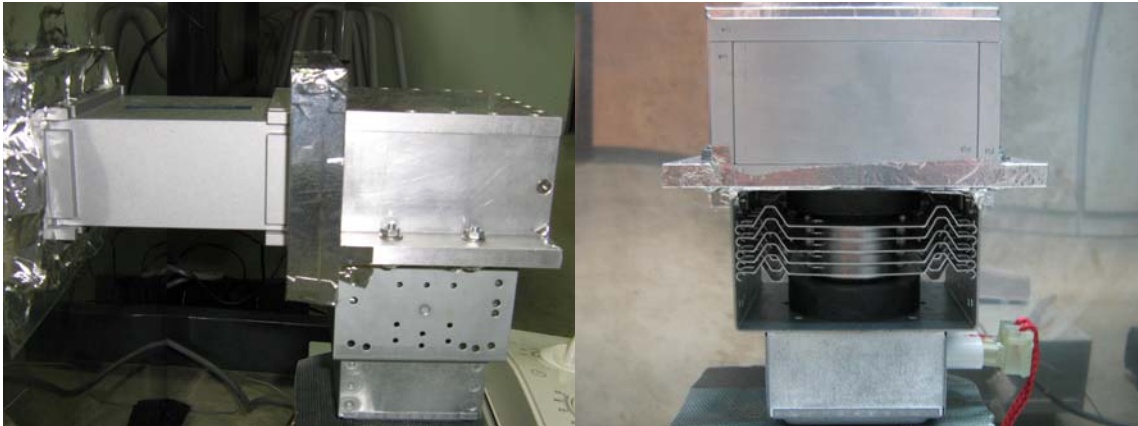


Figura 3.5: Montaje magnetrón-launcher-guía de paso.

### ***3.2. Medida de la energía de microondas.***

La medida de la energía de microondas (en concreto el parámetro  $S_{11}$ ) se ha realizado utilizando un analizador de redes vectorial, que es un instrumento de análisis vectorial, el que se ha utilizado en este proyecto pertenece a la familia de instrumentos de la marca RHODE, concretamente el modelo ZVRE, ver figura 3.6.



Figura 3.6. Analizador de redes vectorial.

Éste permite, entre otras muchas funciones, generar señales de alta frecuencia y chequear la evolución de las mismas en el tiempo o en la frecuencia, consiguiendo resultados a nivel de vector (módulo y fase de las magnitudes medidas).



Mientras el elemento generador de microondas sea este analizador, la potencia de la señal incidente en la cavidad no presentará ningún riesgo para la salud, ya que la potencia que emite este aparato es de 1W y la salida por el puerto 1, que será el usado en este proyecto, es de -10dBm.

### ***3.3. Simulación CAD de la cavidad de microondas.***

Antes de construir la cavidad de microondas se realizó un estudio CAD de su diseño (figura 3.7), con el fin de evitar posteriores modificaciones en la geometría de la cavidad construida, lo que perjudicaría la bondad de las futuras medidas.

Como se desea propagar un número elevado de modos del campo eléctrico en la cavidad, y sabiendo que deseamos una cavidad de sección rectangular que se asemeje a la mayoría de los hornos industriales, las dimensiones del horno son 60x60x60 cm.

Con estas dimensiones la relación sería 1:1:1 de forma que se asegura que se propagan más modos aparte del fundamental.

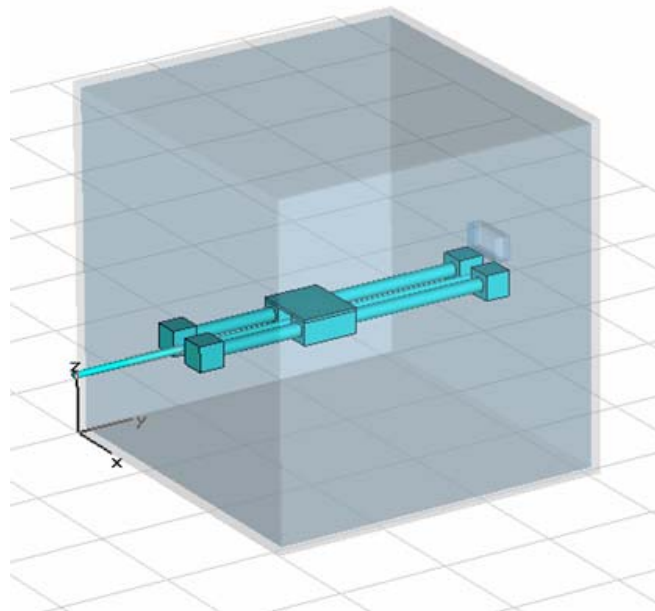


Figura 3.7. Diseño 3D de la cavidad de microondas a construir, con el sistema estructural de posicionamiento incorporado.



El sistema de posicionamiento estructural consiste en un carro que se desliza sobre dos ejes cilíndricos no roscados. Es impulsado gracias al movimiento de rotación de un eje cilíndrico central roscado de menor tamaño y a un prisma rectangular que transforma el movimiento de rotación en movimiento de translación.

### ***3.4. Procedimiento de medida de $|S_{11}|$ .***

El proceso de medida del parámetro  $S_{11}$  incluye la utilización de:

- Una cavidad de microondas,
- Un sistema de medida del parámetro  $S_{11}$ , y
- Un mecanismo de posicionamiento.

A lo largo de este apartado se tratará cada una de estas partes.

#### **Cavidad metálica.**

A partir del diseño anterior se ha construido una cavidad de microondas, de acero inoxidable, como se puede ver en la figura 3.8.



Figura 3.8. Cavidad metálica.





Puesto que se pretende emplear un motor que posicione la pieza en estudio dentro de la cavidad, y no se debe introducir en el interior de la misma por sus componentes activos, tales como las bobinas y la corriente que circula por ellas, que afectarían al campo interno; se ha realizado un orificio en el extremo opuesto al magnetrón.

Ahora bien, para evitar que se produzca una emisión indeseada de campo hacia el exterior de la cavidad, se ha colocado una guía circular de 9 cm de longitud (figura 3.9) que corta el campo electromagnético saliente.

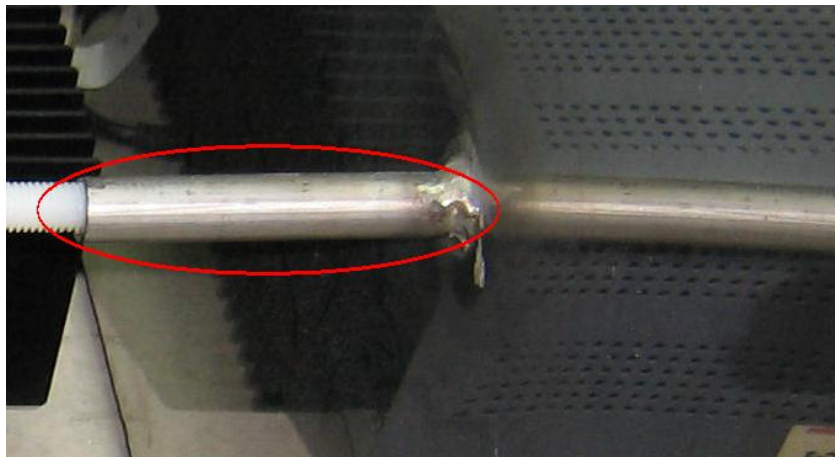


Figura 3.9. Cilindro que cortocircuita la salida del campo.

Para poder acceder al interior de la cavidad e introducir las muestras a calentar en el interior, se ha dejado abierta la parte superior de la cavidad, ésta se sellará con una tapa del mismo material que el resto de la cavidad.



Figura 3.10. Tapa lisa.

Se han utilizado dos tapas del mismo material, una lisa (figura 3.10) para medir el parámetro  $S_{11}$ , y otra perforada (figura 3.11) para poder obtener imágenes térmicas de la muestra cuando se esté trabajando con el magnetrón, es decir, con alta potencia para poder generar calor en el material que hay en el interior de la cavidad.



Figura 3.11. Tapa perforada.

Ambas tapas llevan en las esquinas unos apliques (figura 3.12), también de acero, que impiden que la tapa caiga al interior de la cavidad, lo cual podría causar daños en el sistema de posicionamiento, fabricado en nylon.



Figura 3.12. Detalle de la esquina de las tapas.

Para realizar la medición del parámetro  $S_{11}$  es necesario ‘conectar’ el analizador con la cavidad. La salida del analizador de redes se acopla a la cavidad mediante una guía de onda (figura 3.14), concretamente, la guía presente en el kit de calibración (figura 3.13).

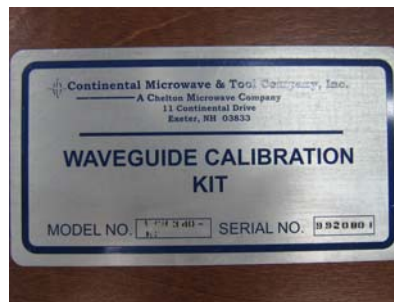


Figura 3.13. Caja con el kit de calibración.

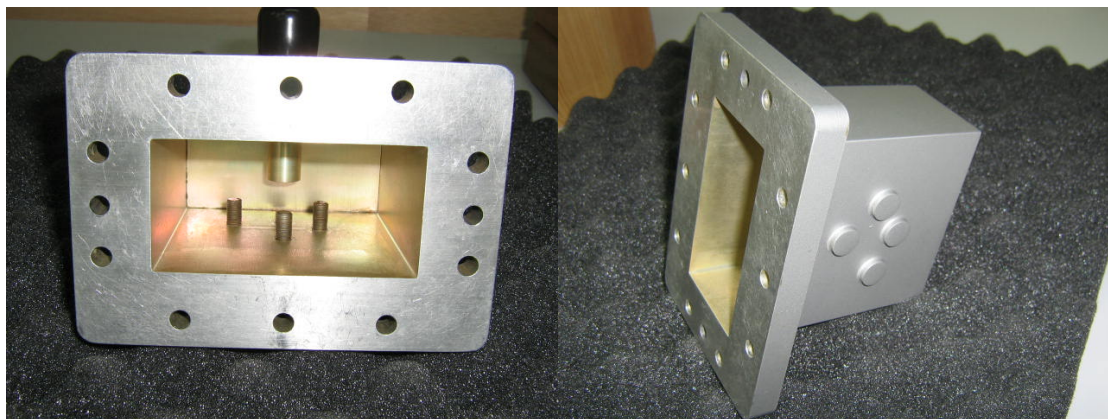


Figura 3.14. Guía de onda que acopla el analizador con la cavidad.



En la siguiente imagen (3.15) se puede ver el acoplamiento entre el analizador y la cavidad mediante la citada guía de onda.

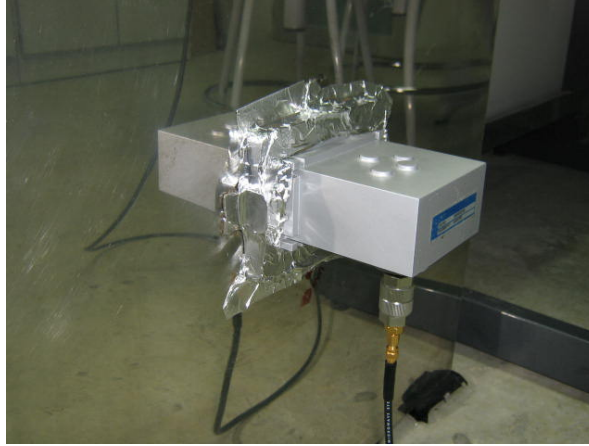


Figura 3.15. Acoplamiento de la cavidad de microondas con el analizador de redes.

### Sistema de medida.

El sistema de medida empleado es el analizador de redes vectorial ZVRE (figura 3.16) ya comentado con anterioridad. El acceso remoto se realiza mediante el conector GPIB de ICS ELECTRONICS, visible en la figura 3.17. Por medio de este conector USB-GPIB se puede controlar remotamente el analizador de redes vectorial.



Figura 3.16. Analizador de redes (cara frontal).



Figura 3.17. Conector GPIB-USB (Analizador, cara trasera).

### Sistema de posicionamiento.

El sistema de posicionamiento está formado por el motor y los elementos estructurales, que son las piezas de nylon que permiten el movimiento de la muestra por el interior de la cavidad (figura 3.18). Los elementos estructurales se han realizado en nylon ya que es un material que apenas afecta al calentamiento ya que prácticamente no absorbe energía, pues presenta un coeficiente de pérdidas con una parte imaginaria muy pequeña:

$$\text{Nylon: } \varepsilon = \varepsilon' + j \cdot \varepsilon'' \left\{ \begin{array}{l} \varepsilon' = 3.02 \\ \varepsilon'' = 0.036 \end{array} \right.$$

Los elementos estructurales del sistema de posicionamiento son tres tubos cilíndricos y un carro deslizante, como ya se ha dicho, hechos de nylon.

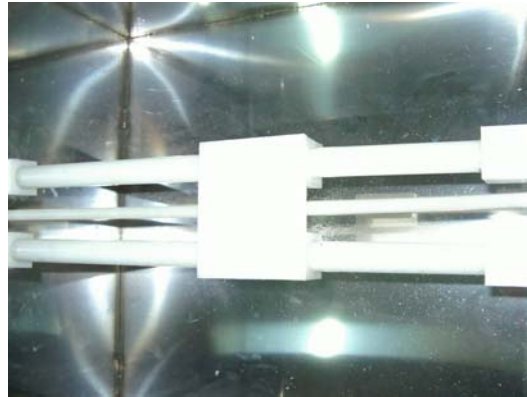


Figura 3.18. Parte estructural del sistema de posicionamiento.

Los dos cilindros de la derecha de la figura 3.19 se emplean como guía para el carro (figura 3.20) que soportará las muestras a estudiar; su diámetro es de 2.5mm. En sus extremos presentan un cubo (figura 3.22 derecha) de 4.5 x 4.5 x 4.5 cm que permite su sujeción con las paredes de la cavidad. El cilindro de la izquierda, de la figura 3.19, es el eje del motor; su diámetro es de 1.2 mm; está roscado y atraviesa una pieza rectangular también roscada.



Figura 3.19. Ejes de nylon.

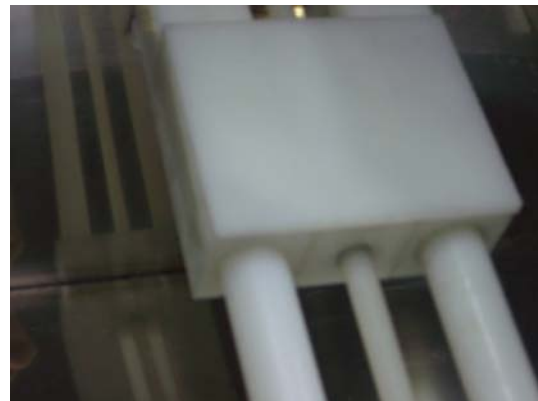


Figura 3.20. Carro deslizante.

La función de esta pieza rectangular de 4 x 4 x 1 cm (figura 3.21) consiste en transformar el movimiento de rotación, proporcionado por el motor, en movimiento de translación del carro. Al final del eje roscado se ha colocado una pieza que impide el pandeo del eje (figura 3.22 izquierda).



Figura 3.21. Pieza que transforma  
rotación en translación.



Figura 3.22. Acoplamiento entre los ejes  
y la cavidad.

El motor es de tipo paso, modelo MAXON DC 1444328 SWISS MODE T11 (figura 3.23). Es controlado por el controlador de la tarjeta de la figura 3.24, conectada mediante RS232 (puerto serie) que muestra la figura 3.25. El paso nos lo da la rosca del eje roscado. En este caso el paso es de 2 mm por cada vuelta de eje.



Figura 3.23. Motor empleado en el  
sistema de posicionamiento.



Figura 3.24. Tarjeta con microcontrolador  
para manejar el motor.



Figura 3.25. Detalle de la conexión RS232  
con la tarjeta, insertada en una caja negra.

El motor está alimentado y controlado mediante una fuente de tensión con doble salida  
(figura 3.26), 15v para el estado alto y 8v para el estado bajo.

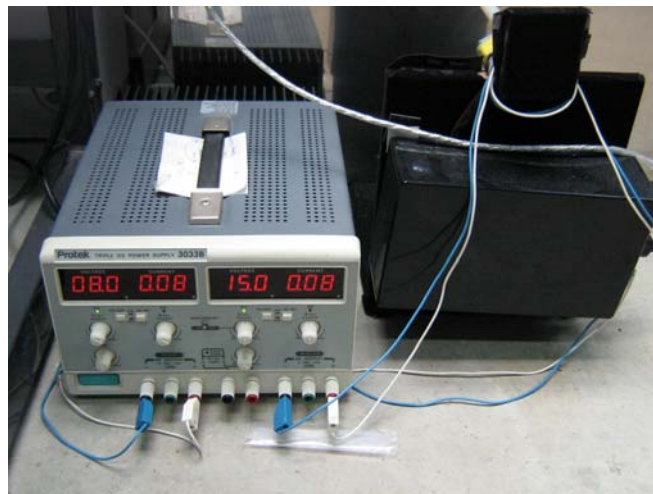


Figura 3.26. Izquierda: Fuente de tensión (15 y 8 v).  
Derecha: 'Caja negra' con la tarjeta controladora.





## Interfaz de control.

Tanto para manejar el analizador de redes como el motor que mueve la muestra, se ha utilizado una interfaz que permite la interacción entre el sistema de posicionamiento y el sistema de medida.

En la imagen 3.27 se muestra la apariencia de la interfaz gráfica:

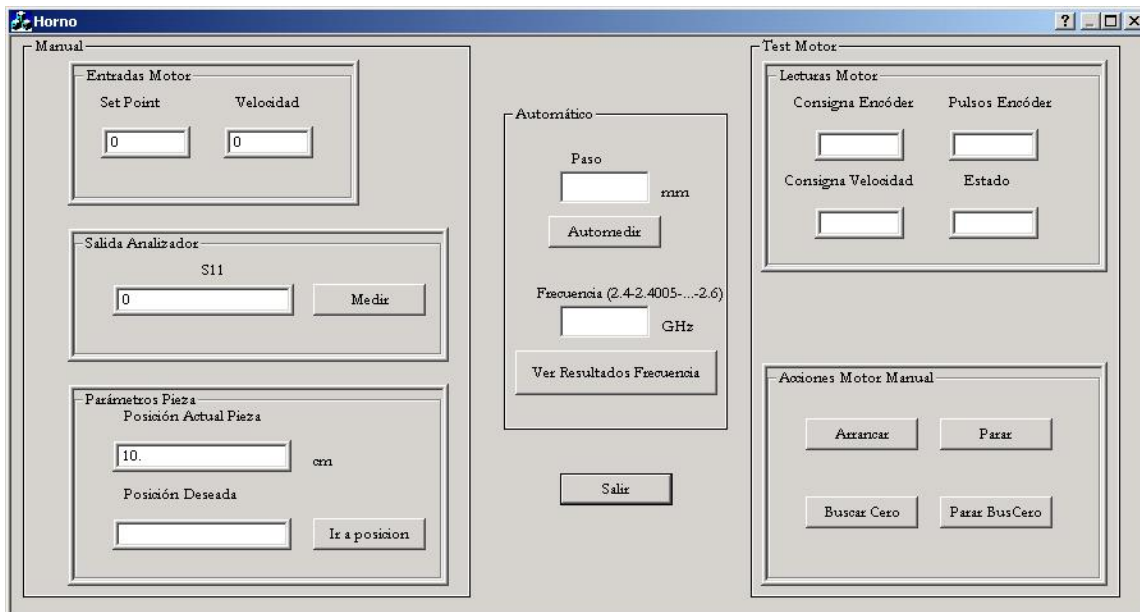


Figura 3.27. Interfaz gráfica.

Esta interfaz se puede dividir en tres partes:

a) Manejo manual del sistema de adquisición (partes izquierda, e inferior-derecha),

Esta primera parte se divide en dos. Un bloque para las acciones del motor (figura 3.28) y un bloque para los cuadros de diálogo (figura 3.29).



Figura 3.28. Control manual del motor.

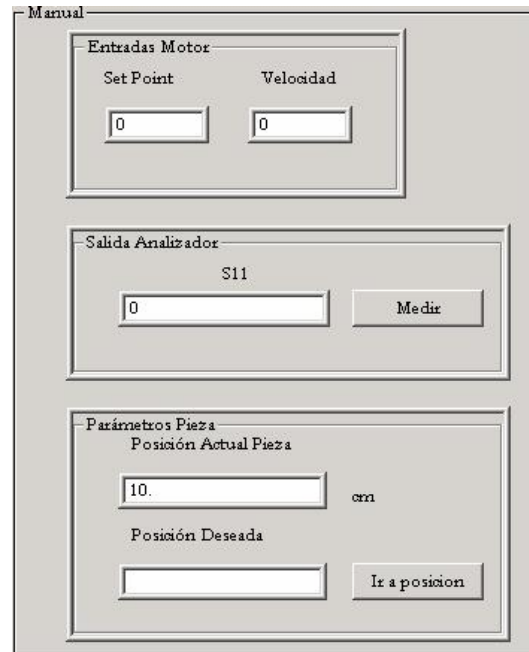


Figura 3.29. Cuadros de diálogo.

b) Manejo automático del sistema de adquisición (zona central),

La segunda parte, el modo automático del sistema de adquisición, se puede ver en la figura 3.30.

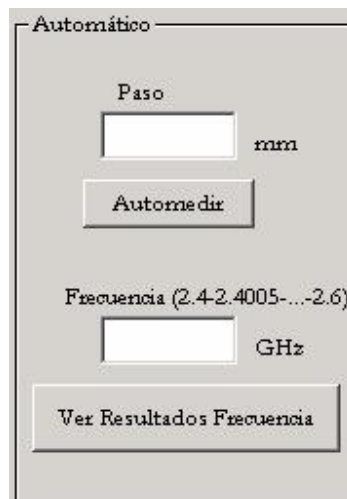


Figura 3.30. Modo automático del sistema de adquisición.



Para proceder al modo automático de medida del parámetro S11 se ha de introducir la distancia (paso) en mm que se desea que haya entre una medida y la siguiente, y después pulsar el botón 'Automedir'. Comienza entonces un proceso donde, cada distancia - paso, se realizan cinco medidas (para mejorar la repetibilidad) del parámetro S11 y se promedia su valor.

c) Características del motor (parte superior-derecha)

Esta parte (figura 3.31) permite chequear visualmente que el sistema motor actúa adecuadamente.

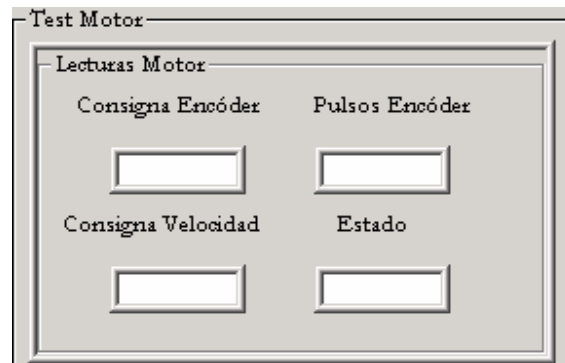


Figura 3.31. Características del motor.

### ***3.5. Procedimiento de medida de alta potencia***

En este apartado se describirán los elementos que se han utilizado para poder realizar las medidas correspondientes a los efectos que producen las microondas a una elevada potencia, como son:

- El magnetrón, de un horno microondas convencional.
- Un "launcher", guía-onda rectangular hecha a medida para conectar el magnetrón con la cavidad metálica.
- Una rejilla metálica que permita tomar imágenes térmicas de la muestra en estudio, al tiempo que impida que la energía de microondas escape de la cavidad.



- Una cámara termográfica, con la que capturar las imágenes térmicas de la muestra para su posterior procesamiento.

## El magnetrón

Puesto que ya se ha explicado, a grandes rasgos, cómo funciona un magnetrón, aquí se tratará de describir el magnetrón que concretamente se ha utilizado en este trabajo, visible en la figura 3.32.



Figura 3.32. Magnetron marca Samsung.

Mediante el analizador de redes vectorial, se ha medido la energía de microondas que genera el magnetron en cuestión, para así poder establecer con exactitud a qué frecuencia se emite la máxima potencia que, como se puede ver en la gráfica de la figura 3.33, sucede a 2,475 Ghz.

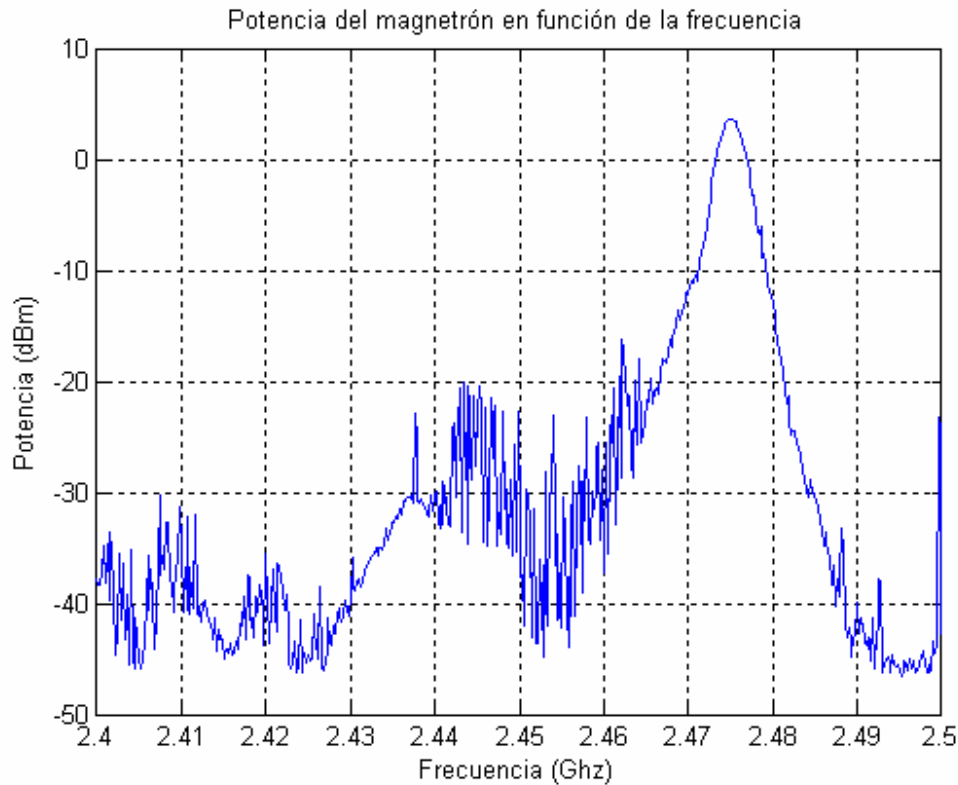


Figura 3.33. Potencia del magnetrón en función de la frecuencia.

## Launcher

La energía de microondas es radiada por una antena dispuesta en el magnetrón, e introducida en una guía-onda, *launcher*, que la dirige a la cavidad metálica.

Esta pieza, el *launcher*, ha sido diseñada específicamente para este trabajo, ya que tenía que haber un acoplamiento lo más perfecto posible con el magnetrón y con las guías rectangulares; porque de lo contrario podría darse alguna fuga de energía, lo cual podría haber sido muy perjudicial para la salud.

La fabricación de esta pieza ha sido llevada a cabo por el Servicio de Apoyo a la Investigación Tecnológica (SAIT), en plancha de aluminio de 8mm de espesor.



A continuación, en las figuras 3.34 a 3.39, se puede observar el diseño de las diferentes partes que conforman esta “guía-onda hecha a medida”.

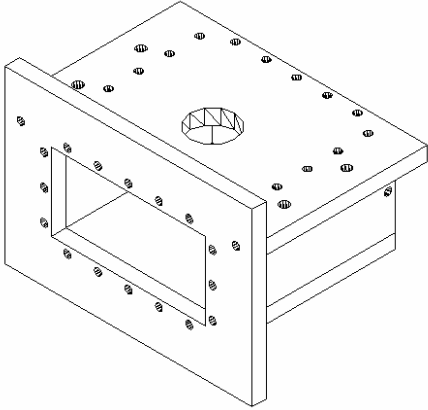


Figura 3.34. Perspectiva delantera superior.

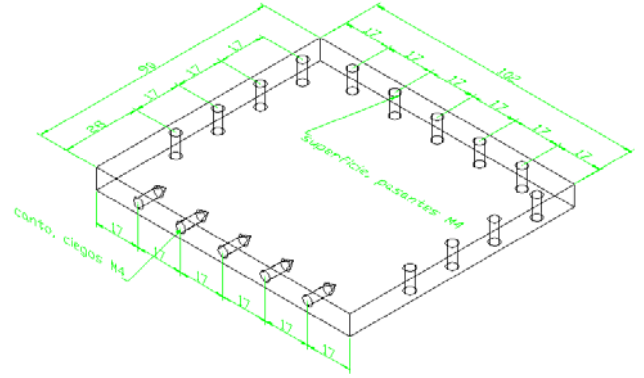


Figura 3.36. Cara inferior.

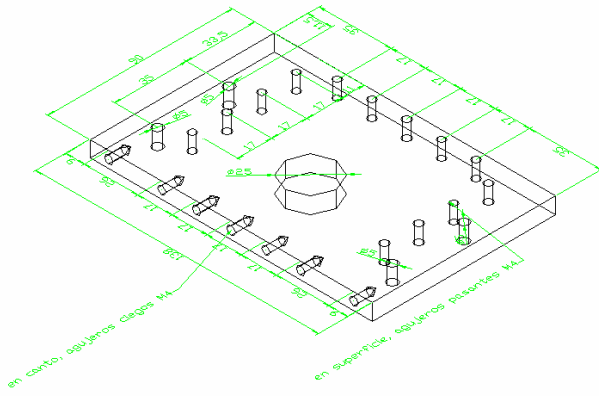


Figura 3.35. Cara superior.

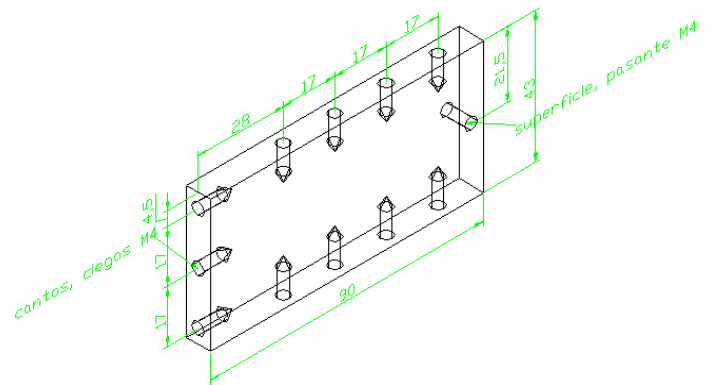


Figura 3.37. Cara lateral (dos unidades).

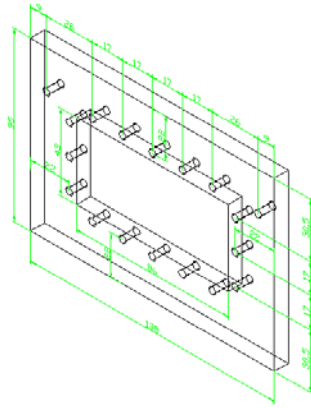


Figura 3.38. Cara frontal.

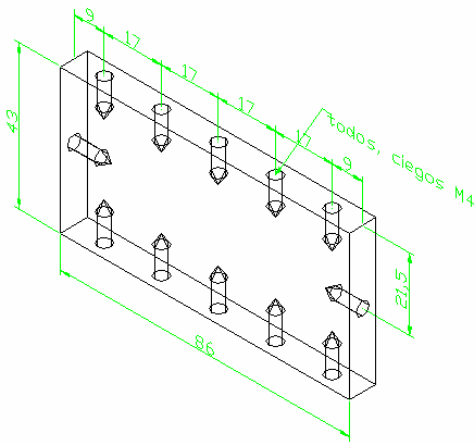


Figura 3.39. Cara trasera.



En la figura 3.40 se puede ver el resultado de este diseño, una guía-onda “hecha a medida”, el launcher que permite inyectar la energía de microondas del magnetrón en el interior de la cavidad.



Figura 3.40: Launcher.

### Tapa perforada y rejilla

Ya se ha comentado que para medir a baja potencia el parámetro  $|S_{11}|$  se ha utilizado una *tapa lisa*. Para trabajar en alta potencia y poder tomar imágenes térmicas se ha tendido que utilizar una *tapa perforada* (figura 3.41) que permita visualizar el interior de la cavidad metálica.



Figura 3.41. Tapa perforada (sin rejilla).





Ahora bien, la perforación realizada en la tapa se ha tenido que cubrir con una rejilla metálica que, manteniendo visible el interior de la cavidad, evitara que la energía de microondas escapara al exterior de la cavidad poniendo en peligro la salud del personal del laboratorio; esto se puede ver en la figura 3.42:



Figura 3.42. Tapa perforada (con rejilla).

Para elegir qué tipo de rejilla había que utilizar se decidió tomar como referencia la que se puede ver en la puerta de cualquier horno microondas doméstico. De manera que se encargó una lámina perforada de acero, con agujeros de 1.2mm de diámetro, el 42% del área perforada, paso I = 1.7mm, paso II = 3.2mm, configuración 60°, y de dimensiones 1000x500cm.

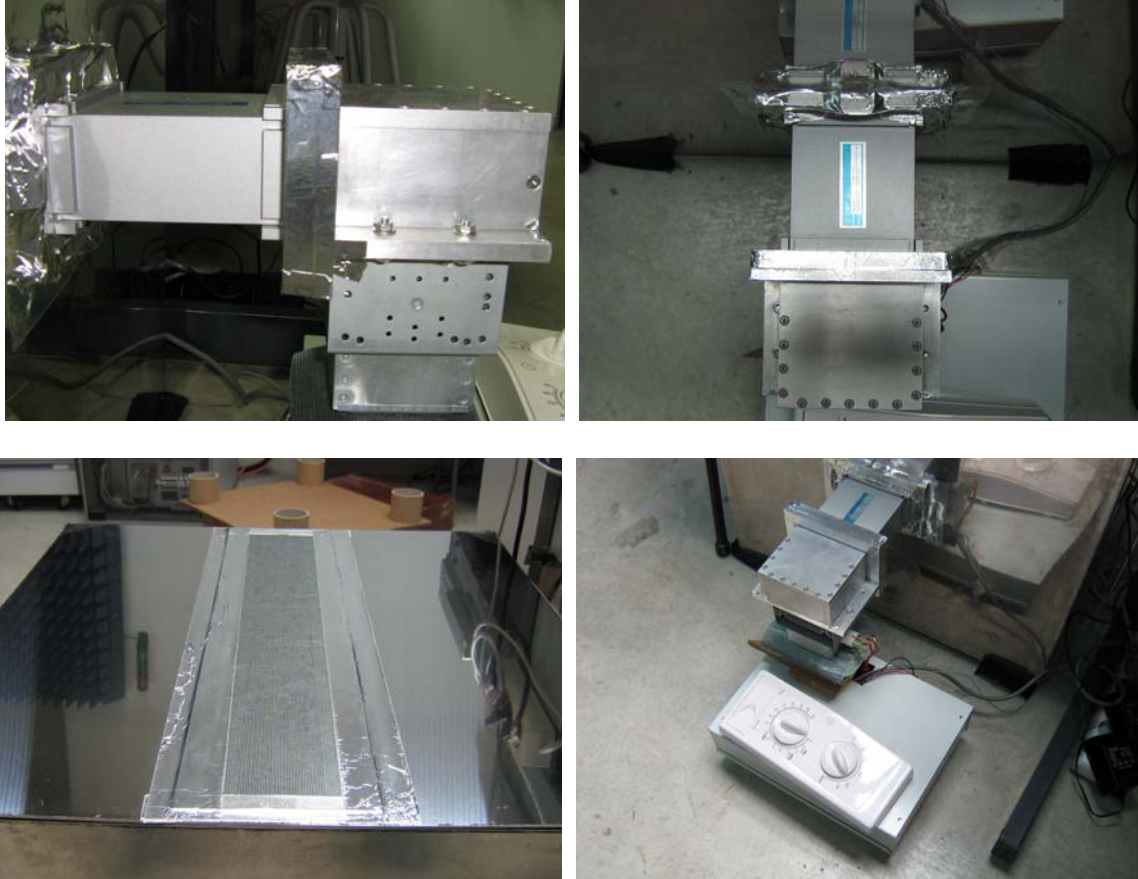


Figuras 3.43 (a-b). Cortado de la rejilla original.

Puesto que las dimensiones de la rejilla original excedían con mucho el tamaño que realmente era necesario, se cortó (figura 3.43) para obtener la rejilla que se acoplaría a la



tapa perforada, el tamaño final es de 13x58cm, ya que la ranura de la tapa perforada es de 6x56cm.



Se debe mencionar también que, una vez preparados todos los elementos y montados debidamente, como se muestra en las imágenes anteriores (figura 3.440); antes de realizar la primera medición trabajando con alta potencia, se preparó una sonda de microondas para asegurar que el montaje era seguro, es decir, no tenía fugas de energía, o que si las había eran inferiores a los niveles de seguridad.

La sonda que se ha utilizado para ello es de “Holaday Industries Inc.”, concretamente el modelo “HI-1501” (figura 3.45), cuyas especificaciones se muestran a continuación, en la figura 3.46:



Figura 3.45. Sonda de microondas.

### 3.0 HI-1501 SPECIFICATIONS

Frequency:	2450 MHZ ( ± 50 MHZ)
Power Range:	0 -100 mW/cm <sup>2</sup>
Accuracy:	± 1 dB
Response Time:	2 - 3 seconds (SLOW) < 1 second (FAST)
Overload Capacity:	Continuous 2000 mW/cm <sup>2</sup>
Dimensions:	2.09 in. (5.3 cm) x 2.68 in. (6.8 cm) x 4.13 in. (10.5 cm)
Probe Length:	12.00 in. (30.5 cm)
Cable Length:	3.3 ft. (1.0 m)
Spacer:	1.97 in. (5 cm), EPS (Expanded Polystyrene - Styrofoam)

Figura 3.46. Especificaciones de la sonda de microondas.

La sonda ha revelado que sí existía fuga de energía, ahora bien, siempre con unos niveles muy inferiores a los límites marcados por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo y el Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales.

Se ha medido en varios puntos del equipo utilizado, y en varias ocasiones puesto que los experimentos se han realizado en varias jornadas, obteniendo como resultado la tabla 3.1, en la que se indican los valores máximo y mínimo que se midieron en los dos puntos en los que se hallaron fugas: a menos de 5cm del magnetrón y a menos de 5cm de la rejilla.

Densidad de potencia		
a menos de 5 cm	(mW/cm <sup>2</sup> )	
	miníma	máxima
magnetrón	0.1	0.8
rejilla	0.4	0.4

Tabla 3.1. Mediciones con sonda de microondas.



Como ya se ha comentado, estos niveles no suponen ningún riesgo para la salud, ya que están muy por debajo de los límites de exposición (tablas 3.2 y 3.3) que se encuentran publicados en la página web del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales ([www.mtas.es](http://www.mtas.es)).

Intervalo de frecuencia MHz	Campo eléctrico V/m	Campo magnético A/m	Densidad de potencia equivalente a ondas planas	
			W/m <sup>2</sup>	mW/cm <sup>2</sup>
0,1 - 1	194	0,51	* 100	* 10
> 1 - 10	194 / f <sup>1/2</sup>	0,51 / f <sup>1/2</sup>	* 100 / f	* 10 / f
> 10 - 400	61	0,16	10	1
> 400 - 2 000	3 f <sup>1/2</sup>	0,008 f <sup>1/2</sup>	f / 40	f / 400
> 2000 - 300 000	137	0,36	50	5

Tabla 3.2. Límites operativos de exposición laboral a RF-MO.

[IRPA/INIRC 1983]

Intervalo de frecuencia MHz	Campo eléctrico V/m	Campo magnético A/m	Densidad de potencia equivalente a ondas planas	
			W/m <sup>2</sup>	mW/cm <sup>2</sup>
0,1 - 1	87	0,23	* 20	* 2
> 1 - 10	87 f <sup>1/2</sup>	0,23 / f <sup>1/2</sup>	* 20 / f	* 2 / f
> 10 - 400	27,5	0,07	2	0,2
> 400 - 2 000	1,375 f <sup>1/2</sup>	0,0037 f <sup>1/2</sup>	f / 200	f / 2000
> 2000 - 300 000	61	0,16	10	1

Tabla 3.3. Límites operativos de exposición del público en general a RF-MO.

[IRPA/INIRC 1983]

En la figura 3.47 se pueden observar los límites de exposición marcados por varias instituciones, los cuales son también sobradamente superiores a las medidas que se realizaron en torno al equipo que se ha utilizado en este trabajo.

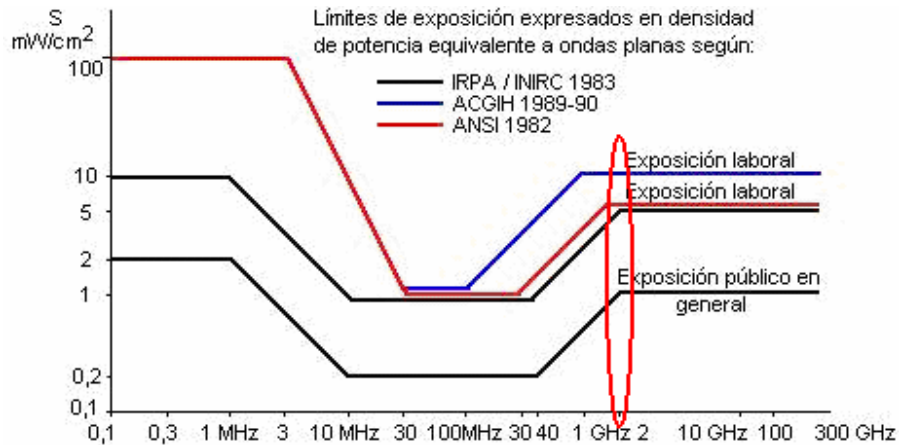


Figura 3.47. Límites operativos de exposición expresados en densidad de potencia. [IRPA/INIRC 1983, ACGIH 1989-90, ANSI 1982]

Se debe hacer hincapié en que se ha medido a menos de 5cm de la fuente de energía de microondas, distancia a la que no se ha expuesto ninguna persona durante los experimentos, por tanto la exposición personal ha sido aún menor de lo que se ha medido con la sonda.

### Cámara termográfica

Como ya se ha comentado anteriormente, se ha utilizado una cámara termográfica (figura 3.48) para generar las imágenes térmicas a partir de las cuales se han obtenido los resultados que se comentarán en el apartado correspondiente.





Figura 3.48. Cámara termográfica.

A continuación se muestran las especificaciones técnicas de la cámara (tabla 3.4), así como las de la PDA (figura 3.5) que lleva incorporada para visualizar y almacenar las imágenes térmicas.

<b>Specifications (Cyclops PPM+ Thermal Imager)</b>	
<b>Imaging Performance</b>	
Temperature range	0 to 300°C based on blackbody temperature
Measurement accuracy	2% or 2°C
NETD	100mK at 30°C
Detector array format	320 x 240 pixeles
Detector	BST uncoded focal plane array
Spectral response	7 to 14µm
A/D resolution	12 bits
Frame frequency	60 Hz (NTSC) / 50 Hz (PAL)
<b>Optical</b>	
Field of view	18° x 13.5°
Manual focus range	460 mm / 18 in to infinity
Aperture	f1.0
IFOV	0.98 mrad
<b>Physical and Environmental</b>	
Dimensions (WxHxD)	140 x 152 x 254 mm
Weight	2 kg
Operating temperature range	0 to 45°C
Storage temperature range	-20 to 60°C
Operatin humidity	0 to 95% (non-condensing)
EMC	Complies with: EN50082-2 (immunity) EN50081-1 (emissions)

Tabla 3.4. Especificaciones de la cámara termográfica.



<b>Specifications (Compaq iPAQTM)</b>	
<b>Performance</b>	
Operating System	Windows® powered pocket PC
Processor	206 Mhz Intel StrongARM 32 bit RISC processor
Display type	Colour reflective thin film transistor (TFT) LCD
Display size	58 x 77 mm
Resolution	240 x 320 pixels
RAM	32 MB
ROM	16 MB
<b>Physical and Environmental</b>	
Dimensions (WxHxD)	84x130x16 mm
Weight	164 g
Operating temperature range	0 to 40°C
Storage temperature range	-20 to 60°C
Operatin humidity	0 to 90% (non-condensing)
EMC	Complies with: EN50082-2 (immunity) EN50081-1 (emissions)

Tabla 3.5. Especificaciones de la PDA conectada a la cámara.

Con esta cámara, se ha tomado una imagen térmica antes, y otra después de aplicar la energía de microondas a la muestra en estudio, es decir, antes y después de calentarla. Analizando esas dos imágenes se ha obtenido cuánto se ha calentado la muestra en el tiempo que ha estado expuesta a las microondas.

El programa informático que se ha utilizado para el análisis de las imágenes térmicas es el “WinLips PPM+”, el cual viene en un CD que acompaña a la cámara termográfica.

## **4. Resultados experimentales**





#### 4. Resultados experimentales.

Los resultados que se muestran a lo largo de este apartado, se han extraído de los experimentos que se han estado realizando con cuatro muestras. En las siguientes imágenes se pueden ver estas muestras en la posición que han ocupado sobre el *carro deslizante* de nylon dentro de la cavidad a la hora de ser expuestas a la energía de microondas:



Figura 4.1. Muestra A, madera.



Figura 4.3. Muestra C, poliéster.

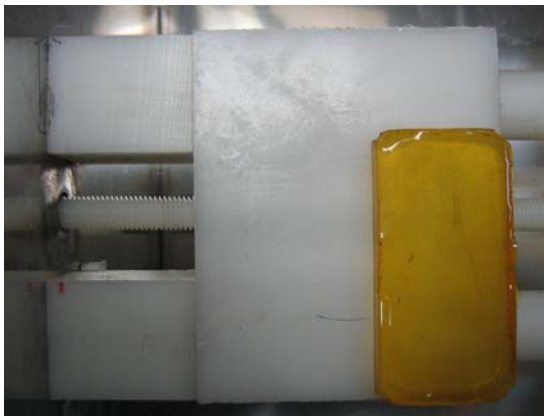


Figura 4.2. Muestra B, epomar.

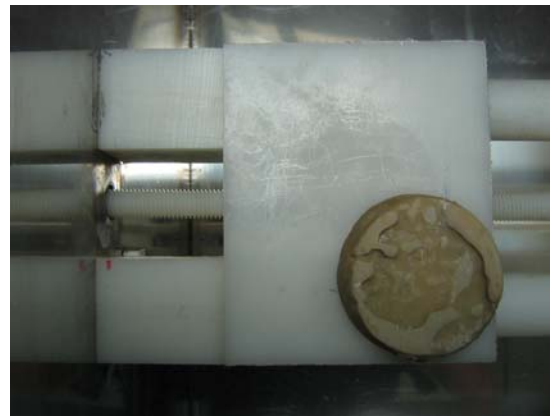


Figura 4.4. Muestra D, epomar.



En la siguiente tabla (4.1), se resumen las características, tanto físicas como dieléctricas de cada una de las cuatro muestras anteriores.

Muestra	Dimensiones (cm)	Permitividad	
A	Madera	4.0 x 5.2 x 1.0	1.99-j0.19
B	Epomar	4.3 x 8.6 x 1.0	4.3825-j0.4986
C	Poliéster	4.3 x 8.6 x 1.0	4.5488-j1.4986
D	Epomar	Diámetro: 5.5. Espesor: 2.5	4.3825-j0.4986

Tabla 4.1. Dimensiones y características dieléctricas de las muestras.

Antes de someter las muestras a energía de microondas de alta potencia (equivalente a la que se usa habitualmente en procesos de secado y calentamiento), se ha realizado previamente el mismo experimento en baja potencia (con el analizador de redes vectorial), para tener así un referente con el que comparar los resultados de alta potencia que se conseguirían más adelante.

#### ***4.1. Medidas en baja potencia.***

Así, para cada muestra se han obtenido dos curvas que representan la evolución del parámetro  $S_{11}$ , éstas se pueden observar en las cuatro figuras que se muestran a continuación (4.5, 4.6, 4.7, 4.8), gráficos en los que el eje vertical indica el valor del módulo del parámetro  $S_{11}$ , mientras que el eje horizontal representa la posición de la muestra en el eje de desplazamiento; comienza en 100 y termina en 500 mm a causa de las piezas que sirven de acoplamiento entre los ejes y la cavidad metálica (figura 3.22), que tienen una longitud de 100 mm.

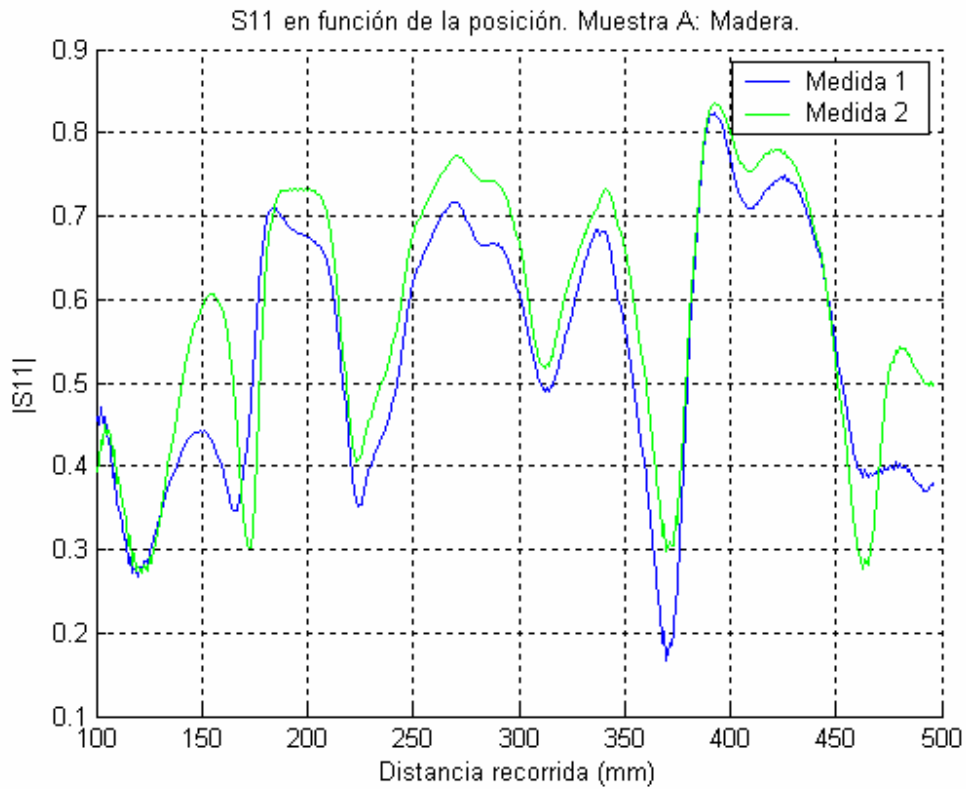


Figura 4.5. Muestra A (madera) -  $S_{11}$ .

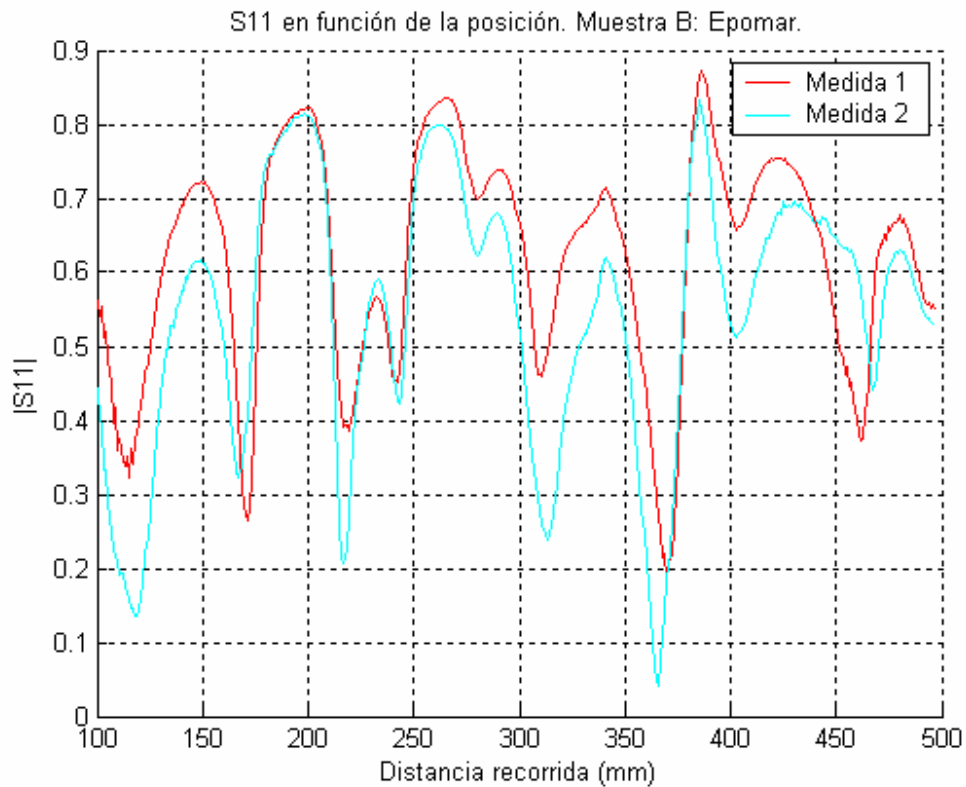


Figura 4.6. Muestra B (epomar) -  $S_{11}$ .

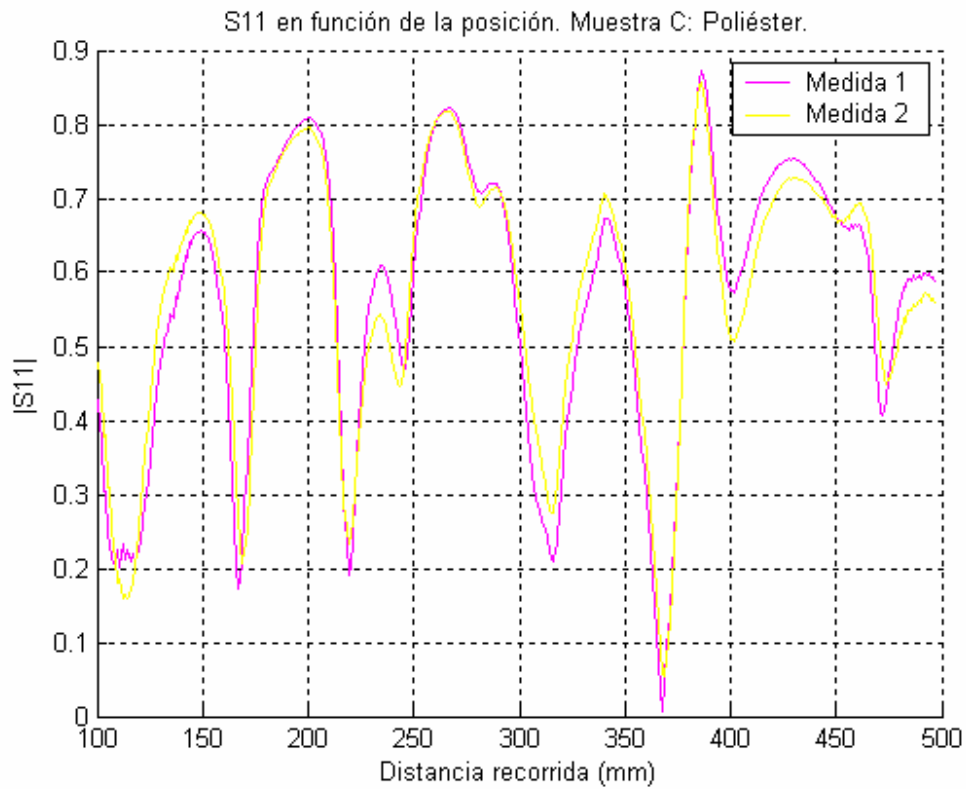


Figura 4.7. Muestra C (poliéster) -  $S_{11}$ .

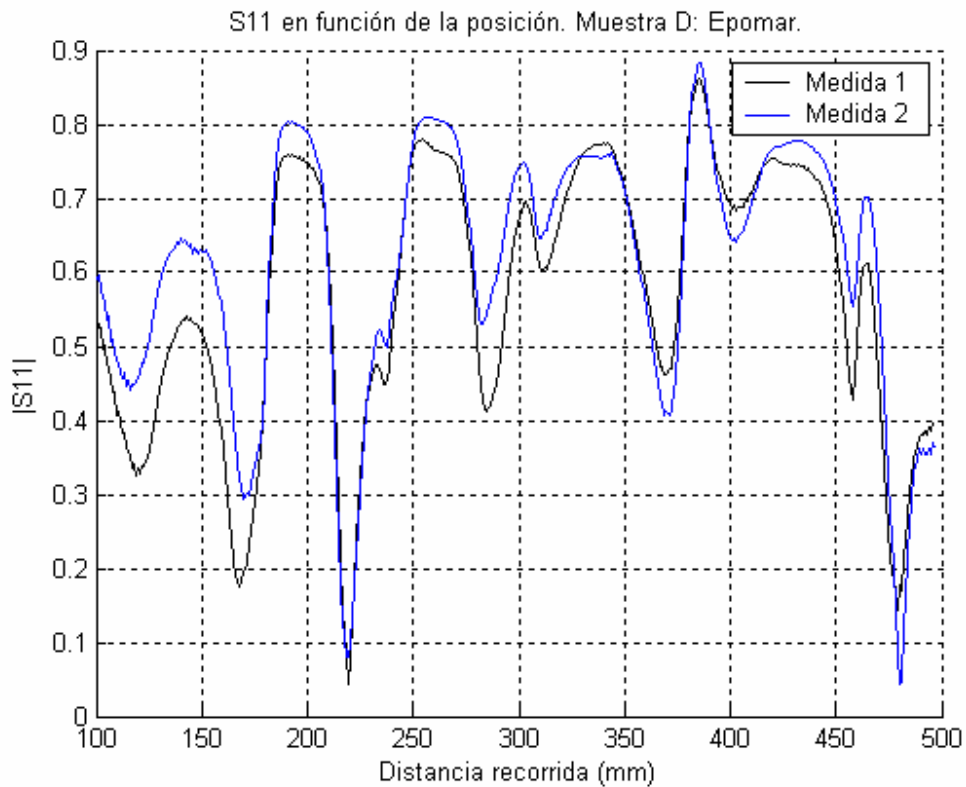


Figura 4.8. Muestra D (epomar) -  $S_{11}$ .



Estas cuatro gráficas se compararán más adelante con las curvas obtenidas a partir de los experimentos en alta potencia, curvas que se obtendrán utilizando un *sensor de temperatura*.

Ahora bien, sí se puede comparar entre sí la evolución del parámetro  $S_{11}$  para cada muestra, como se puede ver en el siguiente gráfico (figura 4.9):

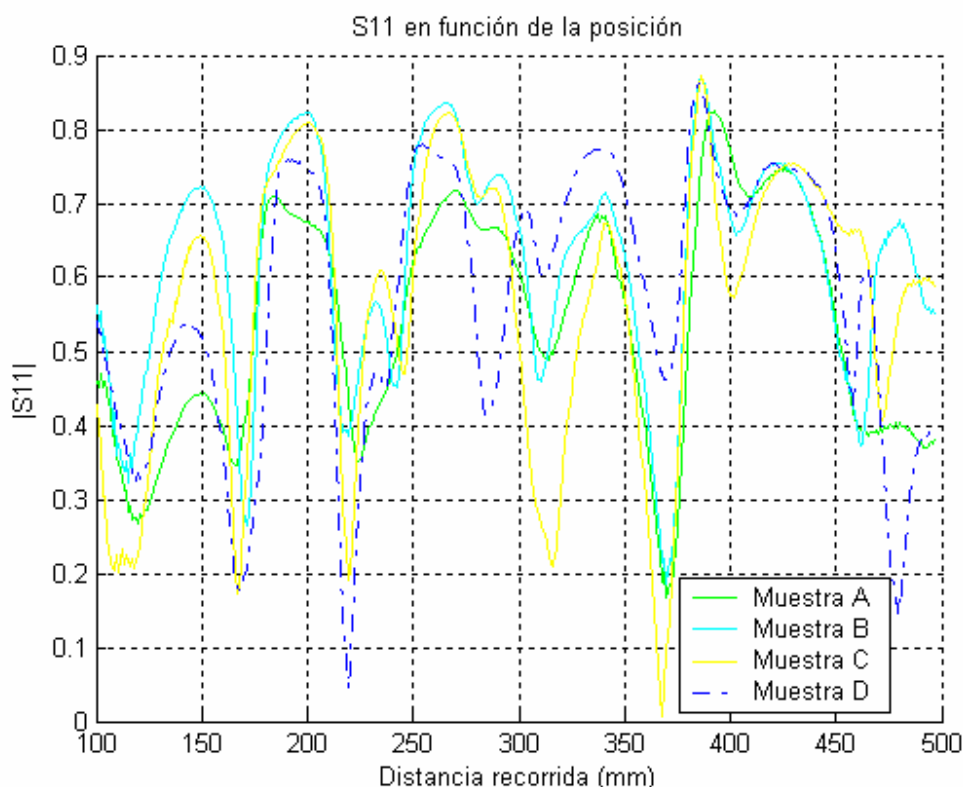


Figura 4.9. Comparativa de  $S_{11}$  de cada muestra.

A partir de este gráfico se puede decir que todas siguen la misma tendencia, a excepción de la muestra D, debido a que su forma geométrica (cilindro) es totalmente distinta a la de las otras tres muestras (prismas rectangulares).

También se puede observar cómo las muestras A, B y C tienen el mínimo valor de  $|S_{11}|$  en la misma 'Distancia recorrida', entorno a los 370 mm. Se puede decir que la única diferencia entre estas tres curvas es el valor de  $S_{11}$ , propio del material de cada muestra, mientras que la distribución de máximos y mínimos es la misma, caracterizado por la forma geométrica que comparten las tres muestras.



Por tanto las gráficas anteriores se pueden resumir en la siguiente tabla (4.2), en la que se señalan, para cada muestra, las 'Distancias recorridas' en las que se encuentran los máximos y los mínimos del parámetro  $S_{11}$ .

Muestra							
A		B		C		D	
M1	370	M1	370	M1	368	M1	218
M2	370	M2	366	M2	369	M2	219
M3	370	M3	368	M3	368.5	M3	218.5
P1	393	P1	386	P1	386	P1	385
P2	393	P2	385	P2	386	P2	385
P3	393	P3	385.5	P3	386	P3	385

Tabla 4.2. Máximos y mínimos (baja potencia).

*Nota:*

*M1: mejor valor de  $S_{11}$  de la medida 1*

*P1: peor de valor de  $S_{11}$  la medida 1*

*M2: mejor valor de  $S_{11}$  de la medida 2*

*P2: peor de valor de  $S_{11}$  la medida 2*

*M3: media de  $S_{11}$  de M1 y M2*

*P3: media de P1 y P2*



## ***4.2. Sensor de temperatura.***

El sensor de temperatura que se ha utilizado es una cámara termográfica, la cual se puede observar en la figura 3.48 del apartado anterior.

Las imágenes térmicas tomadas con esta cámara termográfica se pueden visualizar en la pantalla de una PDA conectada a la cámara. Es en la memoria de dicha PDA en la que se almacenan las imágenes capturadas con la cámara. En la figura 4.10 se aprecia más claramente la configuración cámara-PDA:



Figura 4.10. Detalle cámara - PDA.



### Calibración de la cámara termográfica – Efecto de atenuación de la rejilla.

Ha sido necesario realizar primeramente una serie de mediciones con la cámara termográfica y la rejilla metálica (figuras 3.42 y 3.43), para evaluar hasta qué punto dicha rejilla perturbaba la medida de la temperatura de la muestra en cuestión.

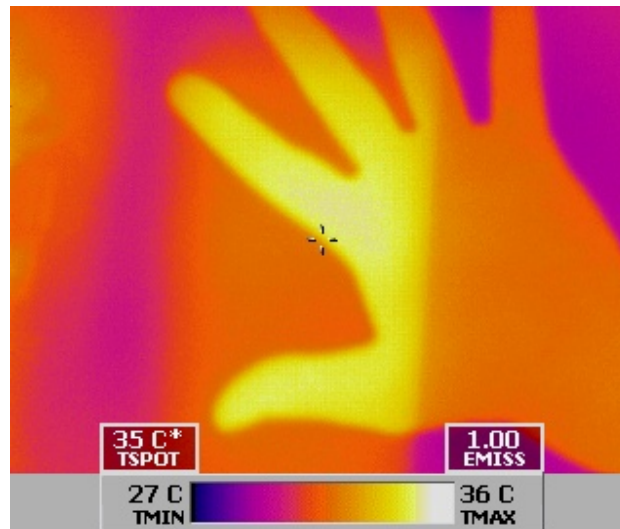


Figura 4.11. Perturbación de la rejilla metálica.

En la imagen anterior (4.11.) se puede observar la imagen térmica de una mano tapada parcialmente por la rejilla metálica, que cubre la parte derecha de la imagen. Así se puede comprobar la influencia que la rejilla metálica ejerce en la temperatura medida por la cámara termográfica, se puede ver cómo la parte derecha de la imagen corresponde a temperaturas menores que las de la parte izquierda.

Para determinar en qué medida la rejilla provoca interferencias se han realizado varias mediciones utilizando la muestra C (poliéster). Estas mediciones han consistido en varias exposiciones de la muestra a la energía de microondas, y posteriormente medir la temperatura media que alcanzaba, utilizando la cámara termográfica de manera directa y a través de la rejilla metálica.

Así, en la siguiente tabla (4.3) se pueden observar los datos obtenidos de medir la temperatura media, directamente sin rejilla (Sin); y con la rejilla por medio (Con); además de la diferencia de estos dos datos (C-S):





Cámara térmica	T media	0 seg. Reposo	10 seg. a 600w	20 seg. a 600w	30 seg. a 600w	40 seg. a 600w	50 seg. a 600w
	Sin	29,4	34,6	35,3	44,0	50,5	51,7
Con	30,3	32,6	32,4	36,3	40,2	41,1	
C-S	0,9	-2,0	-2,9	-7,7	-10,3	-10,6	
Tspot	30,0	32,0	33,0	42,0	49,0	51,0	
Termometro		25,6	28,9	30,5	37,5	43,4	46,3
		25,6	39,3	47,4	58,0	78,3	82,6

Tabla 4.3. Atenuación de la rejilla metálica.

De esta tabla se puede extraer que el efecto provocado por la rejilla en la lectura de la temperatura es una disminución de la misma. Y se puede ver claramente en la siguiente gráfica (figura 4.11) que esta diferencia aumenta conforme aumenta el tiempo de exposición, o lo que es lo mismo, la temperatura que alcanza la muestra.

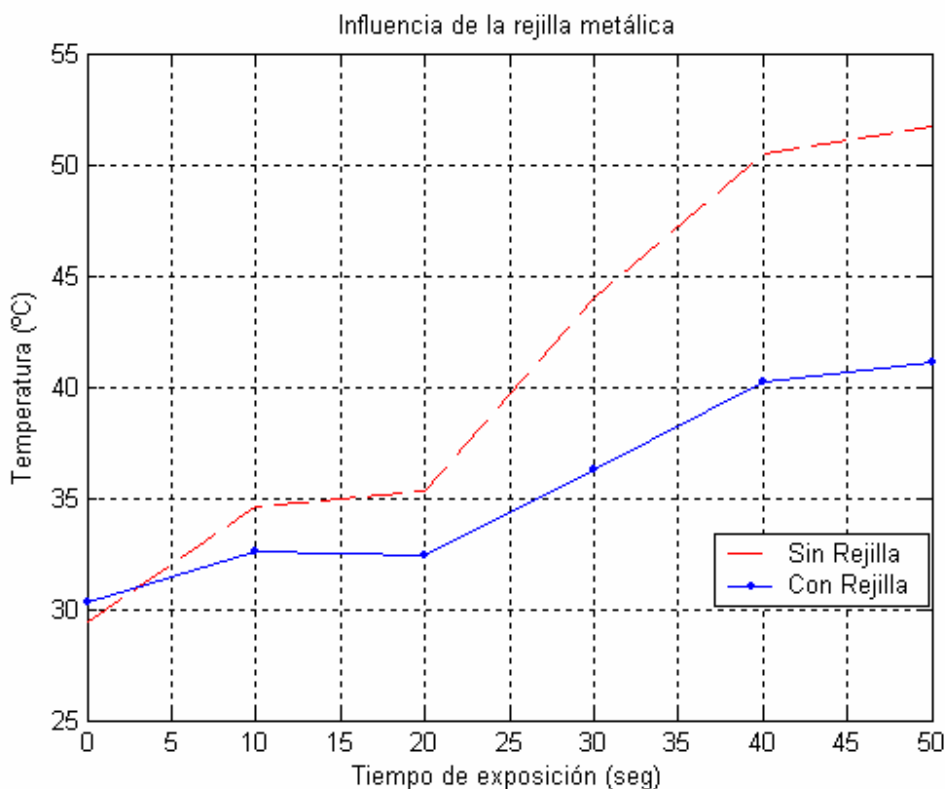


Figura 4.11. Efecto de la rejilla metálica sobre lectura de cámara termográfica.



Este descenso de la temperatura medida a través de la rejilla, responde al hecho de que la rejilla reduce la cantidad de luz recibida por la cámara termográfica.

También se puede observar en la figura 4.11, cómo en el primer punto (*0 segundos, reposo*) la diferencia es justamente a la inversa, es decir, la temperatura medida a través de la rejilla, es mayor que la detectada directamente. Esto se debe al estado de reposo de la muestra, en el que emite tan poca energía calorífica que la propia luz ambiental que se refleja en la rejilla provocaba errores en la medida. Es por ello que para realizar las medidas de temperatura propias del trabajo se colocaron paneles que evitaran los errores producidos por la luz ambiental, que se reflejaba tanto en la rejilla como en las paredes internas de la cavidad metálica.

### ***4.3. Curvas de calentamiento.***

Antes de comenzar con las curvas de calentamiento propiamente dichas, cabría comentar algunos detalles sobre la frecuencia de trabajo del magnetron que se ha empleado en los diferentes experimentos.

#### **Espectro de frecuencia del magnetron.**

Teóricamente el magnetron que se ha utilizado para calentar las diferentes muestras emite la energía de microondas en la frecuencia de 2.450 Mhz. En la práctica, dicho magnetron no se encontraba centrado exactamente en esa frecuencia como se puede observar en la siguiente imagen, la figura 3.33 *aquí repetida*, en la que se podía ver que la máxima potencia se obtiene a una frecuencia de 2.475 Mhz:

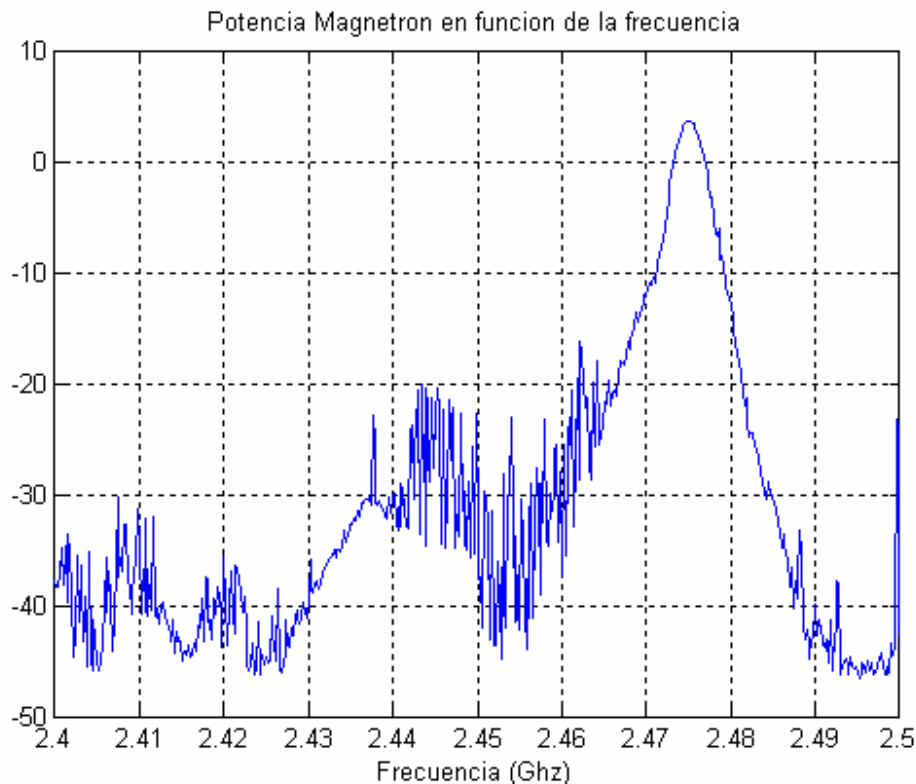


Figura 3.33. Potencia del magnetrón en función de la frecuencia.

Este gráfico se ha obtenido analizando la emisión del magnetrón mediante el analizador de redes vectorial, visible en la figura 3.6.

### Curvas de calentamiento.

Para llevar a cabo las sucesivas exposiciones de las muestras a la energía de microondas emitida por el magnetrón de un horno microondas convencional, se ha seleccionado una potencia de 600 watos en el magnetrón y el tiempo de exposición se ha limitado a no más de 60 segundos, para evitar que el nylon del que está compuesto el sistema de posicionamiento (figuras 3.18 a 3.22) sufriera daños por un calentamiento excesivo, ya que se ha comprobado que con esta potencia el nylon comienza a fundirse en aproximadamente 3 minutos.

En la siguiente imagen (figura 4.12) se puede ver un ejemplo de ello. A la derecha una pieza idéntica al eje roscado que forma parte del sistema de posicionamiento, y en la



izquierda una pieza idéntica después de ser expuesta a la energía de microondas durante aproximadamente tres minutos a 600 W.

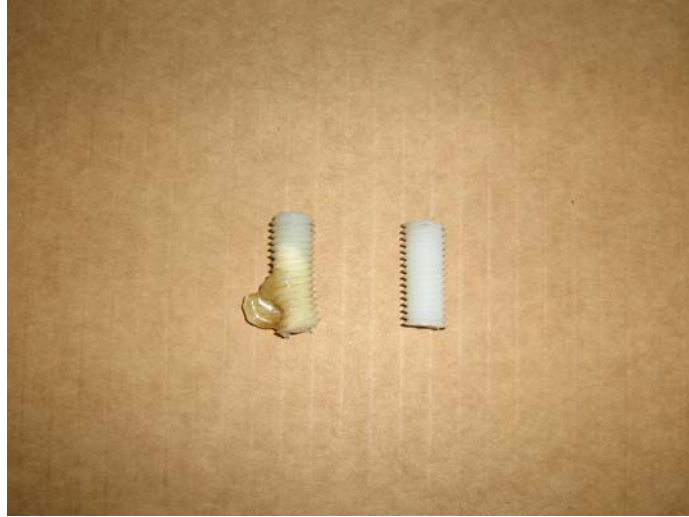


Figura 4.12. Nylon fundido por microondas.



Las *curvas de calentamiento* se han realizado mediante sucesivas exposiciones de las muestras a la energía de microondas; primeramente se ha realizado la medida del incremento de la temperatura media de la llamada *muestra C*, de manera que el resultado puede resumirse en la siguiente figura (4.13):

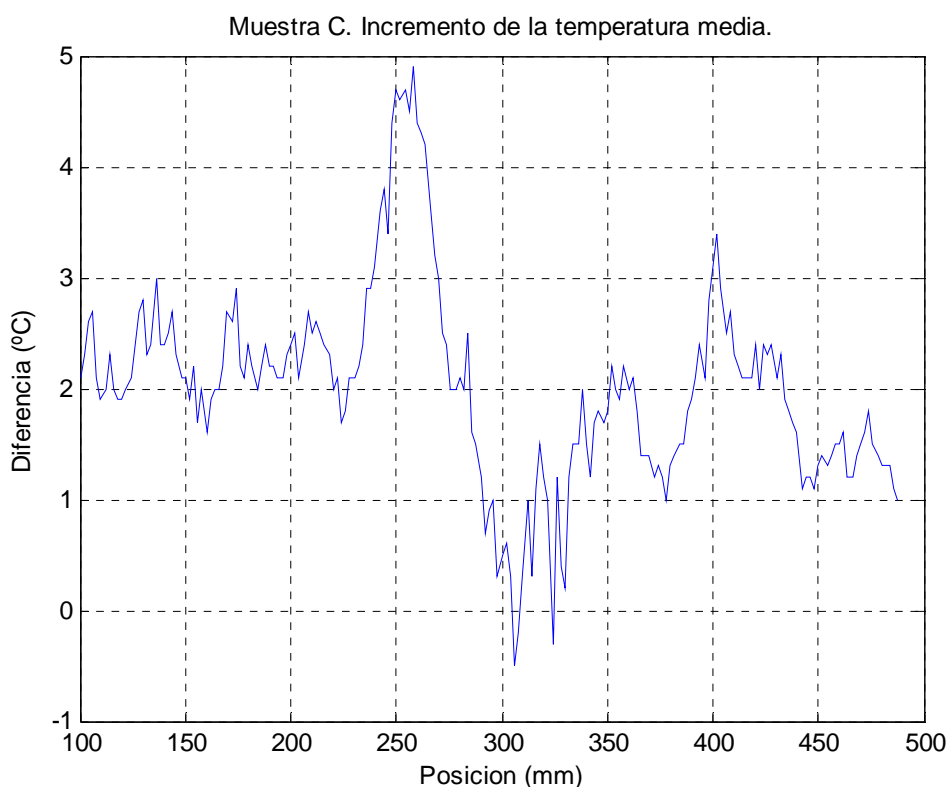


Figura 4.13. Incremento de la temperatura media de la muestra C

Las *curvas de calentamiento* referentes a las demás muestras se han realizado comenzando a una distancia del magnetrón de 200 mm, avanzando en pasos de 4 mm, y terminando a 356 mm; lo que hace un total de 40 posiciones diferentes en las que ha sido expuesta cada muestra.

Se han escogido estos límites por los resultados que se pueden observar en la figura 4.13, en dicho intervalo se encuentran recogidos tanto el mejor como el peor valor del incremento de la temperatura media.

En las cuatro figuras siguientes se puede observar cómo ha afectado la energía de microondas a cada una de las muestras, en ellas se muestra la temperatura media, indicada por la cámara termográfica, antes (azul) y después (rojo) del proceso de calentamiento:



Muestra A. Temperaturas antes y después.

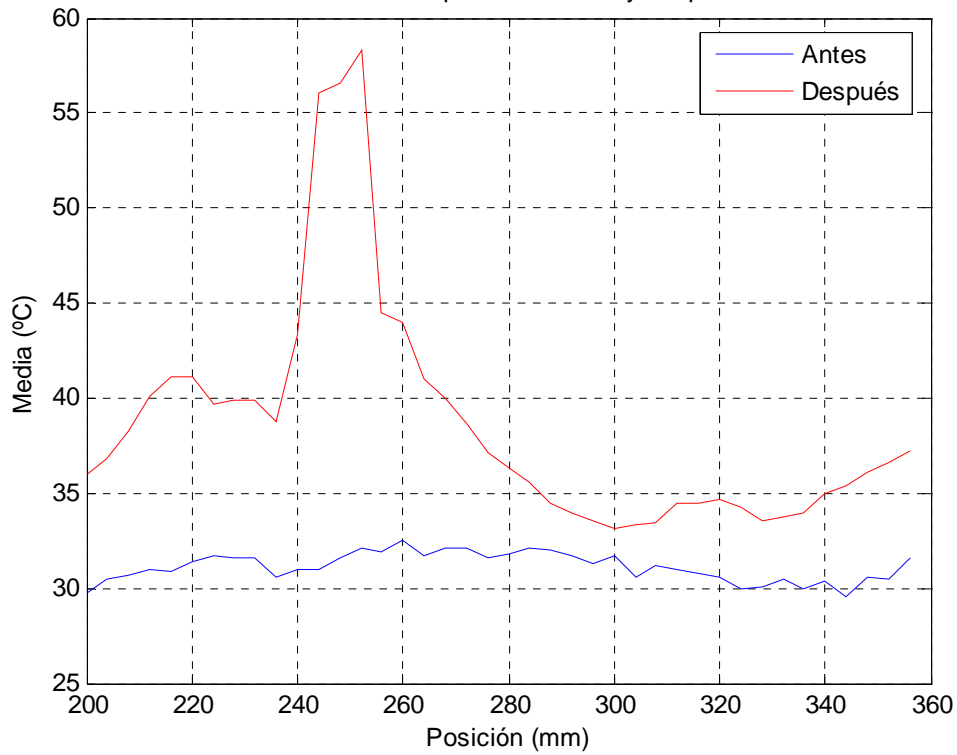


Figura 4. 14. Muestra A: temperatura antes y después de calentar.

Muestra B. Temperaturas antes y después.

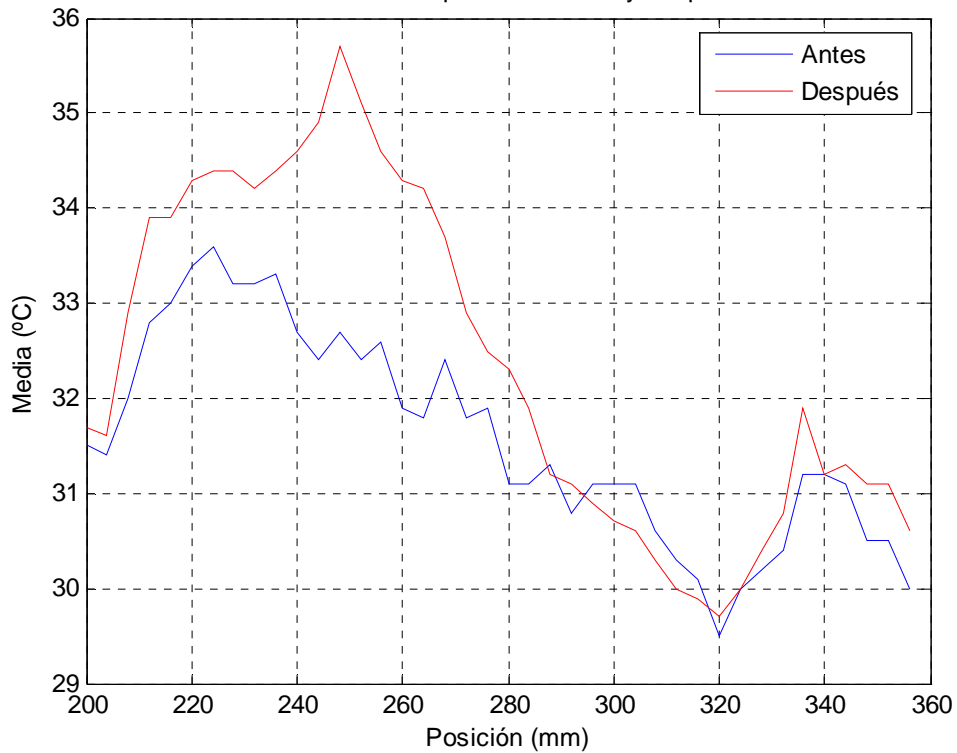


Figura 4. 15. Muestra B: temperatura antes y después de calentar.

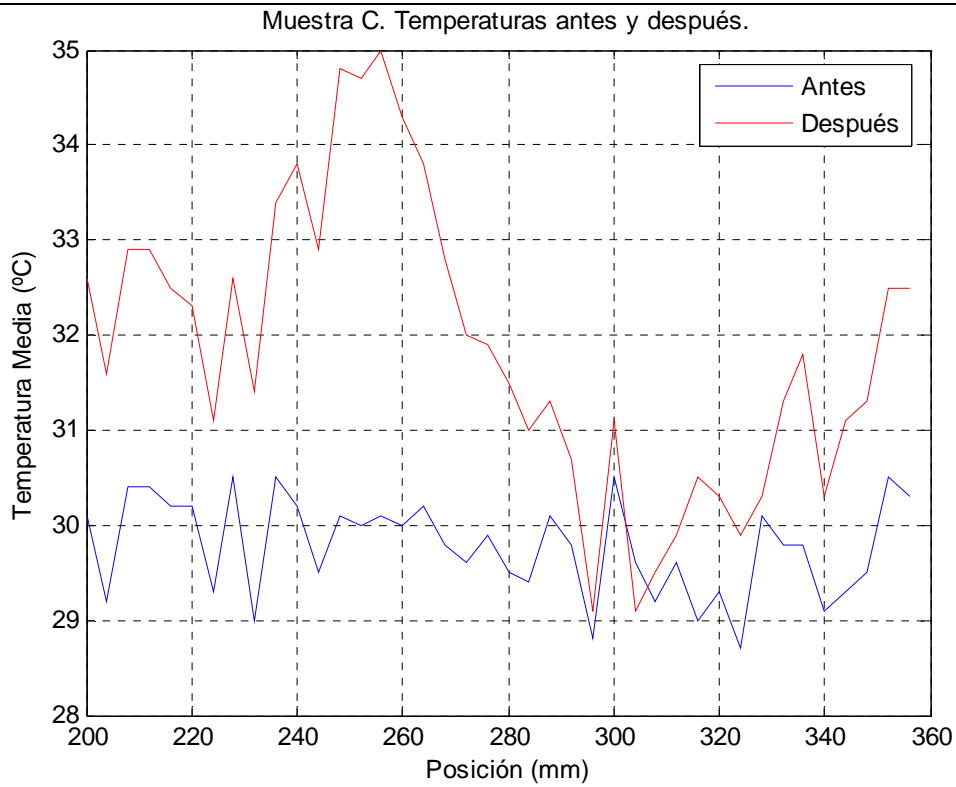


Figura 4. 16. Muestra C: temperatura antes y después de calentar.

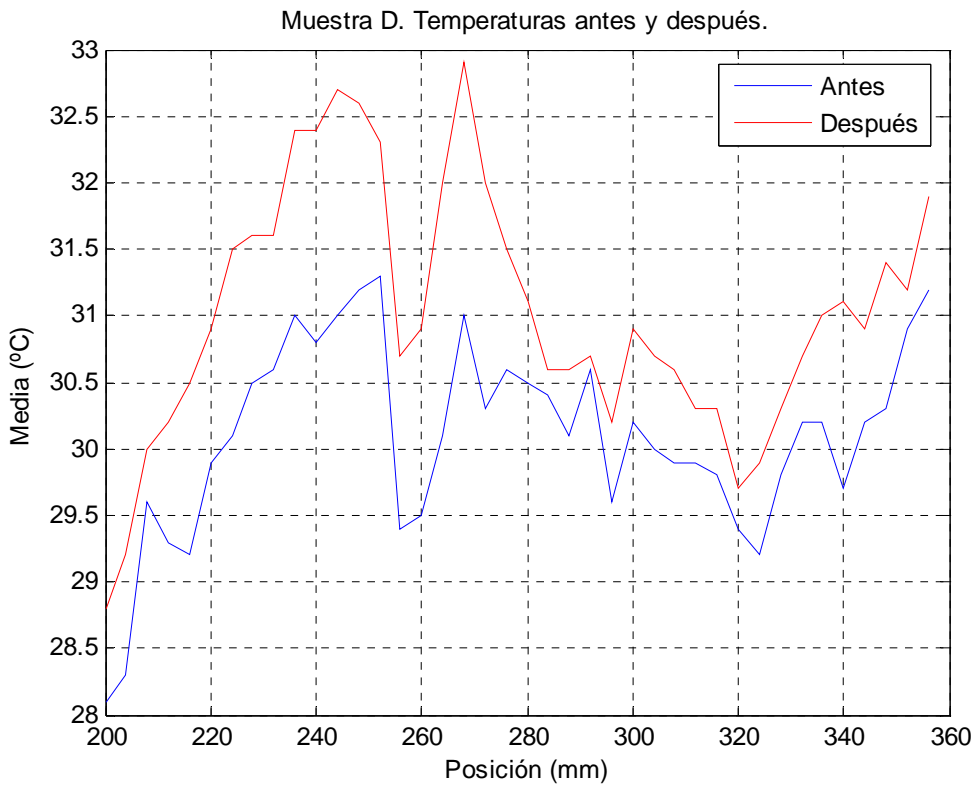


Figura 4. 17. Muestra D: temperatura antes y después de calentar.



#### 4.4. Análisis de uniformidad.

A partir de los gráficos anteriores se puede extraer el incremento de la temperatura media que ha experimentado cada una de las cuatro muestras: muestra A (figura 4.18), B (figura 4.19) y D (figura 4.20); así como la gráfica 4.13 de la muestra C adaptada en la figura 4.21 para poder ser más fácilmente comparable con las otras tres muestras:

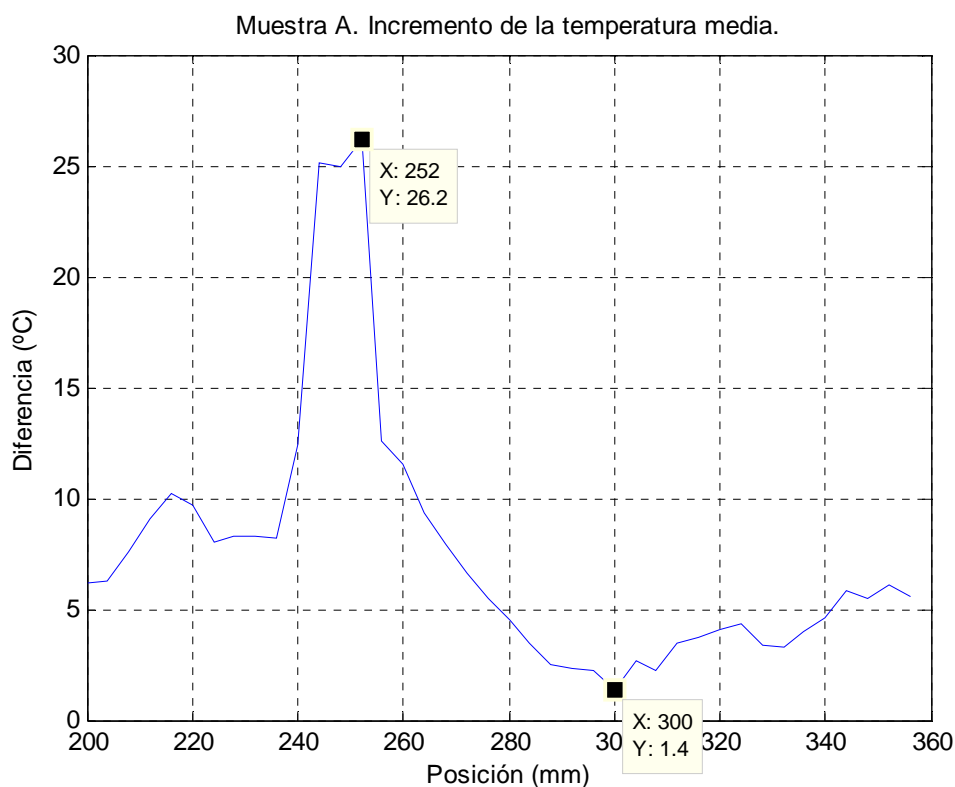


Figura 4.18. Incremento de la temperatura media de la muestra A.

Se puede ver cómo en el caso de la muestra A, la posición en la que mayor ha sido el incremento de la temperatura media (**26.2°C**) se corresponde con la posición **252 mm**; mientras que la posición en la que menor ha sido el incremento de la temperatura media (**1.4°C**) se encuentra en los **300 mm**.



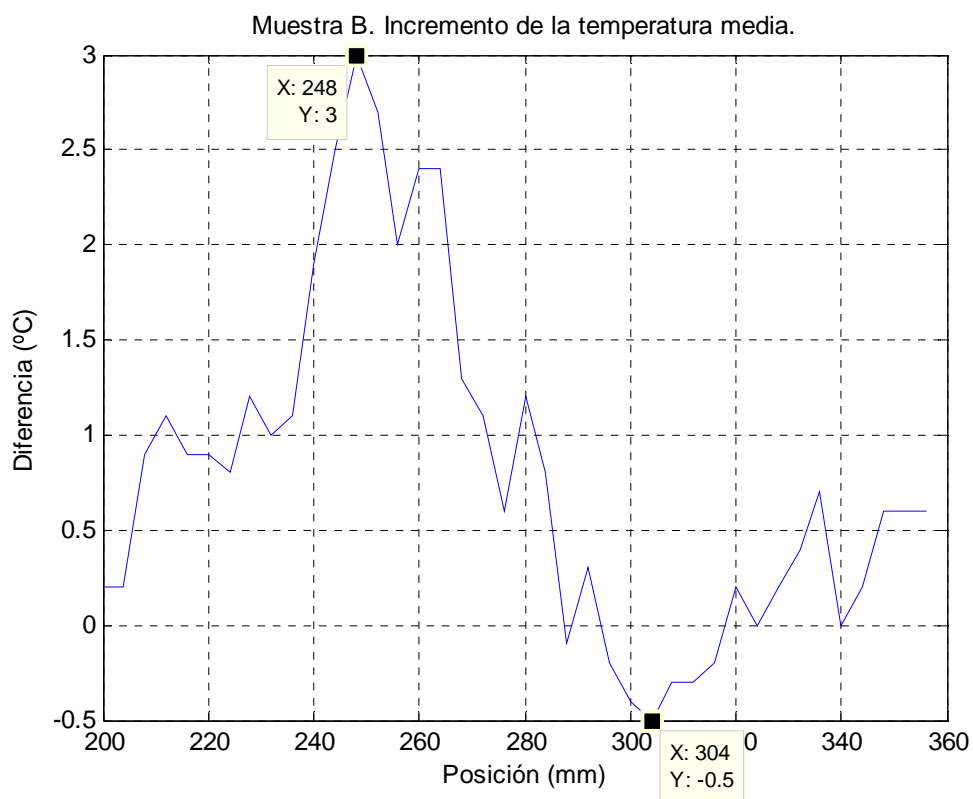


Figura 4.19. Incremento de la temperatura media de la muestra B.

Si observamos ahora la evolución de la muestra B, se aprecia claramente que la posición en la que mayor ha sido el incremento de la temperatura media (**3°C**) se corresponde con la posición **248 mm**; mientras que la posición en la que menor ha sido el incremento de la temperatura media (**-0.5°C**) se encuentra en los **304 mm**.

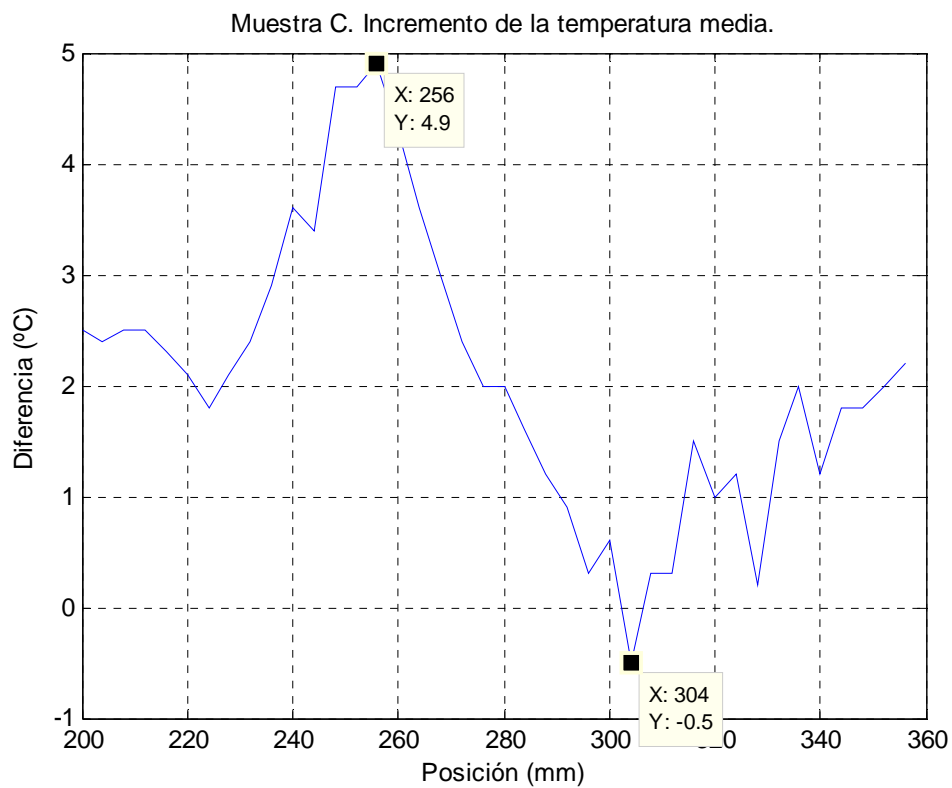


Figura 4.20. Incremento de la temperatura media de la muestra C.

En cuanto a la muestra C, como ya se podía ver en la figura 4.13, se observa cómo la posición en la que mayor ha sido el incremento de la temperatura media (**4.9°C**) se corresponde con la posición **256 mm**; mientras que la posición en la que menor ha sido el incremento de la temperatura media (**-0.5°C**) se encuentra en los **304 mm**.

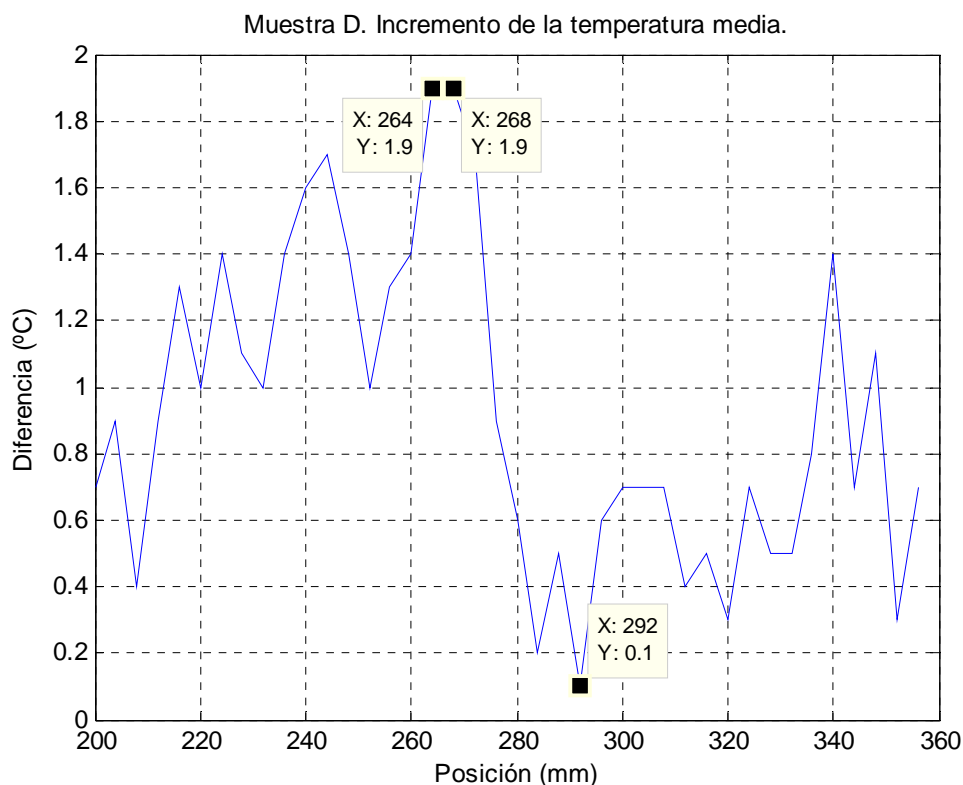


Figura 4.21. Incremento de la temperatura media de la muestra D.

Por último, la muestra D, en que se observa que la posición en la que mayor ha sido el incremento de la temperatura media (**1.9°C**) se correspondería con una posición situada entre **264 y 268 mm**; mientras que la posición en la que menor ha sido el incremento de la temperatura media (**0.1°C**) se encuentra en los **292 mm**.

A modo de resumen, se pueden expresar los valores significativos de estas cuatro figuras en una tabla como la siguiente:

	Muestra A		Muestra B		Muestra C		Muestra D	
	Posición (mm)	Incremento (°C)	Posición (mm)	Incremento (°C)	Posición (mm)	Incremento (°C)	Posición (mm)	Incremento (°C)
Máximo	252	26.2	248	3	256	4.9	268	1.9
Mínimo	300	1.4	304	-0.5	304	-0.5	292	0.1

Tabla 4.4. Resumen incremento de temperatura de muestras A, B, C y D.



Se deben comentar algunos detalles de esta tabla 4.4:

1. Se puede extraer que las posiciones de los incrementos máximos y mínimos de cada una de las muestras se encuentran en posiciones muy parecidas (alejándose un poco más las relativas a la muestra D), si bien los valores de estos incrementos no guardan ninguna relación.

La posición de los máximos y mínimos es fruto de la forma geométrica tanto de las muestras como de la cavidad de microondas, es por ello que la muestra D sea la que más se diferencie, ya que su forma geométrica es cilíndrica mientras que el resto son paralelepípedos. Así como el valor del incremento de temperatura depende no sólo de la forma geométrica, sino también del material del que esté compuesta la muestra.

2. También se ha podido observar en las gráficas anteriores la existencia de valores negativos; éstos aparecen por dos razones:
  - Por un lado la precisión de medida de la cámara termográfica, del 2% de la medida o bien de 2°C, según se ha podido leer en la tabla 3.4.
  - Por otro lado el efecto de la rejilla metálica sobre la lectura de la cámara termográfica (figura 4.11).

En cualquier caso, para valores pequeños de incrementos de temperatura, como es el caso de los valores mínimos de las gráficas anteriores, cualquiera de estos dos motivos, o lo que es más probable, ambos al mismo tiempo, puede provocar variaciones tales que hagan que el incremento de temperatura sea negativo; de lo cual lo único que se puede extraer es que se trata de un incremento de temperatura muy pequeño, casi nulo.

De todo esto se debe destacar que lo importante de todos estos experimentos y de este proyecto no es cuántos grados centígrados se ha calentado una muestra u otra en una posición concreta u otra, sino qué posiciones son aquellas en las que más energía se puede absorber y en cuáles la absorción es mínima, para así poder optimizar los procesos en los que se utilizan las microondas.



### Imágenes tomadas antes y después de calentar.

En este apartado se exponen las imágenes térmicas relativas a los datos que se resumen en la tabla 4.4. Así, en las figuras que se muestran a continuación se puede observar cómo cambia la imagen térmica de cada muestra, tanto en el punto en el que la absorción de energía de microondas es mínima, *antes de calentar*, (izquierda) como en el que esta absorción se optimiza, *después de calentar*, (derecha).

Lo primero que se puede explicar de las siguientes imágenes en lo referente a la interpretación de las mismas es lo siguiente:

- En la parte inferior de las imágenes aparece la escala de colores mediante la cual se puede leer a qué temperatura se encuentra cada punto de la imagen térmica, siempre entre un valor mínimo TMIN y otro máximo TMAX (estos valores cambian según el rango de temperaturas existente en cada imagen);
- Sobre esta escala de colores, en la parte izquierda se muestra la temperatura TSPOT, es la temperatura a la que se encuentra el punto indicado por el cursor en forma de cruz (situado en la zona central de todas las imágenes).
- EMISS (emisividad), con valor 1.00 para todas las mediciones, es decir, la cámara ha estado siempre en máxima absorción de radiación térmica.

En esta primera figura (4.22) se puede observar que la muestra 'A' apenas se ha calentado, la temperatura de TSPOT sólo ha aumentado 2 grados centígrados y el rango de temperatura (TMIN-TMAX) también ha sufrido una variación muy leve.

Sin embargo, en la figura 4.23 se puede observar cómo la muestra 'A' sí ha sufrido un aumento considerable de la temperatura, TSPOT ha crecido en 34 grados centígrados, y el rango de temperatura (TMIN-TMAX) también ha sufrido una importante variación.

Un comentario similar se puede hacer, de manera análoga, en cuanto a las parejas de imágenes 4.24-4.25, 4.26-4.27, 4.28-4.29.

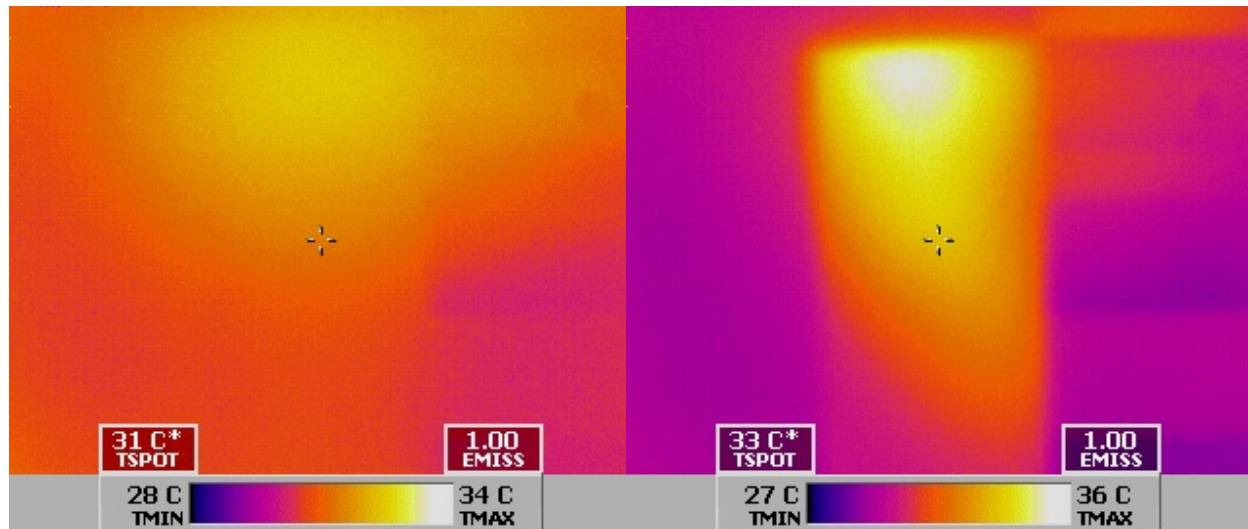


Figura 4.22. Muestra A. Posición 300 mm (mínimo).

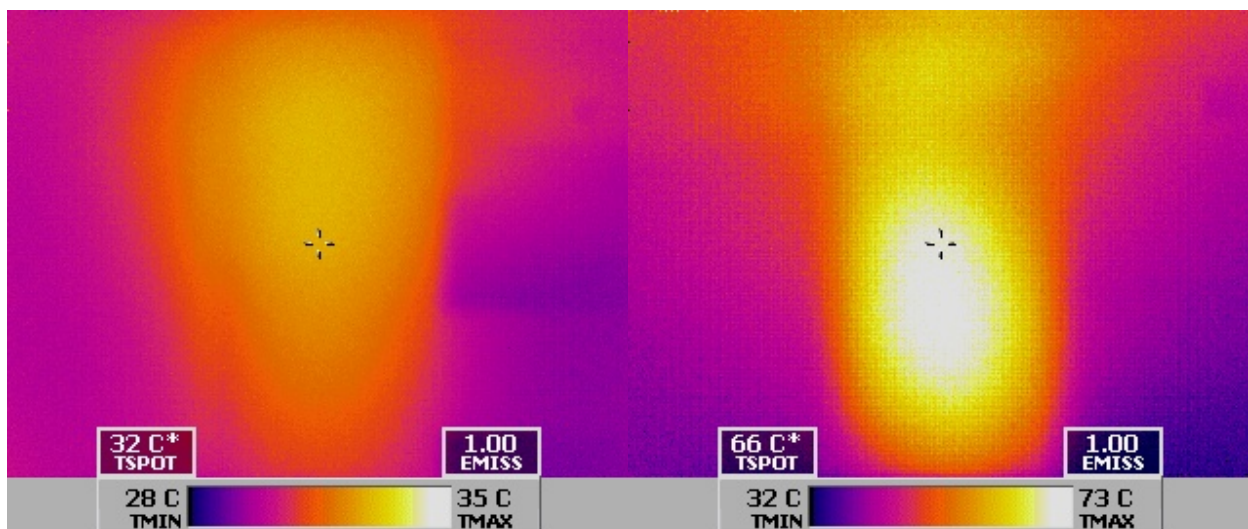


Figura 4.23. Muestra A. Posición 252 mm (máximo).

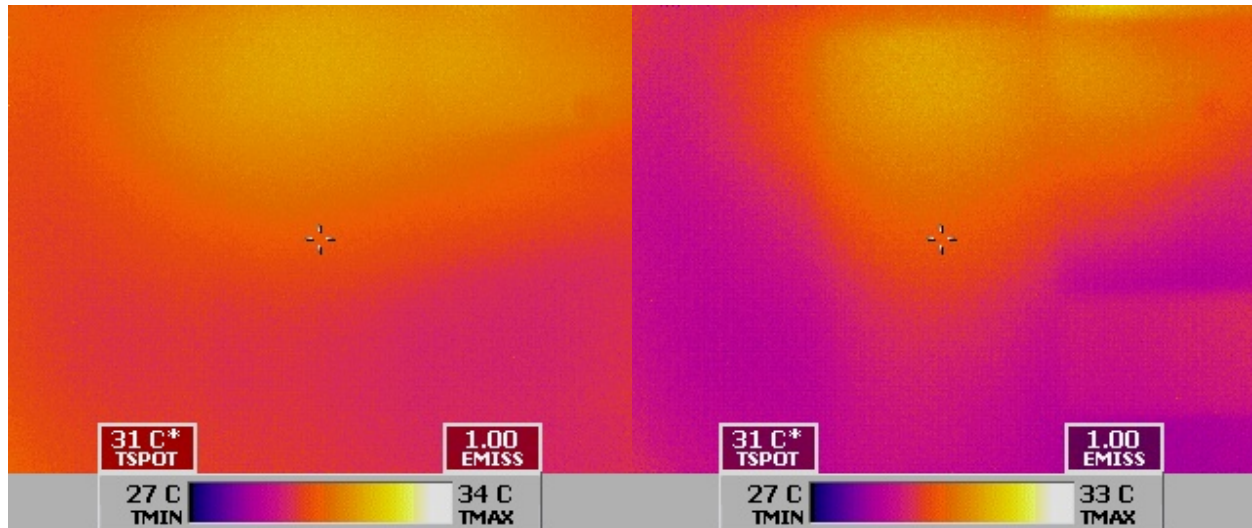


Figura 4.24. Muestra B. Posición 304 mm (mínimo).

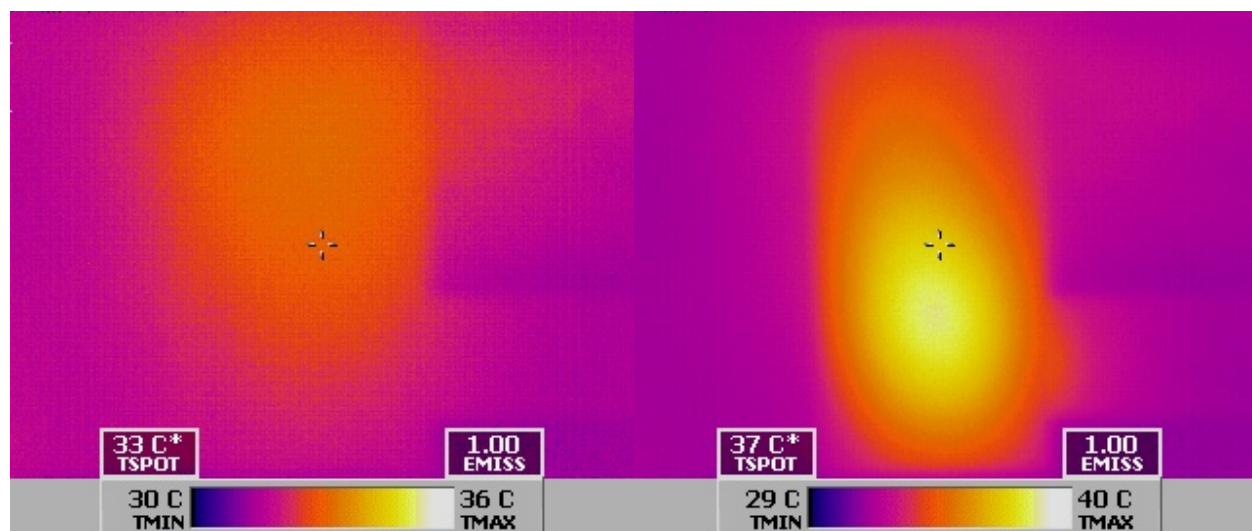


Figura 4.25. Muestra B. Posición 248 mm (máximo).

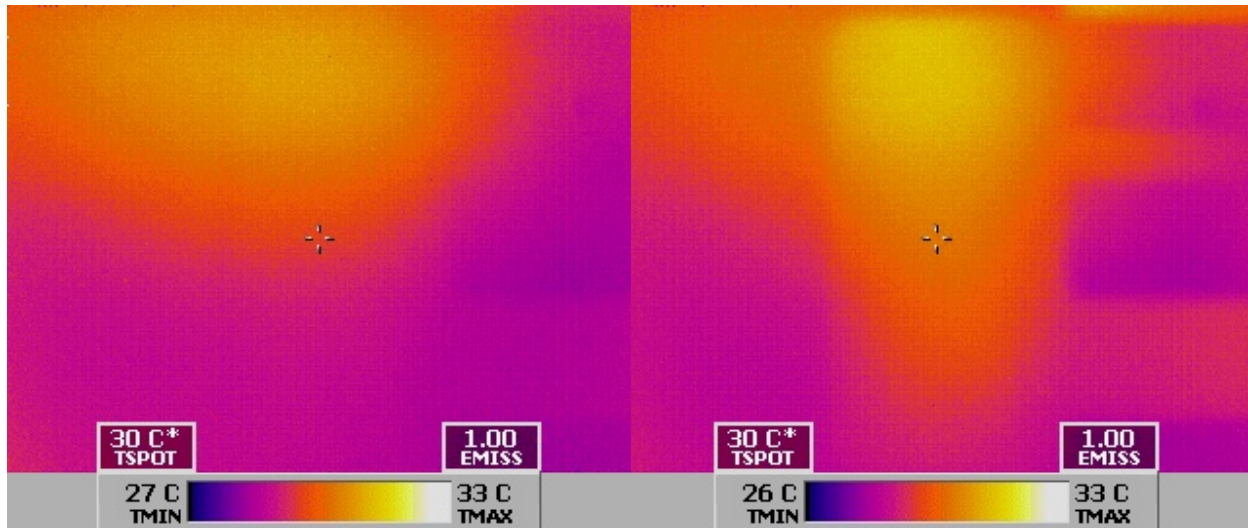


Figura 4.26. Muestra C. Posición 304 mm (mínimo).

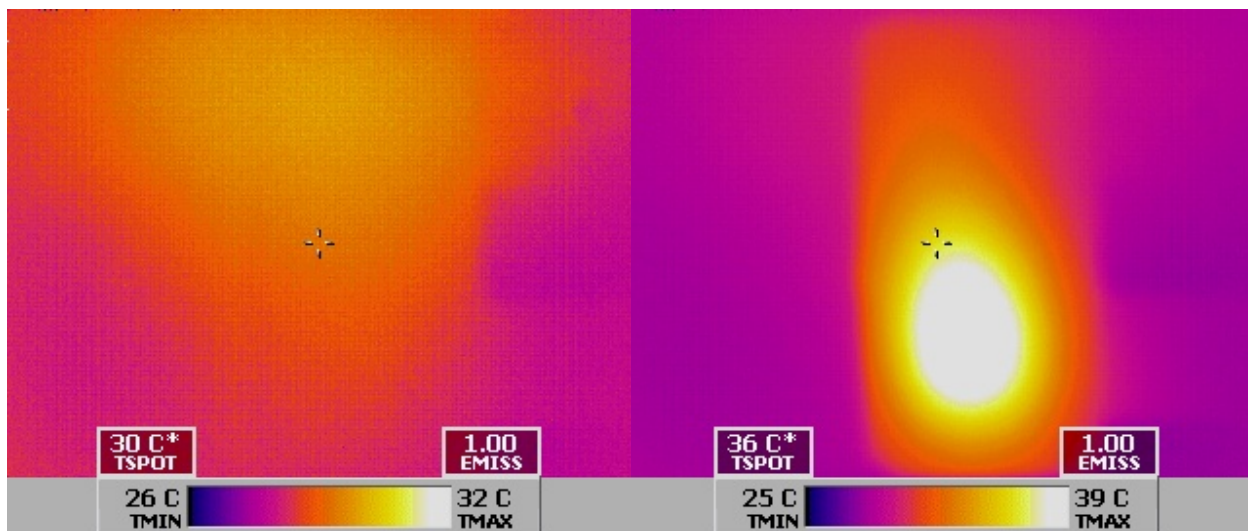


Figura 4.27. Muestra C. Posición 256 mm (máximo).



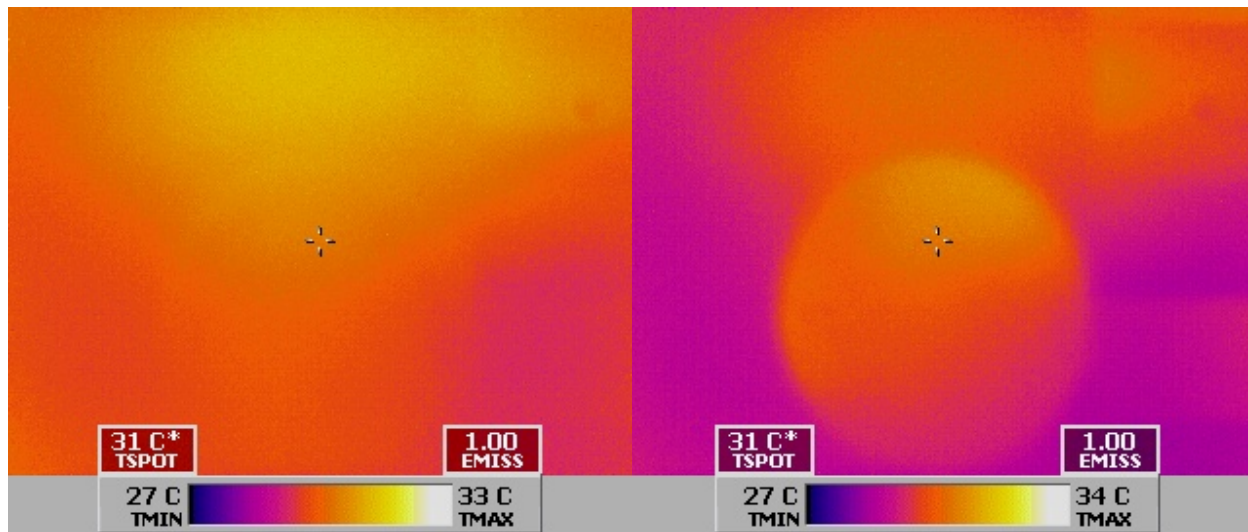


Figura 4.28. Muestra D. Posición 292 mm (mínimo).

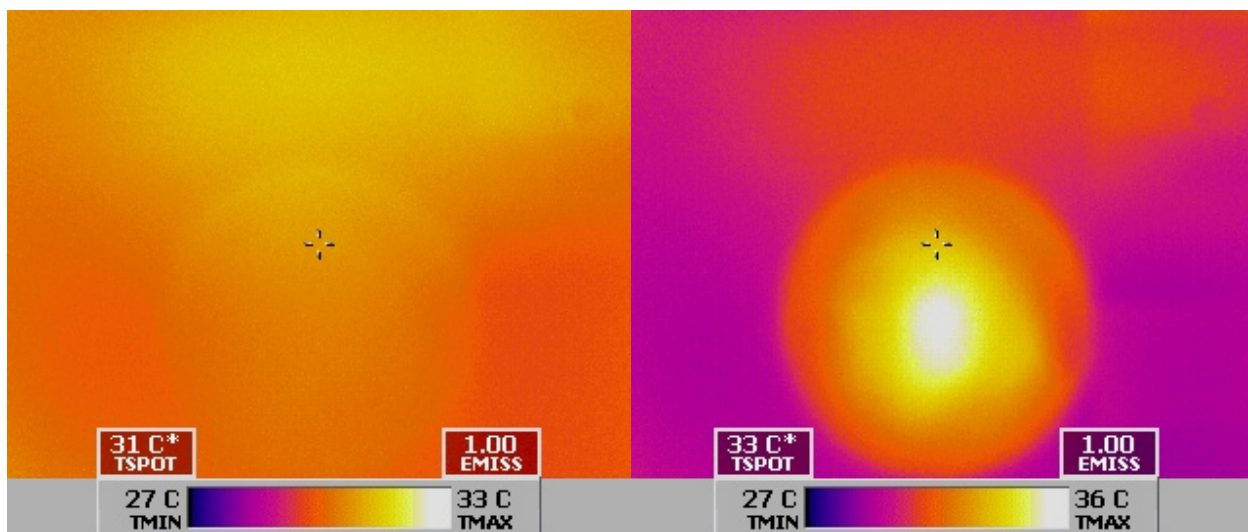
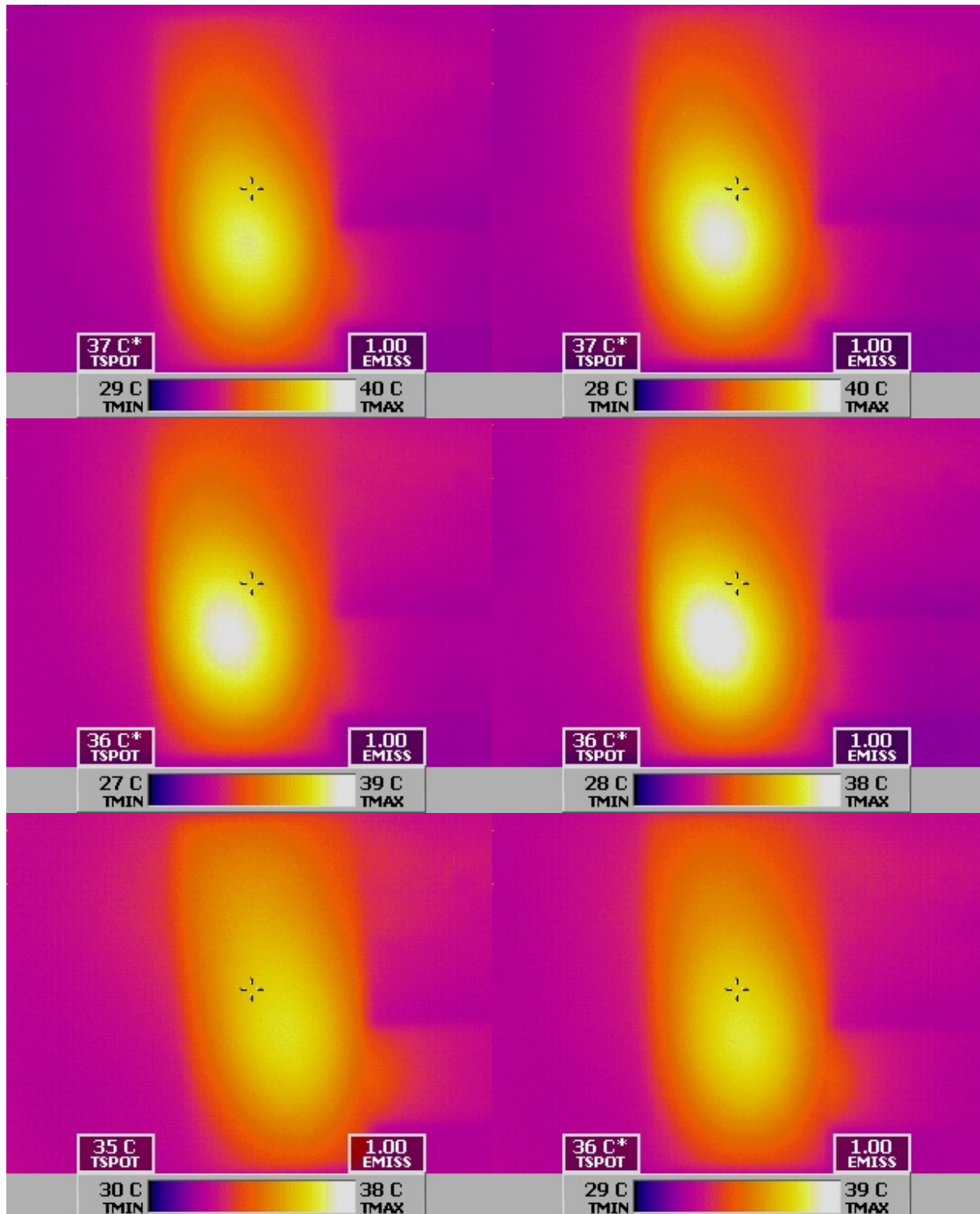


Figura 4.29. Muestra D. Posición 268 mm (máximo).

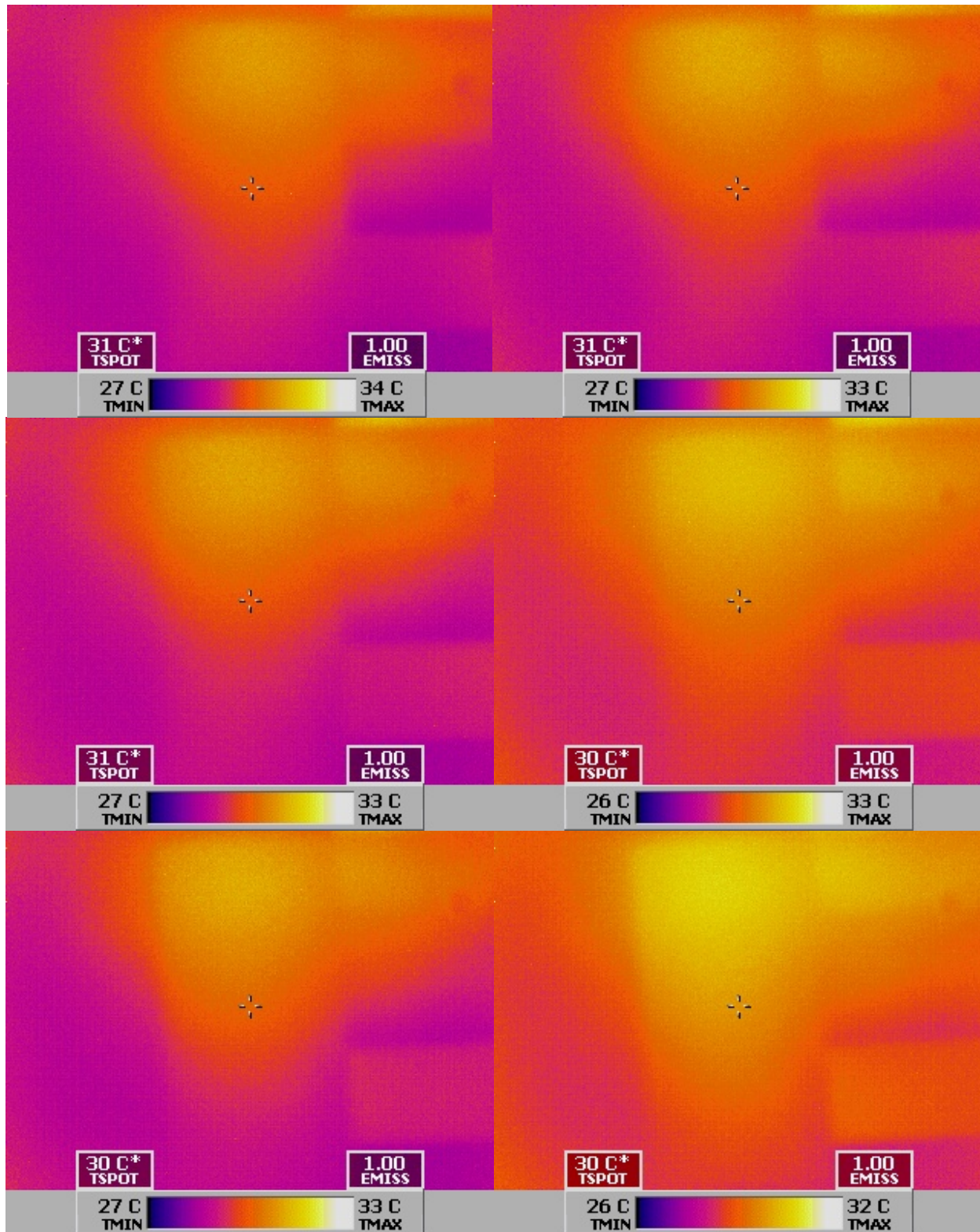
Al igual que varía el incremento de la temperatura media que sufre cada muestra en función de la posición que ocupe dentro de la cavidad; también varía el grado de “uniformidad térmica” que se consigue según dicha posición, hecho observable en la siguiente secuencia de imágenes:



Estas imágenes son las relativas a la muestra B en las posiciones 240, 244, 248, 252, 256, 260 mm, alrededor del punto de máxima absorción térmica, 248 mm.



Comparativamente, se puede ver cómo varía la uniformidad térmica de la muestra al ser calentada en posiciones alrededor del mínimo (304 mm), en este caso se trata de las posiciones 296, 300, 304, 308, 312, 316 mm:



## **5. Conclusiones**



## 5. Conclusiones

Como ya se comentó en el apartado de introducción, este proyecto está concebido como una continuación lógica de otros trabajos en los que se ha estado experimentando con potencias en torno a 1mW, las cuales son mucho menores que la potencia que se utiliza en los hornos de microondas, tanto hornos domésticos como hornos utilizados en procesos industriales.

También se ha mencionado que diferentes simulaciones experimentales han demostrado que la eficiencia de calentamiento de una muestra varía en función de:

- sus propiedades dieléctricas,
- sus características geométricas, así como de
- la distancia al magnetrón.

De hecho, el objetivo con el que arrancó este proyecto era el de comprobar empíricamente que los resultados obtenidos en otros trabajos, como:

- simulaciones con alta y baja, o
- experimentos de baja potencia,

se mantienen en los mismos niveles deseables, al trabajar con una potencia mayor, la que realmente se utiliza en las aplicaciones de las microondas.

Y como se ha podido comprobar al leer el apartado anterior, “Resultados experimentales”, queda demostrado que lo que se ha simulado en estudios previos sí se cumple en la realidad. Es decir, por medio de un sistema de calibración similar al utilizado en este proyecto se puede analizar un horno microondas cualquiera, de manera que se consiga encontrar cuáles son las posiciones críticas, en las que la absorción es máxima, mínima, o incluso donde la uniformidad de la temperatura alcanzada sea la deseada.



Por medio de procesos como el estudiado en este proyecto se pueden conseguir ahorros energéticos muy importantes a la hora de emplear las microondas en aplicaciones industriales. Estos ahorros energéticos, según la aplicación, también pueden implicar una reducción del tiempo necesario para procesar el material.

De este modo se consiguen también ventajas económicas, puesto que los ahorros energético y temporal conseguidos, conllevan un menor coste del proceso; esta reducción del coste puede redundar en un precio más competitivo del producto, o bien en un mayor margen para la industria que utiliza las microondas en sus procesos.

Se debe mencionar también, que este proyecto es el principio para otros trabajos en los que se optimice y automatice el “proceso de calibración” de hornos microondas. Así, no sólo se encontrarían las posiciones críticas, sino que se puede incluso implementar un algoritmo que marque en qué posiciones se debe situar la muestra, qué orden se ha de seguir, y durante cuánto tiempo debe estar expuesta; por consiguiente, estaríamos optimizando tanto la energía como el tiempo necesarios para procesar los materiales que requieren el uso de microondas.

Se trata, en conclusión, de una prueba más de que en esta línea de trabajo se puede aún avanzar considerablemente para que la industria progrese, mejore y optimice sus procesos y, por qué no, sea cada vez más respetuosa con el medio ambiente, que tanta importancia va ganando día a día.

## **6. Bibliografía**



## 6. Bibliografía.

Aplicaciones Industriales de las Microondas. Capítulo 5. Juan Monzó Cabrera. Apuntes UPCT.

María E. Requena-Pérez, Juan L. Pedreño-Molina, Juan Monzó-Cabrera and Alejandro. Díaz-Morcillo, Multimode Cavity Efficiency Optimization by Optimum Load Location: Experimental Approach, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 53, No. 6, 2838-2845 (June 2005).

J.L. Pedreño-Molina, J. Monzó-Cabrera and J.M. Catalá-Civera, Sample Movement Optimisation for Uniform Heating in Microwave Heating Ovens, (aceptado), International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2006

### **Documentación electrónica:**

<http://cromavideo.webcindario.com/TUTORIALES/MICROONDAS.htm>

<http://www.gallawa.com/microtech/historia-microonda.html>

[http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp\\_234.htm](http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_234.htm)