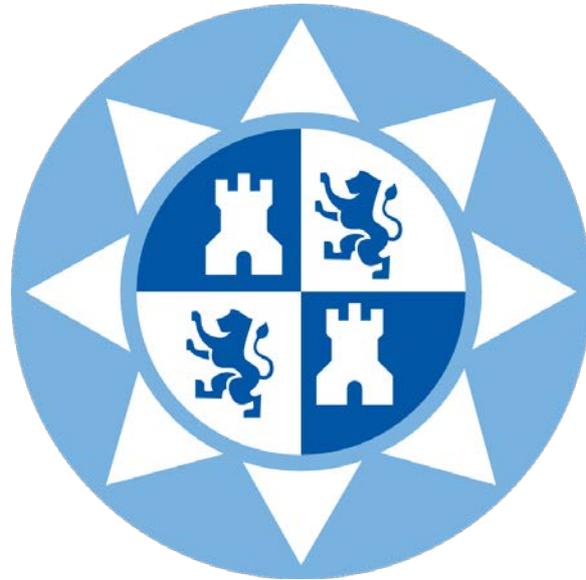




Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería de
Telecomunicación

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

DEPARTAMENTO
DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN
Y LAS COMUNICACIONES



**Evaluación experimental de la
eficiencia energética de un
prototipo de secadora asistida por
microondas y mejora del mismo.**

Proyecto Fin de Carrera

Alejandro García Vidal

DIRECTORES: Juan Monzó Cabrera

José Fayos Fernández



Universidad
Politécnica
de Cartagena

A Juan Monzó por su ayuda y su confianza en mí para la realización de este proyecto.
A mi familia y amigos por su ayuda en los momentos más difíciles.
Finalmente, a los que ya no están.

Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivos del proyecto.....	1
1.2 Fases.....	1
1.3 Estructura.....	2
2. Fundamentos del calentamiento por microondas.....	3
2.1 Calentamiento volumétrico por microondas.....	3
2.1.1 Parámetros que gobiernan el calentamiento por microondas.....	5
2.2 Aproximación de ondas planas.....	6
2.2.1 Propagación de ondas planas en medios dieléctricos sin pérdidas.....	6
2.2.2 Propagación de ondas planas en medios dieléctricos con pérdidas.....	8
2.2.3 Ley de Lambert.....	11
2.3 Características de la materia: permitividad y permeabilidad.....	13
2.3.1 Las pérdidas dieléctricas.....	13
2.3.2 Ecuación de Debye.....	14
2.3.3 Modelo de Maxwell-Wagner.....	15
2.3.4 Permitividad.....	16
2.3.5 Comportamiento de la permitividad con el contenido de humedad.....	16
2.3.6 Comportamiento de la permitividad con la temperatura.....	17
2.4 Ecuación del calor.....	19
2.4.1 Transferencia de calor convencional: Mecanismos físicos.....	19
2.4.2 La ecuación del calor: Modelado del calentamiento por microondas.....	20
2.5 Modelos para el secado asistido por microondas.....	21
2.6 Estudio teórico para el cálculo de la eficiencia.....	23
3. Dispositivos de calentamiento por microondas.....	25
3.1 Esquema básico de un sistema de calentamiento por microondas.....	25
3.2 Generador de microondas: el magnetrón.....	26
3.2.1 Diagrama de Rieke.....	28
3.3 Fuentes de alimentación.....	29
3.3.1 Fuente con transformador variable mecánicamente.....	29
3.3.2 Fuente con control por tiristor.....	30
3.3.3 Fuente con control por reactor saturable.....	31
3.3.4 Fuente con control por campo magnético variable.....	31
3.4 El aplicador de microondas.....	32
3.4.1 Características.....	32

3.4.2 Tipos.....	33
3.5 Guías de onda.....	35
4. Montaje experimental y proceso.....	36
4.1 Elementos.....	36
4.1.1 Fuente MAGDRIVE1000.....	37
4.1.2 Magnetron Panasonic modelo 2M244-M23.....	39
4.1.3 Termopares:.....	41
4.2 Proceso.....	42
5. Resultados.....	44
5.1 Prueba 1: Magnetrones 1 y 2.....	44
5.2 Prueba 2: Magnetron 1.....	52
5.3 Prueba 3: Magnetron 2.....	60
6. Conclusiones y líneas futuras.....	68
6.1 Conclusiones.....	68
6.2 Líneas futuras.....	68
7. Bibliografía.....	70

Figuras

Figura 2. 1: Evolución temporal y espacial para una onda plana en un dieléctrico con pérdidas.....	9
Figura 2. 2: Distribución de campo eléctrico en un dieléctrico con pérdidas para diferentes atenuaciones.....	10
Figura 2. 3: Campo eléctrico en un dieléctrico con pérdidas para distintas constantes de fase.....	11
Figura 2. 4: Predicción de la Ley de Lambert frente a la progresión de una onda plana.....	12
Figura 2. 5: Geometría usada para la aplicación de la Ley de Lambert.....	12
Figura 2. 6: Interacción del campo eléctrico variable con iones y moléculas dipolares.....	14
Figura 2. 7: Comportamiento habitual de la permitividad y el factor de pérdidas con la humedad.....	17
Figura 2. 8: Comportamiento de la permitividad y el factor de pérdidas para el nylon 66 en función de la temperatura.....	18
Figura 2. 9: Curva de sacado ideal con diferentes etapas de secado.....	22
Figura 3. 1: Diagrama de un sistema básico de calentamiento por microondas.....	25
Figura 3. 2: Sección transversal de un magnetrón.....	26
Figura 3. 3: Comportamiento del campo del magnetrón.....	27
Figura 3. 4: Diagrama de Rieke.....	28
Figura 3. 5: Fuente de alimentación con transformador variable.....	30
Figura 3. 6: Fuente con control por tiristor.....	30
Figura 3. 7: Fuente con reactor variable.....	31
Figura 3. 8: Fuente con campo magnético variable.....	32
Figura 3. 9: Cavidad resonante multimodo y modos TE y TM.....	33
Figura 3. 10: Guía de onda WR-340.....	35
Figura 4. 1: Montaje experimental.....	36
Figura 4. 2: Interior de la cavidad.....	37
Figura 4. 3: Conexión PC – Fuente.....	37
Figura 4. 4: Dimensiones.....	38
Figura 4. 5: Indicadores de la fuente MAGDRIVE1000.....	39
Figura 4. 6: Magnetron 2M244-M23.....	39
Figura 4. 7: Dimensiones.....	40
Figura 4. 8: Termopar Fluke 1560.....	41
Figura 4. 9: Termopar Center 305.....	41
Figura 4. 10: Pesado inicial de la muestra.....	42
Figura 4. 11: Medida de la temperatura inicial.....	43
Figura 5. 1: Prueba 1 - Evaluación de la temperatura de la ropa.....	44
Figura 5. 2: Prueba 1 – Evolución del peso de la muestra.....	45
Figura 5. 3: Prueba 1 - Evolución de X.....	46
Figura 5. 4: Prueba 1 - Potencia consumida por la secadora.....	46
Figura 5. 5: Prueba 1 - Evolución temperatura aire extraído.....	47
Figura 5. 6: Prueba 1 – Incremento temperatura ropa.....	48
Figura 5. 7: Prueba 1 - Incremento temperatura aire extraído.....	49
Figura 5. 8: Prueba 1 - Decremento masa de agua.....	49
Figura 5. 9: Prueba 1 - Potencia total absorbida.....	50
Figura 5. 10: Prueba 1 - Eficiencia cavidad.....	51
Figura 5. 11: Prueba 1 - Eficiencia eléctrica.....	51

Figura 5. 12: Prueba 2 - Evaluación de la temperatura de la ropa.	52
Figura 5. 13: Prueba 2 – Evolución del peso de la muestra.	53
Figura 5. 14: Prueba 2 - Evolución de X.	53
Figura 5. 15: Prueba 2 - Potencia consumida por la secadora.	54
Figura 5. 16: Prueba 2 - Evolución temperatura aire extraído.	54
Figura 5. 17: Prueba 2 - Temperatura magnetrón.	55
Figura 5. 18: Prueba 2 - Incremento temperatura magnetrón.	56
Figura 5. 19: Prueba 2 - Incremento temperatura aire.	56
Figura 5. 20: Prueba 2 - Decremento masa agua.	57
Figura 5. 21: Prueba 2 - Potencia total absorbida.	58
Figura 5. 22: Prueba 2 - Eficiencia cavidad.	59
Figura 5. 23: Prueba 2 - Eficiencia eléctrica.	59
Figura 5. 24: Prueba 3 - Evaluación de la temperatura de la ropa.	60
Figura 5. 25: Prueba 3 - Evolución del peso de la muestra.	61
Figura 5. 26: Prueba 3 - Evolución de X.	61
Figura 5. 27: Prueba 2 - Potencia consumida por la secadora.	62
Figura 5. 28: Prueba 3 - Evolución temperatura aire extraído.	62
Figura 5. 29: Prueba 3 - Temperatura magnetrón.	63
Figura 5. 30: Prueba 3 - Incremento temperatura magnetrón.	64
Figura 5. 31: Prueba 3 - Incremento temperatura ropa.	64
Figura 5. 32: Prueba 3 - Incremento temperatura del aire extraído.	65
Figura 5. 33: Prueba 3 - Decremento masa agua.	65
Figura 5. 34: Prueba 3 - Potencia total absorbida.	66
Figura 5. 35: Prueba 3 - Eficiencia cavidad.	67
Figura 5. 36: Prueba 3 - Eficiencia eléctrica.	67

Tablas

Tabla 2. 1: Temperatura crítica para diferentes materiales.	18
Tabla 3. 1: Partes del magnetrón.....	27
Tabla 4. 1: Especificaciones del magnetrón.....	40
Tabla 4. 2: Precisiones termopares.....	42
Tabla 6. 1: Eficiencias medias de los pruebas de secado.....	68

1. Introducción.

1.1 Objetivos del proyecto.

El objetivo del proyecto es la evaluación experimental de la eficiencia de un prototipo de secadora por microondas, además de la mejora de dicho prototipo para mejorar la eficiencia.

Como objetivos secundarios podemos mencionar:

- El uso de las ecuaciones necesarias para el cálculo de las potencias empleadas en un proceso de secado por microondas.
- La evaluación y comprobación de las diferentes fases que forman un proceso de secado por microondas.

1.2 Fases.

El proyecto lo hemos desarrollado en las siguientes fases:

- Establecimiento de objetivos y documentación.
- Realización de las diferentes pruebas de secado.
- Procesamiento de los datos obtenidos en las pruebas de secado mediante MATLAB.
- Análisis e interpretación de los resultados.
- Redacción de la memoria del Proyecto Fin de Carrera.

1.3 Estructura.

El proyecto se divide en 7 capítulos. Seguidamente, vamos a comentar brevemente los contenidos que se han tratado en cada capítulo:

- Capítulo 2: Se abordan conceptos básicos del calentamiento por microondas, la ecuación del calor y finalmente hablamos del modelo para el secado por microondas.
- Capítulo 3: En el interior de este capítulo se habla sobre las partes de las que se compone un sistema de calentamiento por microondas.
- Capítulo 4: Abordaremos el montaje experimental utilizado junto a la explicación del proceso empleado en la realización de las pruebas de secado.
- Capítulo 5: En él se analizan y exponen los resultados de las pruebas realizadas.
- Capítulo 6: Se exponen las conclusiones obtenidas y se trazan las líneas futuras para una continuación del proyecto.
- Capítulo 7: Compuesto por la bibliografía empleada en el proyecto.

2. Fundamentos del calentamiento por microondas.

2.1 Calentamiento volumétrico por microondas.

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (2.4)$$

Donde:

- \vec{E} : vector intensidad de campo eléctrico.
- \vec{D} : desplazamiento eléctrico.
- \vec{B} : vector inducción magnética.
- \vec{H} : vector intensidad de campo magnético.
- ρ : densidad de carga volumétrica.
- \vec{J} : densidad superficial de corriente.

Para resolver estas ecuaciones hay que recordar las ecuaciones constitutivas, que relacionan los vectores intensidad con la inducción y el desplazamiento, y en el caso de materiales lineales e isotrópicos son:

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

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

Donde:

- ϵ : permitividad compleja del medio dieléctrico.
- μ : permeabilidad compleja.

La potencia de microondas absorbida por un material dieléctrico en su proceso de calentamiento se obtiene derivando la potencia que fluye a través de una superficie cerrada mediante la integración del vector de Poynting:

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

Si se integra este vector a lo largo de la superficie del cuerpo, y se aplica el teorema de la divergencia junto a las leyes de Maxwell se obtiene:

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

Donde:

- ϵ' : constante dieléctrica relativa.
- ϵ'' : factor de pérdidas.
- μ' : permeabilidad relativa del material dieléctrico.
- ϵ_0 : permitividad del vacío.
- μ_0 : permeabilidad del vacío.

La potencia media se puede definir como:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \int_S \text{Re}(\vec{E} \times \vec{H}^*) dS \quad (2.9)$$

Comparando las ecuaciones 2.8 y 2.9, obtenemos la potencia absorbida y disipada por un cuerpo:

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

Donde \vec{E} está expresado en voltios de pico y se mide en (V/m).

Normalmente, la potencia disipada en el material se expresa utilizando la potencia disipada por unidad de volumen y no en términos totales, como está expresada en la ecuación (10).

El término del calentamiento volumétrico se puede expresar de la siguiente manera:

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

Donde:

- Q_{gen} : calor volumétrico generado por la energía de microondas (W/m³).
- f : frecuencia (Hz).
- \vec{E}_{rms} : campo eléctrico en valor eficaz.

De forma habitual, la intensidad de campo eléctrico a lo largo del cuerpo no tiende a ser constante. Por tanto, la generación de calor puede ser muy diferente de un punto a otro dependiendo del diseño del equipo de calentamiento.

Por consiguiente, si queremos ser estrictos en la formulación del calor volumétrico habrá que expresarlo tanto en función del punto evaluado como del instante temporal en el que se evalúa. La dependencia temporal es debida a que cuando el material está siendo calentado puede sufrir cambios físico-químicos que pueden afectar su estructura interna y en consecuencia sus propiedades dieléctricas.

De esta manera, el calentamiento volumétrico debemos expresarlo como una función del espacio y tiempo y, los valores de dicho calentamiento deberán evaluarse mediante simulaciones adecuadas:

$$Q_{\text{gen}}(x, y, z, t) = 2\pi f \epsilon_0 \epsilon'' |\vec{E}_{\text{rms}}(x, y, z, t)|^2 \quad (2.12)$$

2.1.1 Parámetros que gobiernan el calentamiento por microondas.

De la ecuación (2.12) puede deducirse que, mayoritariamente, el calentamiento dieléctrico se debe a 3 factores:

- **Frecuencia:**

En (2.12) vemos como el calentamiento volumétrico es directamente proporcional a la frecuencia, lo que conlleva que si usamos una potencia radiada constante, el calentamiento será mayor conforme subamos en frecuencia.

Según la ecuación (2.12), lo ideal sería subir en frecuencia lo máximo que permitiera esta tecnología, pero hay que tener en cuenta que la penetración de la energía electromagnética en el material es menor conforme aumenta la frecuencia y, como consecuencia, el calentamiento es más superficial.

Por lo que, cuando los materiales tienen un grosor elevado es conveniente utilizar frecuencias menores para calentarlos de manera uniforme.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los sistemas de microondas deben usar las frecuencias permitidas por los gobiernos para este tipo de equipos, siendo las más usadas 2.45 GHz y 915 MHz.

- **Factor de pérdidas:**

Esta magnitud indica la capacidad del material dieléctrico bajo estudio para absorber energía de microondas.

Cuanto mayor sea el factor de pérdidas de un material mayor absorción de microondas se producirá en el mismo como vemos en (2.12). Por tanto, es importante conocer con anterioridad dicha magnitud para saber si el material absorberá adecuadamente las microondas o no.

Se debe destacar que el factor de pérdidas puede no ser constante a lo largo del cuerpo irradiado. Esto es debido a que existen materiales heterogéneos cuya distribución de permitividades no es constante a lo largo del espacio. Además, la temperatura a lo largo del material tampoco tiene que ser constante y como el factor de pérdidas es muy sensible a la composición química y a la temperatura del cuerpo, por lo que, no será constante dentro del mismo.

Además, dado que el cuerpo tendrá variaciones de temperatura y humedad o variaciones de estructuras químicas, el factor de pérdidas podrá evolucionar con el tiempo durante el proceso.

- **Campo eléctrico:**

Como vemos en la ecuación 2.12, el calentamiento por microondas es proporcional al cuadrado del módulo del campo eléctrico. Esto conlleva que cuanto mayor sea el campo eléctrico en un punto del material, mayor será su subida de temperatura.

Por norma general, lo que interesa es que la distribución del campo eléctrico sea lo más uniforme posible en el material para que el calentamiento sea también uniforme a lo largo del mismo. Si esto no ocurre, puede ocurrir que partes del cuerpo se calienten en exceso mientras que las demás partes permanezcan frías o a menor temperatura, obteniendo “hot spots” y “cold spots”, respectivamente.

- **Otros factores:**

Es necesario comentar que existen otros factores que también afectan al calentamiento por microondas. Factores como la conductividad térmica, el calor específico y la densidad del material afectarán a la evolución de la temperatura en el interior del cuerpo.

2.2 Aproximación de ondas planas.

Para poder saber cómo se calentará el material es muy importante calcular el campo eléctrico. Dicho cálculo se puede realizar mediante métodos numéricos complejos o mediante herramientas de simulación diseñadas para este fin.

El análisis de las ondas planas nos va a dar una idea clara de cómo se propaga la energía electromagnética en un dieléctrico.

2.2.1 Propagación de ondas planas en medios dieléctricos sin pérdidas.

Partiendo de las Leyes de Maxwell (2.1 a 2.4) se puede llegar a la conocida ecuación de onda de Helmholtz, que es la ecuación de onda suponiendo variación senoidal a la frecuencia angular ω :

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (2.13)$$

Donde k es el número de onda del medio de propagación considerado.

Mediante el método de separación por variables, se puede observar que la solución del campo eléctrico para cada una de las componentes es de la siguiente forma:

$$E_x = A_x e^{-jk_x x} + B_x e^{jk_x x} \quad (2.14)$$

$$E_y = A_y e^{-jk_y y} + B_y e^{jk_y y} \quad (2.15)$$

$$E_z = A_z e^{-jk_z z} + B_z e^{jk_z z} \quad (2.16)$$

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

Se debe cumplir que la divergencia de E sea nula, k y E serán perpendiculares siempre. Además se cumplirá que:

$$k_x^2, k_y^2, k_z^2 > 0 \quad (2.17)$$

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad (2.18)$$

Se puede apreciar como las ondas planas presentan dos soluciones posibles, cada una para cada sentido en la dirección de propagación k:

$$E = E_{0+} e^{-jk_r r} + E_{0-} e^{jk_r r} \quad (2.19)$$

En la que representan dos ondas planas propagándose en la dirección k y -k respectivamente.

La distancia mínima entre planos de cada fase viene determinada por la longitud de onda (λ):

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{1}{f \sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.20)$$

Donde:

- ω : frecuencia angular de la onda.
- μ : permeabilidad magnética del medio.
- ϵ : permitividad eléctrica.

Al tratarse de medios sin pérdidas, la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica son reales.

De la ecuación 2.20 obtenemos la expresión de la velocidad de fase:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (2.21)$$

La velocidad de fase marca a la velocidad a la que viajan los frentes de onda planos. En el vacío, $v_p = 3 \times 10^8$ m/s. Sin embargo, en otros dieléctricos y medios de transmisión, la velocidad de propagación será menor.

En lo referente a la potencia media de una onda plana en el dieléctrico según la dirección de propagación se puede obtener según la ecuación siguiente:

$$\vec{P}_m = \frac{1}{2} \frac{E^2}{\eta} \hat{k} \quad (2.22)$$

Donde $\eta = \sqrt{\mu/\varepsilon}$ es la impedancia de onda del medio.

2.2.2 Propagación de ondas planas en medios dieléctricos con pérdidas.

Ahora pasamos a considerar ε como una constante compleja: $\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$.

Las soluciones que se obtienen para la onda plana son las mismas con la única diferencia de que la constante de propagación (k^*) será compleja, provocando un cambio en el comportamiento físico de la onda plana como observaremos a continuación.

Considerando un material con una permitividad compleja ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$) y una onda plana que se propaga positivamente en el eje 'z' ($\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-j\vec{k}\vec{r}} = \vec{E}_0 e^{-jkz}$), se obtendrá una constante compleja de propagación:

$$k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} = \omega\sqrt{\mu(\varepsilon' - j\varepsilon'')} = \beta - j\alpha \quad (2.23)$$

Donde:

- α : Constante de atenuación.
- β : Constante de propagación.
- ε' : Constante dieléctrica.
- ε'' : Factor de pérdidas.

Por tanto podemos escribir el campo eléctrico instantáneo como:

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}[\vec{E}e^{j\omega t}] = \text{Re}[\vec{E}_0 e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{j\omega t}] = E_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \phi_i) \quad (2.24)$$

En la figura 2.1, se muestra la evolución espacial del campo para diferentes instantes. Puede apreciarse que la amplitud del campo decrece exponencialmente a medida en que avanzamos en la dirección de propagación (eje z).

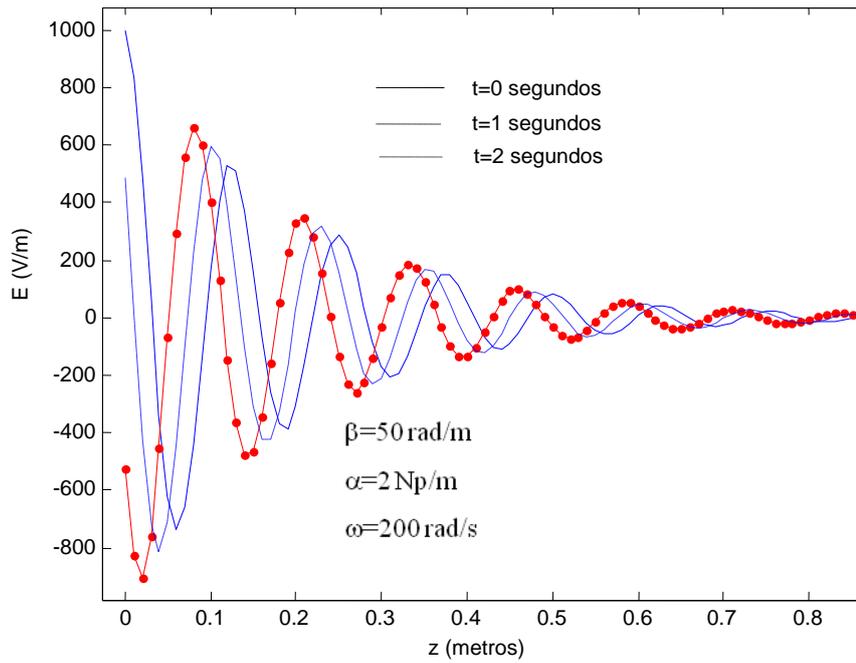


Figura 2. 1: Evolución temporal y espacial para una onda plana en un dieléctrico con pérdidas.

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

$$\alpha = \omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[\frac{\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1}{2} \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

$$\beta = \omega\sqrt{\mu\epsilon'} \left[\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2}}{2} \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

Donde llamamos **tangente de pérdidas** a la relación entre el factor de pérdidas y la constante dieléctrica:

$$\text{tg}(\delta) = \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right) \quad (2.27)$$

De las ecuaciones 2.25 a 2.27 podemos deducir varias cuestiones:

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

Por lo que, como hemos podido apreciar, la pérdida de energía de la onda plana es transformada en el cuerpo en forma de calor. Es decir, a medida que se propaga la onda cede energía al cuerpo, la cual se transforma en calor (2.12). Siguiendo este criterio podemos decir que las zonas interiores del cuerpo recibirán menos calor que las exteriores siempre que no existan fenómenos de interferencia.

Otra situación a tener en cuenta es la de que sucede cuando las pérdidas dieléctricas aumentan en el cuerpo. En la figura 2.2 se muestra dicha situación. Conforme aumenta α , la atenuación de la onda es mayor y por tanto, las zonas interiores reciben menos campo eléctrico, es decir, a mayores pérdidas dieléctricas, más se calentará el exterior del cuerpo frente a su interior.

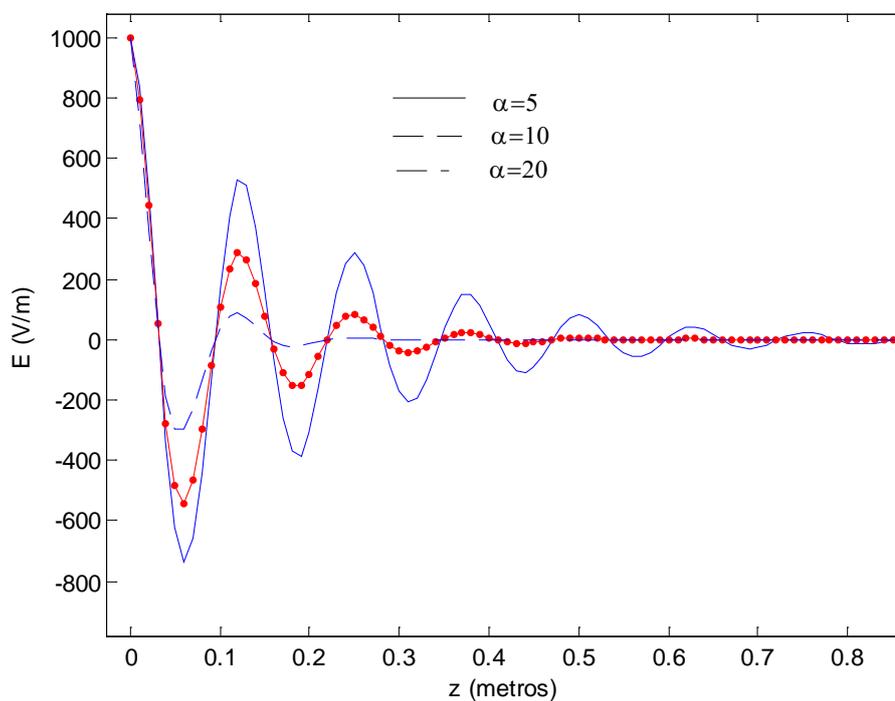


Figura 2. 2: Distribución de campo eléctrico en un dieléctrico con pérdidas para diferentes atenuaciones.

Es interesante observar también que ocurre cuando β , la constante de propagación, aumenta en el cuerpo (por el aumento en frecuencia, la constante dieléctrica o la permeabilidad, o de la tangente de pérdidas).

En la figura 2.3 se observa qué ocurre para diferentes coeficientes de propagación. Se puede apreciar que conforme aumenta la constante de propagación, 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, β , tiene relación con la longitud de onda dentro del material, pero no influye en la pérdida de potencia.

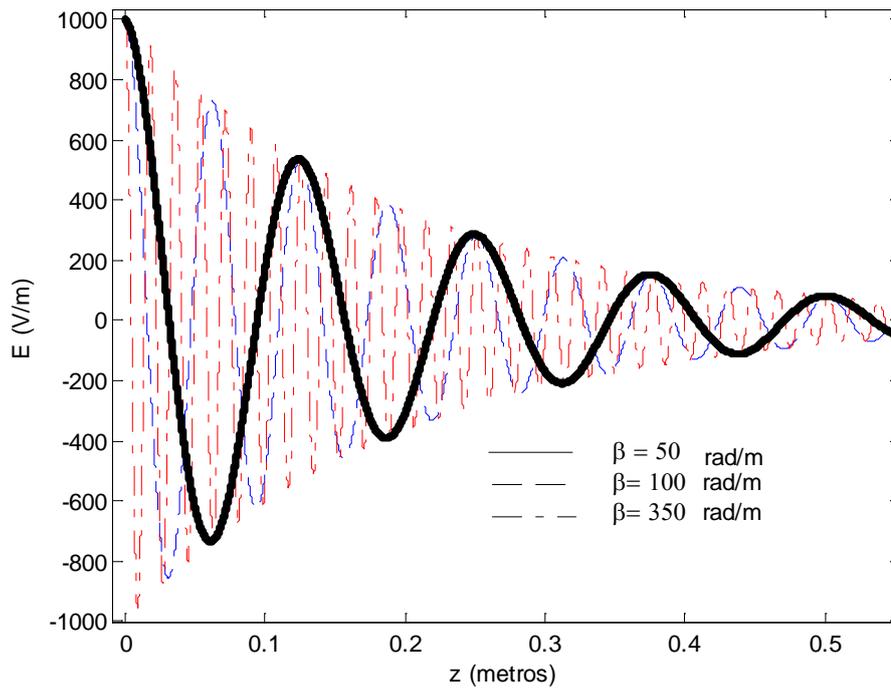


Figura 2. 3: Campo eléctrico en un dieléctrico con pérdidas para distintas constantes de fase.

2.2.3 Ley de Lambert.

Se trata de un método para hallar el calor volumétrico por microondas (Q_{gen} (W/m^3)) e indica que el campo electromagnético decae exponencialmente desde la superficie del cuerpo al atravesar el material. Por tanto podemos establecer un flujo de potencia en la dirección de propagación (z) dado por:

$$\vec{P} = P_{\text{superficie}} e^{-2\alpha z} \hat{z} \quad (2.28)$$

Donde $P_{\text{superficie}}$ es la potencia existente en la superficie del cuerpo.

También debemos destacar el concepto de profundidad de penetración, definida como aquella distancia desde la superficie a la cual la potencia decae hasta $1/e$. Está directamente relacionado con la atenuación debida a las pérdidas dieléctricas y a (2.28):

$$D_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (2.29)$$

En la figura 2.4 se puede observar la forma exponencial que sufre la disminución de la amplitud del campo eléctrico al atravesar un dieléctrico con pérdidas. Vemos como la ley de Lambert solo predice la envolvente de la señal.

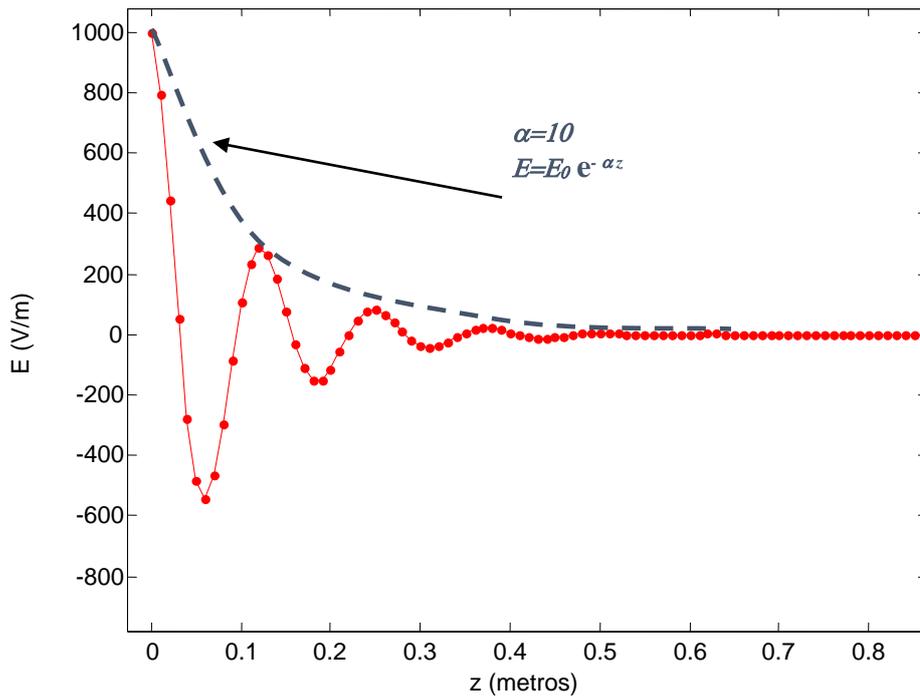


Figura 2. 4: Predicción de la Ley de Lambert frente a la progresión de una onda plana.

Para cuantificar el calor generado por absorción de microondas en una dimensión, según esta ley, se realiza un balance de la potencia absorbida en el material. Si consideramos que la potencia absorbida por unidad de superficie se puede expresar como:

$$P_s'' = \frac{P_{superficie}}{2(L_1L_2 + L_2L_3 + L_3L_1)} \quad (2. 30)$$

Donde:

- L_1 , L_2 y L_3 : Son, respectivamente, el grosor y los lados de una muestra rectangular (figura 2.5).
- $P_{superficie}$: Es la potencia sobre la superficie de la muestra.

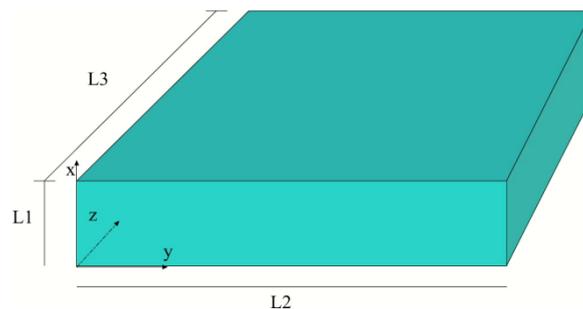


Figura 2. 5: Geometría usada para la aplicación de la Ley de Lambert.

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

$$P_x'' = P_s'' e^{-2\alpha} \quad (2. 31)$$

Derivando la potencia superficial respecto a x , y teniendo en cuenta las aportaciones de las dos caras de la muestra, obtendremos la potencia volumétrica absorbida en esta dirección:

$$Q_{gen} = P_X''' = 2\alpha P_s'' [e^{-2\alpha x} + e^{-2\alpha(L_1-x)}] \quad (2.32)$$

Esta ley ha sido utilizada en muchos trabajos que estudian procesos de secado en hornos microondas multimodo. Sin embargo, las condiciones sobre las que se pueden aplicar no se cumplen.

Sin embargo, se utiliza debido fundamentalmente a su sencillez y al hecho de que para dieléctricos con altas pérdidas proporciona unos resultados bastante aproximados al comportamiento experimental utilizado. A pesar de esto, algunos autores desaconsejan su uso sobre todo para dieléctricos con bajas pérdidas.

2.3 Características de la materia: permitividad y permeabilidad.

2.3.1 Las pérdidas dieléctricas.

En los puntos anteriores hemos visto, siempre desde un punto de vista teórico, porque se produce el calentamiento asistido por microondas y se han caracterizado los dieléctricos con pérdidas.

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

El calentamiento por microondas consiste en la habilidad del dieléctrico para polarizar sus cargas o mover sus iones positivos y/o negativos a lo largo de su volumen. Este movimiento es 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:

- Electrónico: movimiento de los electrones alrededor de su núcleo.
- Molecular: distribuciones de carga en los átomos y moléculas no uniforme.

A su vez, el mecanismo de polarización 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 2.6 se muestran los mecanismos de la redistribución de iones cargados no negativamente y la reorientación de los dipolos bajo el efecto de un campo eléctrico externo. En campos alternos de gran frecuencia las moléculas e iones vibrarán o rotarán alrededor de una posición, lo que hará que friccionen entre sí.

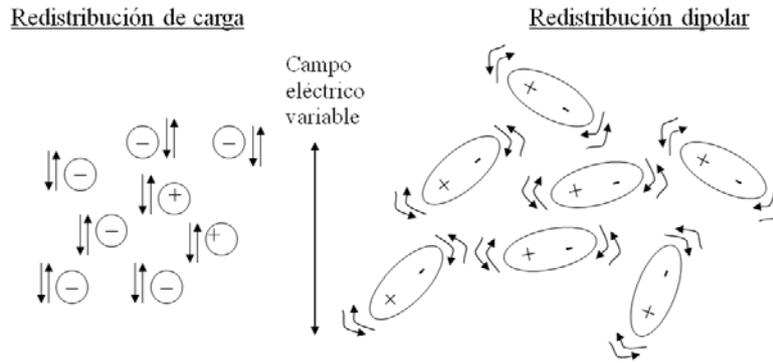


Figura 2. 6: Interacción del campo eléctrico variable con iones y moléculas dipolares.

Como con la mayoría de 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. Por tanto, el factor de pérdidas se puede expresar como una contribución de ambos mecanismos:

$$\varepsilon''_{eff}(\omega) = \varepsilon''_d(\omega) + \varepsilon''_e(\omega) + \varepsilon''_{MW}(\omega) + \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right] = \varepsilon''(\omega) + \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right] \quad (2.33)$$

Donde:

- Subíndices d, e, a y MW: Se refieren a las pérdidas dieléctricas debido a los mecanismos dipolares, electrónicos, atómicos y el efecto Maxwell-Wagner.
- σ : conductividad del medio eléctrico 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 que otros. Los más importantes serán, principalmente, los de polarización y los de conductividad en continua.

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

2.3.2 Ecuación de Debye.

El modelo de Debye está basado en la respuesta dieléctrica de relajación de una población ideal de dipolos que no interactúan unos con otros cuando están sometidos a un campo alterno externo.

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 en la forma:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.34)$$

Donde:

- ε_s y ε_∞ : Constantes dieléctricas a corriente continua y a muy altas frecuencias.
- τ : tiempo de relajación del sistema (controla el mecanismo de polarización).

Separando la permitividad en parte real e imaginaria:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.35)$$

$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (2.36)$$

La interpretación de estas fórmulas indica que a baja frecuencia los dipolos tiene bastante tiempo para seguir las variaciones de campo eléctrico por lo que el factor de pérdidas es pequeño. Por otro lado, 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.

2.3.3 Modelo 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:

$$\varepsilon_{MW}^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.37)$$

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): σ . De esta manera, el factor de pérdidas aumenta al disminuir la frecuencia debido a este término de conductividad.

Como conclusión, se debe tener en cuenta que, cuanto más dipolar sea un material, más pérdidas tendrá debido a los dos efectos anteriores y por 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, predominando en ellas el mecanismo dipolar.

A menores frecuencias, el fenómeno de calentamiento de agua ya no es dipolar, si no que ésta se calienta por conducción eléctrica debido a los iones positivos y negativos que el agua no pura presenta.

2.3.4 Permitividad.

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

1. Dichas propiedades marcan cómo se propaga la energía en el cuerpo.
2. También marcan como se transforma la energía de microondas en calor en el interior del dieléctrico tal y como indica la ecuación 2.11

Por tanto, 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. Por lo que la permitividad eléctrica indica si un material es susceptible de ser tratado con microondas o no.

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.

2.3.5 Comportamiento de la permitividad con el contenido de humedad.

Muchas aplicaciones del calentamiento por microondas conllevan la eliminación de humedad (agua) del interior de un material o carga. Por lo que, 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:

$$X = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (2.38)$$

Donde:

- X: contenido de humedad en base seca.
- m: masa total del cuerpo en un instante del proceso.
- m_s : masa de la matriz sólida de este mismo cuerpo.

Se suele distinguir entre dos tipos de agua en el interior de los materiales:

1. Agua ligada: Está en contacto con las paredes de la estructura sólida y de este mismo cuerpo.
2. Agua libre: Se comporta como agua normal y por lo tanto tiene un comportamiento polar.

En la figura 2.7 se muestra la variación del factor de pérdidas (ϵ'') en función del contenido de

humedad (X) de un sólido típico. Se pueden apreciar claramente dos etapas con diferentes pendientes ligadas a los dos tipos de agua que hay en el interior del cuerpo.

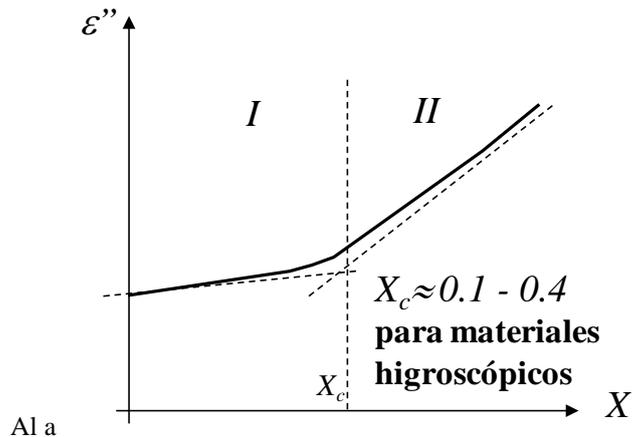


Figura 2. 7: Comportamiento habitual de la permitividad y el factor de pérdidas con la humedad.

La primera parte, la de menor pendiente, es debida al agua ligada mientras que la mayor pendiente, que se produce en el denominado contenido de humedad crítico (X_c), se observa para contenidos de humedad mayores en los que el agua del cuerpo es principalmente libre.

La diferencia de los comportamientos de la permitividad y el factor de pérdidas antes y después de X_c se debe a que el agua ligada tiene menor movilidad y por tanto no rota de igual manera que la libre (menor carácter dipolar).

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

$$\epsilon'' = \epsilon_0'' + AX + BX^2 \quad (2. 39)$$

Donde A, B y ϵ_0'' 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 II es fundamental para que las partes con mayor humedad absorban energía y en consecuencia, sequen a mayor velocidad.

En cambio, en la zona I, el secado selectivo no es tan eficiente puesto que las diferencias en la absorción (ϵ'') son mínimas para diferentes porcentajes de humedad.

2.3.6 Comportamiento de la permitividad con la temperatura.

Existen multitud de estudios sobre la dependencia de la permitividad con la temperatura en alimentos, agua, etc. Por ejemplo, está demostrado que el hielo presenta una menor permitividad que el agua líquida. En la figura 2.8 se representa la constante dieléctrica y el factor de pérdidas del nylon a distintas temperaturas a una frecuencia de 3 GHz. Puede observarse como al aumentar la temperatura aumentan tanto el factor de pérdidas como la constante dieléctrica.

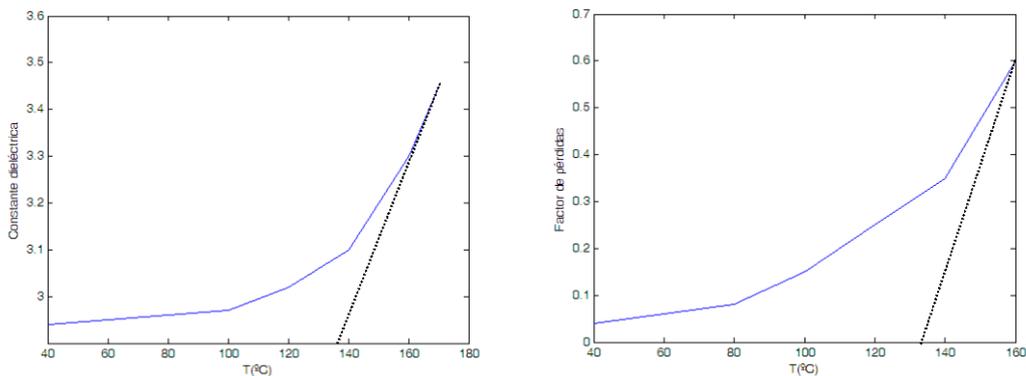


Figura 2. 8: Comportamiento de la permitividad y el factor de pérdidas para el nylon 66 en función de la temperatura.

Para cada material existe una temperatura crítica en la cual el material experimenta un cambio en sus propiedades dieléctricas muy acusado frente a la temperatura.

En la tabla 2.1 están las temperaturas críticas de diferentes materiales. La temperatura crítica muestra una indicación aproximada del punto a partir del cual el factor de pérdidas aumenta de manera significativa.

Material	temperatura crítica (°C)
Óxido de aluminio	800
Alumina	650-700
Nylon	140-150
Caucho SBR	40
Mycalex	450

Tabla 2. 1: Temperatura crítica para diferentes materiales.

Si nos fijamos en la ecuación 2.11 y en las propiedades del Nylon descritas anteriormente podemos llegar a que se produzca un incremento incontrolado de la temperatura denominado “Thermal runaway”.

Esto se produce porque el factor de pérdidas crece con la temperatura, con lo cual a mayor temperatura mayor absorción de potencia, lo que redunda en un crecimiento de temperatura mayor.

Este crecimiento de temperatura no controlado produce, o puede producir, daños en el material porque ciertos puntos de éste pueden llegar a calentarse tanto que el material no soporte la temperatura mientras que otros puntos permanecen a menor temperatura. Este efecto también se produce cuando se trata de descongelar productos, dado que aquellas zonas que se descongelan primero, absorberán más potencia, lo cual no asegura un secado uniforme.

2.4 Ecuación del calor.

En este apartado explicaremos la ecuación del calor, que permite calcular la distribución de temperaturas en el interior del material conocidos ciertos parámetros térmicos de éste. Pero antes analizaremos los mecanismos físicos que permiten que el calor se transfiera de un cuerpo a otro o bien se redistribuya en su interior.

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

- 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 puede utilizarse en el cuerpo para evaporar la humedad que éste contenga. Por lo que se puede producir una transferencia de humedad desde el interior del material hasta la superficie del mismo lugar donde pasa a formar parte del medio externo.
- Desarrollo de una energía mecánica, debida a los flujos de las fases líquidas y a las modificaciones de la estructura del material sólido considerado.

Esto quiere decir que, cuando se aplican microondas a un material, se está aportando una energía a un material que estaba en equilibrio termodinámico, haciendo que cambie su estado termodinámico.

2.4.1 Transferencia de calor convencional: Mecanismos físicos.

La conducción del calor: conductividad térmica.

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

En materiales homogéneos, la conductividad térmica (k_T), indica la habilidad de este material para redistribuir el calor de las zonas más calientes a las más frías.

En materiales heterogéneos, se han propuesto muchos modelos, que intentan obtener una conductividad efectiva a partir de las conductividades de las materias que componen el sólido mojado. Uno de los modelos es el de Maxwell cuya expresión es:

$$K_T = \frac{K_2[K_1 + 2K_2 - 2(1 - e)(K_2 - K_1)]}{[K_1 + 2K_2 + (1 - e)(K_2 - K_1)]} \quad (2.40)$$

Donde:

- K_i es la conductividad de la fase i .
- e es la fracción de la fase dos en el total.

La transferencia de calor por convección

Tiene lugar cuando existe un fluido en movimiento sobre la superficie de un material, estando ambos a distintas temperaturas. Para este caso existen dos mecanismos de transferencia de energía:

1. Existe una transferencia de energía debida al movimiento aleatorio de las moléculas en la interfaz del fluido y el sólido, las cuales al chocar transmiten energía.
2. El fluido, con una velocidad dada, puede transferir parte de esta energía a la interfaz del solido de forma macroscópica, ya que grandes agregados de moléculas se mueven dentro del fluido.

Por tanto, la convección es un fenómeno superficial por lo que las ecuaciones de este proceso físico serán tratadas como ecuación de contorno en el material.

El 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.

No consideraremos relevante este mecanismo de transmisión de calor frente al de convección puesto que su aportación al flujo total de calor suele ser muy pequeño comparada con los mecanismos de convección.

El calentamiento por microondas

Desde hace tiempo es conocida la posibilidad de calentar materiales mediante la aplicación de ondas electromagnéticas en la banda de microondas. Su origen nace de la interacción del campo eléctrico con las moléculas o partículas que tienen una carga no nula, bien desplazándolas de lugar (conducción) o bien haciéndolas girar alrededor de su posición de equilibrio (polarización).

Cuando el campo eléctrico cambia de dirección muy rápidamente, las partículas y moléculas intentan seguir estos cambios. Estos movimientos provocan fricciones que generan calor en el interior del material.

2.4.2 La ecuación del calor: Modelado del calentamiento por microondas.

Vamos a analizar cómo se pueden modelar los cuatro procesos de calentamiento y distribución de calor vistos anteriormente.

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

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = K_T \nabla^2 T + Q_{gen} \quad (2.41)$$

Donde:

- K_T : conductividad térmica del material (W/m°C).
- ρ : densidad (kg/m³).
- c_p : calor específico (J/kg°C).
- T : temperatura (°C).
- Q_{gen} : calor generado por microondas (W/m³).

Esta ecuación llamada habitualmente ecuación del calor con el término de generación por microondas es válida cuando en el cuerpo se produce un calentamiento por microondas y no suceden otros procesos.

El término de la izquierda en (2.41) marca el incremento de temperatura en el cuerpo, que será menor cuanto mayor sean ρ y c_p . El primer término de la parte derecha marca como se redistribuye el calor debido al fenómeno de conducción térmica, siendo la siguiente ecuación el operador laplaciano en cartesianas:

$$\nabla^2 T = \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (2.42)$$

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

$$\frac{dT}{dx} = \alpha_T \nabla^2 T + \frac{e_v}{c_p} \Delta H_{ev} \frac{dX_l}{dt} + \frac{Q_{gen}}{\rho c_p} \quad (2.43)$$

Donde:

- e_v : coeficiente de evaporación interna. Representa la fracción de agua evaporada en el interior del material frente a la evaporada en su superficie. En este modelo solo tomará valores entre 0 y 1.
- ΔH_{ev} : Vapor latente de evaporación (energía necesaria para evaporar un kg de agua).
- X_l : Contenido de humedad líquido. Disminuirá a lo largo del tiempo. La derivada del término introducido será negativa y por tanto, disminuirá la temperatura global del cuerpo.

Dicho esto, cuando existe evaporación en el cuerpo, la temperatura del mismo crece menos que si dicha evaporación no existiera o, dicho de otra manera, cuando el agua absorbe energía para evaporarse, dicha energía no puede usarse para elevar la temperatura del cuerpo.

2.5 Modelos para el secado asistido por microondas.

El calor generado puede utilizarse en el cuerpo para evaporar la humedad que éste contiene. 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. Los secadores industriales más usados, por simplicidad, son aquellos que

emplean aire caliente y ventilación forzada para transmitir calor al material y eliminar la humedad del producto.

En cambio, 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.

Para materiales donde la conductividad es baja, o de dimensiones considerables, este tipo de transmisión de calor es, a menudo, 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 migrar hasta la superficie para ser extraída. Este proceso se produce por diversos mecanismos, los cuales son lentos y condicionan la velocidad de secado.

Por otra parte, 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. Normalmente, se utiliza el contenido de humedad en base seca (X) visto anteriormente.

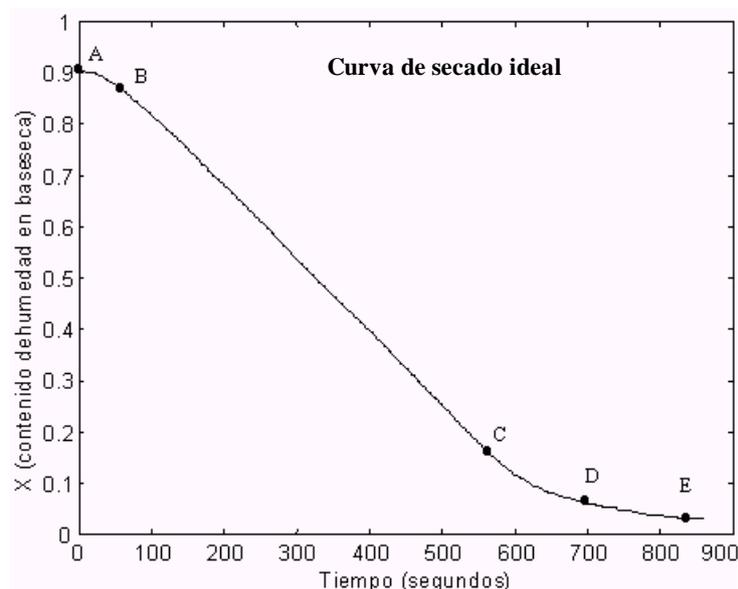


Figura 2. 9: Curva de sacado ideal con diferentes etapas de secado.

En la figura 2.9 vemos una curva típica de secado. A partir de esta curva se pueden definir varios periodos en el secado, los cuales no aparecen siempre para los mismos materiales. Esto conlleva a pensar que se producen varios mecanismos de secado y que en cada periodo un mecanismo es el dominante:

- Periodo de calentamiento o inducción: 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 (tramo 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 reemplazada por agua interior gracias a algunos de los mecanismos de transferencia de masa (tramo BC).
- Periodo de tasa de secado a velocidad decreciente: En este periodo, 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 de agua. Por tanto, la migración interna de la humedad no puede igualar la velocidad de evaporación del agua en la superficie. En consecuencia, en este periodo, el secado está controlado por los mecanismos internos (trazo CE).

Para finalizar, debe decirse que los hornos de secado tienen en su interior flujos de aire para permitir evacuar el vapor de agua que se genera en los materiales que están siendo secados. Dicho flujo debe ser renovado para que el ambiente dentro del secadero no se sature e impida una correcta ejecución del proceso de secado.

2.6 Estudio teórico para el cálculo de la eficiencia.

Para calcular la eficiencia, la potencia entregada a la cavidad y la potencia absorbida por el material deben ser conocidas. La potencia entregada por el magnetrón, es decir, la entregada a la cavidad se conoce fácilmente de los datos obtenidos de la fuente MAGDRIVE 1000. En cambio, la potencia absorbida por el material no es tan fácil de calcular, ya que hay dos contribuciones para esta magnitud:

- Potencia absorbida por el material.
- Potencia disipada en las paredes de la cavidad.

La potencia absorbida de microondas se calcula mediante el cálculo de los cambios energéticos en el material húmedo. Por lo tanto, la energía de microondas se puede deducir de la medida de los cambios de temperatura en la muestra y de la tasa de evaporación. Las ecuaciones 2.44 a 2.47 describen estos cálculos hechos a partir de los datos experimentales.

$$\eta_{mag} = \frac{P_{abs}}{P_{mag}} \quad (2.44)$$

$$\eta_{elec} = \frac{P_{abs}}{P_{elec}} \quad (2.45)$$

$$P_{abs} = P_{T-l} + P_{T-w} + P_{ev} + P_{conv} \quad (2.46)$$

$$P_{elec} = P_{mag} + P_{refrigeración} + P_{bombo} \quad (2.47)$$

Donde η_{mag} , η_{elec} son, respectivamente, la eficiencia magnética en el proceso de secado y la eficiencia eléctrica en el proceso de secado. P_{abs} , P_{mag} y P_{elec} son la potencia absorbida por el material, la potencia entregada por el magnetrón y la potencia eléctrica consumida. Seguidamente, P_{T-l} representa la cantidad de potencia gastada en calentar la masa humedad del material, mientras P_{T-w} es la potencia necesaria para aumentar la temperatura de la humedad contenida en el material y P_{ev} es la energía usada para mantener la tasa de

evaporación observada y P_{conv} es la potencia en el cuerpo generada por convección, puede ser ganada o perdida. Finalmente, $P_{refrigeración}$ es la potencia consumida por el sistema de refrigeración y P_{bombo} la potencia consumida por el bombo de la secadora.

Las potencias de la ecuación 2.46 se calculan de la siguiente manera:

$$P_{T-l} = c_{p-l} \cdot m_l \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.48)$$

$$P_{T-w} = c_{p-w} \cdot m_w \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.49)$$

$$P_{ev} = \Delta H_w \cdot N_w \cdot A \quad (2.50)$$

$$P_{conv} = h_T \cdot (T_{sur} - T_{air}) \cdot A \quad (2.51)$$

Donde c_{p-l} y c_{p-w} son el calor específico del material seco y del agua, respectivamente y N_w la tasa de evaporación. A representa el área total del material, y m_l y m_w son la masa seca del material y el contenido interno de humedad. Finalmente, ΔH_w es el calor latente de vaporización del agua, y h_T el coeficiente de transferencia de calor por convección, mientras que T_{sur} and T_{air} son, respectivamente, la temperatura de la superficie del cuerpo y del flujo del aire.

3. Dispositivos de calentamiento por microondas.

3.1 Esquema básico de un sistema de calentamiento por microondas.

La figura 3.1 muestra el diagrama de un sistema básico de microondas. La fuente de alimentación se encarga de proporcionar al magnetrón la energía AC/DC necesaria para su funcionamiento, transformando la corriente de red en voltajes y corrientes adecuados para el magnetrón.

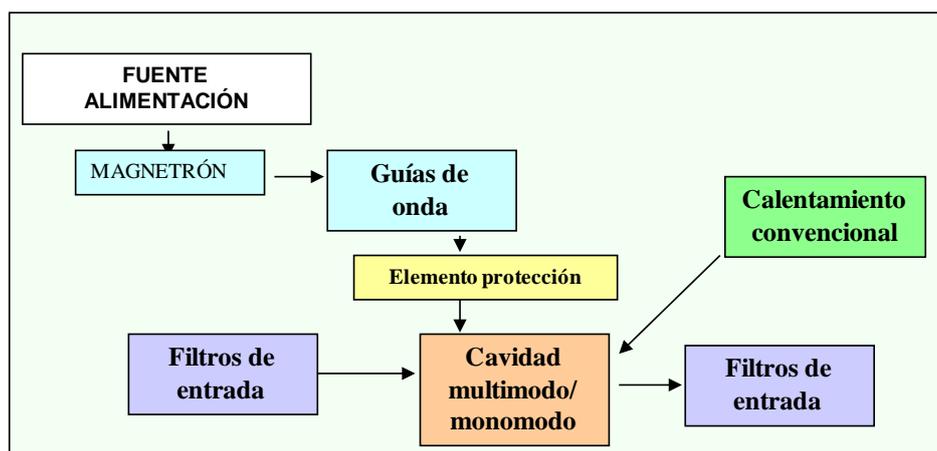


Figura 3. 1: Diagrama de un sistema básico de calentamiento por microondas.

El magnetrón usa esta energía de baja frecuencia transformándola en energía de microondas debido a su estructura resonante. Las dimensiones del magnetrón permiten controlar la frecuencia de la señal que se emite. El control de la potencia se controla, principalmente, con la corriente que llega al ánodo o el campo magnético aplicado a la cavidad que conforma el magnetrón. Al conjunto fuente más magnetrón se le denomina fuente de microondas, soliendo estar cada fuente asociada a un puerto acoplado a la cavidad de microondas.

La energía de microondas del magnetrón se acopla a una guía de onda a través de una antena. Dicha transición magnetrón- guía de onda se suele denominar "launcher". La razón de no utilizar cables coaxiales para transportar las señales es que, debido a que las potencias usadas, del orden de cientos o miles de vatios, terminarían quemando el coaxial. En cambio, las guías de onda son capaces de soportar megavatios sin problemas.

Cuando se prevén fuertes reflexiones o se van a usar magnetrones de alta potencia, se suelen utilizar elementos de protección que, por lo general, están constituidos por circuladores. Estos dispositivos permiten alargar el tiempo de vida de los magnetrones.

La cavidad de microondas es el elemento fundamental para conseguir un calentamiento y procesamiento de los materiales efectivo y con un alto grado de calidad. Por lo general, debe proporcionar una distribución de campo eléctrico lo más uniforme posible en las muestras a procesar y para ello se pueden usar diferentes técnicas como movimiento de la muestra, entre otras.

También se debe asegurar que la eficiencia de los hornos sea alta para que no se desperdicie la energía reflejándose hacia el magnetrón o acoplándose entre las diferentes fuentes. Para

ello se utilizan “stubs”, cortocircuitos móviles o dieléctricos.

Existen muchos tipos de aplicadores o cavidades de microondas, desde las monomodo, usadas en el laboratorio, hasta las multimodo, que permiten procesar muestras mucho mayores.

En la mayoría de las aplicaciones es necesario añadir otras tecnologías de calentamiento, para conseguir perfiles de temperatura uniformes.

Por último, los hornos microondas deben disponer de filtros en las áreas destinadas a introducir/ sacar las muestras a ser procesadas. En los casos en los que el proceso se hace por lotes el filtro se realiza sobre la propia puerta, la cual no suele tener contacto eléctrico con el horno.

Ahora vamos a pasar a analizar con más detalle los componentes utilizados en nuestro montaje experimental, el cual será explicado en el siguiente capítulo.

3.2 Generador de microondas: el magnetrón.

El magnetrón es el elemento ideal para generar calor, debido a que presenta una gran estabilidad en frecuencia y porque tiene una eficiencia aceptable, del orden de un 60-70 %.

La figura 3.2 muestra los componentes internos y externos de un magnetrón mientras que la tabla 3.1 especifica las diferentes partes del mismo.

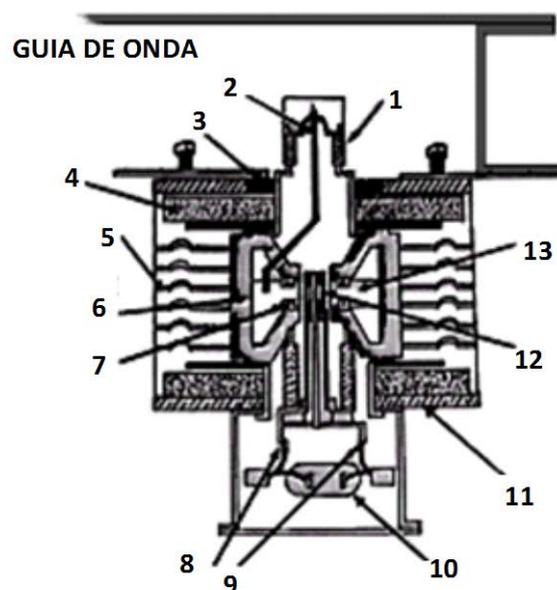


Figura 3. 2: Sección transversal de un magnetrón.

1	Cerámica	2	Antena
3	Gasket	4	Imán
5	Láminas de refrigeración	6	Ánodo
7	Sujeción de los anillos	8	Cable para el filamento
9	Cable para el cátodo	10	Terminal con condensadores de radiofrecuencia
11	Habitáculo para el magnetrón	12	Filamento del cátodo
13	Vanos o cavidades internas del magnetrón		

Tabla 3. 1: Partes del magnetrón.

El magnetrón está compuesto por una cavidad de microondas en la cual cátodo y ánodo se encuentran a muy diferentes tensiones. El cátodo es calentado por las altas corrientes que circulan por el de forma que emite electrones a la cavidad interna.

Por otra parte, el ánodo tiene una serie de cavidades que se proyectan en la dirección radial, llamadas vanos (figura 3.2). La profundidad de los vanos es igual a $\lambda_g/4$ y por tanto resuenan a la frecuencia de operación. Al estar todos los vanos acoplados entre sí, toda la estructura es un circuito resonante.

Al estar el ánodo a un mayor voltaje que el cátodo, los electrones emitidos tienen a irse hacia el ánodo. El campo magnético generado por el imán impide una trayectoria directa para estos electrones y los hace girar en su camino desde el cátodo hasta el ánodo.

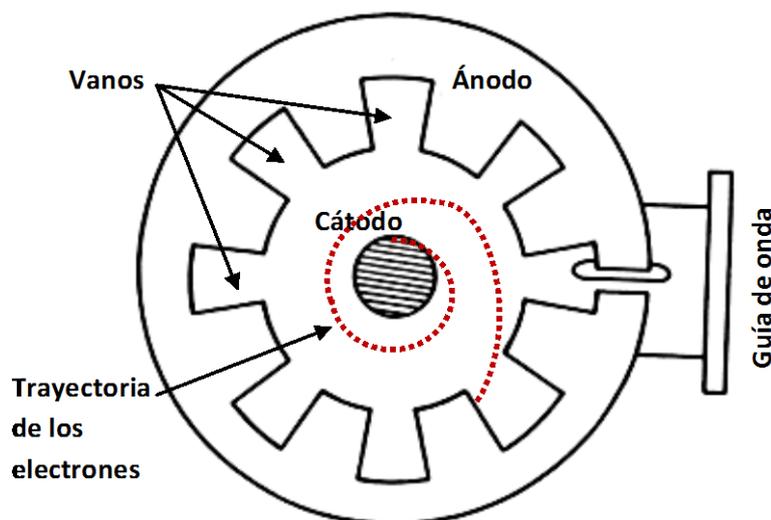


Figura 3. 3: Comportamiento del campo del magnetrón.

La energía cinética de los electrones, debido al giro de estos en el interior de la cavidad, se acopla como energía de microondas en las cavidades. Esto se debe a que el giro de los electrones no es más que una corriente, la cual genera campos electromagnéticos dentro de la cavidad. El control del voltaje de continua controla la velocidad de los electrones y por tanto

la energía de microondas final. Otra posibilidad podría ser mediante cambios en el campo magnético del interior de la cavidad.

Finalmente, sólo hay que añadir una antena en una de las cavidades para extraer la energía de microondas. Únicamente se añade una antena dado al alto acoplo entre cavidades.

Los electrones al impactar con el metal que forma el ánodo liberan energía en forma de calor, la cual no es transformada en energía de microondas y, por tanto, disminuye la eficiencia. Esto implica que el magnetrón se calentará a gran velocidad y en consecuencia, se debe refrigerar el magnetrón cuando esté en funcionamiento. Dependiendo de la potencia se utilizará agua o aire para refrigerar el magnetrón.

3.2.1 Diagrama de Rieke.

Las variaciones en potencia (“power pulling”) y en frecuencia (“frequency pulling”) debidas a la carga conectada equivalente a la salida del magnetrón pueden representarse en el diagrama de Rieke, que muestra en la carta de Smith el comportamiento de los magnetrones en función de la impedancia de carga. La figura 3.4 muestra un ejemplo de este tipo de diagramas.

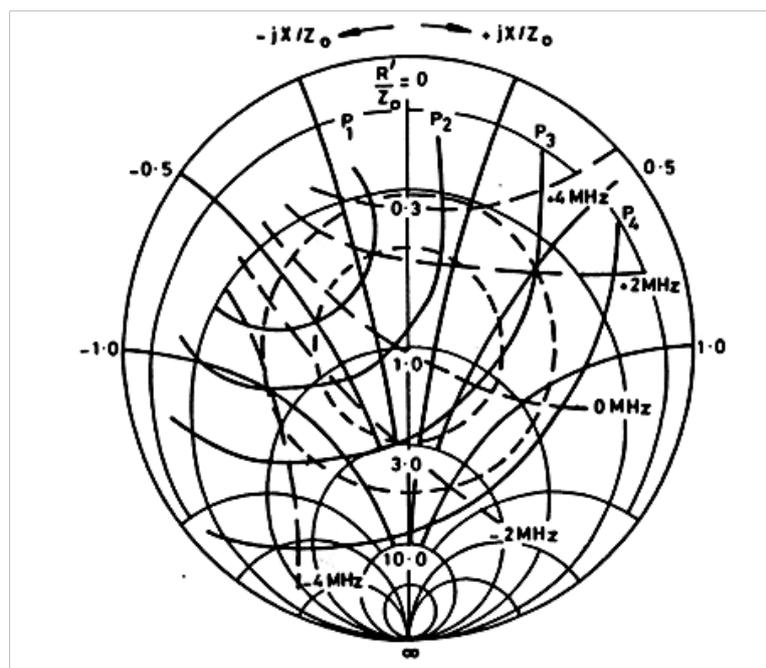


Figura 3. 4: Diagrama de Rieke.

En el diagrama se muestra la potencia y la frecuencia de salida en función de la carga conectada al magnetrón. Las circunferencias internas del diagrama marcan los puntos del diagrama con relación R_{carga}/Z_0 , siendo R_{carga} la parte resistiva de la carga y Z_0 la impedancia característica de la guía de onda. En la parte exterior del diagrama se muestra la relación entre la reactancia de la carga conectada al magnetrón y dicha impedancia característica.

Estas curvas de impedancia y reactancia normalizada intersectan con las curvas de potencia constante así como con las curvas que marcan la variación en frecuencia, indicándonos de esta forma, cuales son las variaciones sufridas por estas magnitudes en función de la impedancia normalizada.

Dentro de lo permitido por los fabricantes, el “frequency pulling” y el “power pulling” suelen estar, respectivamente, por debajo de un 0.2% y un 15%. Esto quiere decir que para una frecuencia de 2.45 GHz, ésta podrá variar ± 4.9 MHz, lo que mantendría al magnetrón dentro de la banda ICM.

3.3 Fuentes de alimentación.

Su función es la de proporcionar una corriente constante al ánodo del magnetrón y aplicar el ciclo de trabajo correcto para la potencia a proporcionar seleccionada. En definitiva, es la responsable de la potencia de salida final del magnetrón. Además, cabe decir que son los dispositivos más caros del sistema, llegando a alcanzar un 50-60% del coste total del equipo.

Existen diferentes formas de alimentar al magnetrón, pero todas tienen una característica en común, la necesidad de proporcionar una corriente de ánodo constante.

3.3.1 Fuente con transformador variable mecánicamente.

Es este tipo, el transformador de entrada es variable, controlado electromecánicamente. La selección de la potencia de salida se realiza mediante una mayor o menor transformación de la tensión de entrada. Debe de haber un servo-control que modifique la posición de la aguja del transformador de manera continua. La señal de entrada del servo control será la comparación de una tensión de referencia con la corriente del ánodo, permitiendo mantener la potencia de salida seleccionada.

En la figura 3.5 podemos observar el esquema básico de este tipo de fuente. Su funcionamiento es el siguiente: tras fijar la potencia, la aguja queda fijada en el transformador variable dejando pasar a la siguiente etapa una parte de la corriente alterna de red. Los diodos rectifican la señal alterna proporcionando una corriente y tensión al magnetrón de continua. La corriente de ánodo servirá para generar una tensión que se comparará con la tensión de referencia y según la comparación la aguja subirá o bajará para ajustarse a la potencia seleccionada por el usuario.

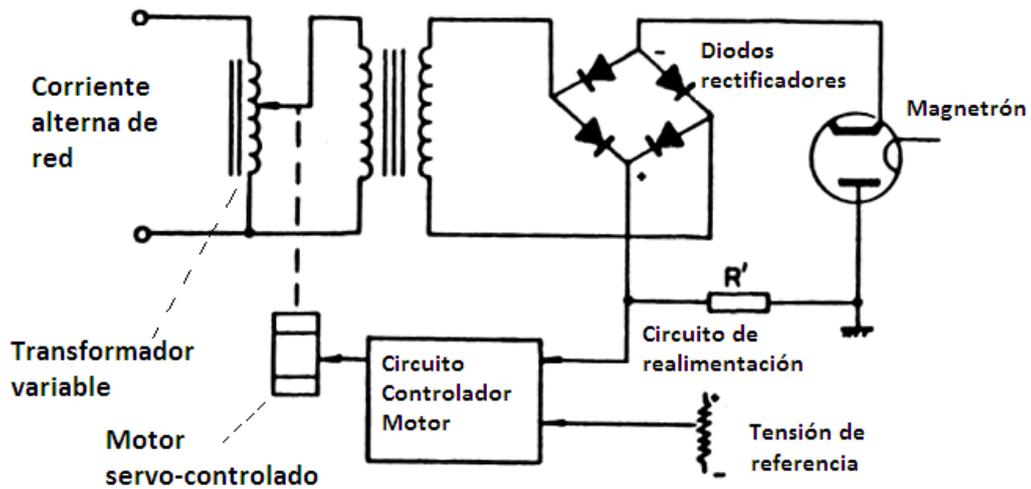


Figura 3. 5: Fuente de alimentación con transformador variable.

3.3.2 Fuente con control por tiristor.

En este tipo de fuentes, el control se realiza mediante tiristores. Como podemos apreciar en la figura 3.6, el transformador en este tipo de puentes es fijo y en ningún caso varían sus características de transformación.

Los tiristores están controlados en fase para controlar la potencia en alterna del transformador. La diferencia entre el voltaje, de referencia, en continua y el voltaje en la resistencia su usa para cambiar la fase de los tiristores. Si queremos reducir el voltaje, se cambia la fase de los tiristores de forma adecuada Cando la fase es alta, la corriente de salida se activará más tarde por lo que la potencia de salida en el tiristor será menor que la de entrada. Cuando la fase es cero, la potencia de salida será la misma que la de entrada.

Dado que el control es electrónico, se puede realizar un ajuste más rápido que con el sistema anterior. El problema viene en que los tiristores deben ser capaces de soportar la potencia total de la fuente sin degradarse, empleando para ellos dispositivos de muy alta potencia.

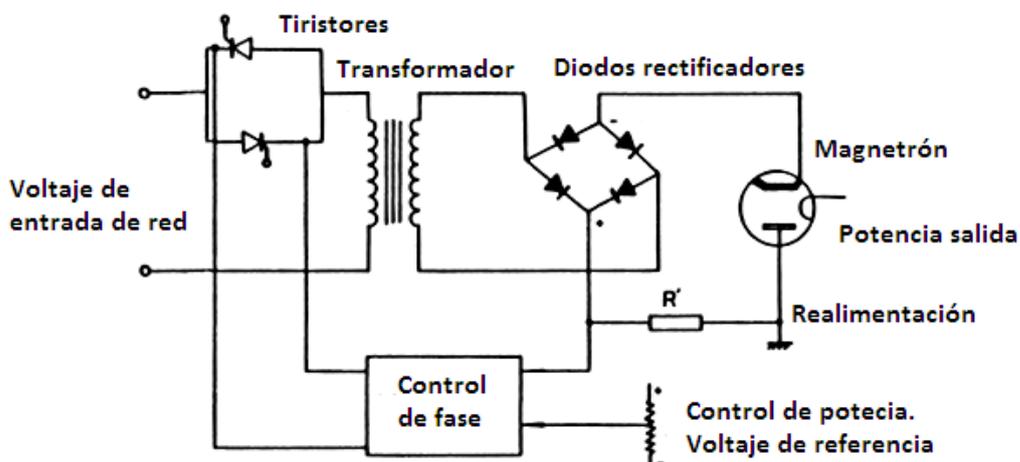


Figura 3. 6: Fuente con control por tiristor.

3.3.3 Fuente con control por reactor saturable.

Este método es muy usado para controlar magnetrones de baja potencia. En la figura 3.7, vemos como utiliza un inductor variable en serie con un condensador, lo que provoca un filtro paso banda de primer orden que permite pasar la señal de red cuando está correctamente sintonizado (condición de resonancia).

Mediante el control del circuito resonante se puede controlar la corriente AC que llega al puente de diodos. Es decir, si queremos que llegue menos corriente al puente de diodos, se puede desintonizar el circuito resonante serie mediante el cambio de valor de la inductancia variable.

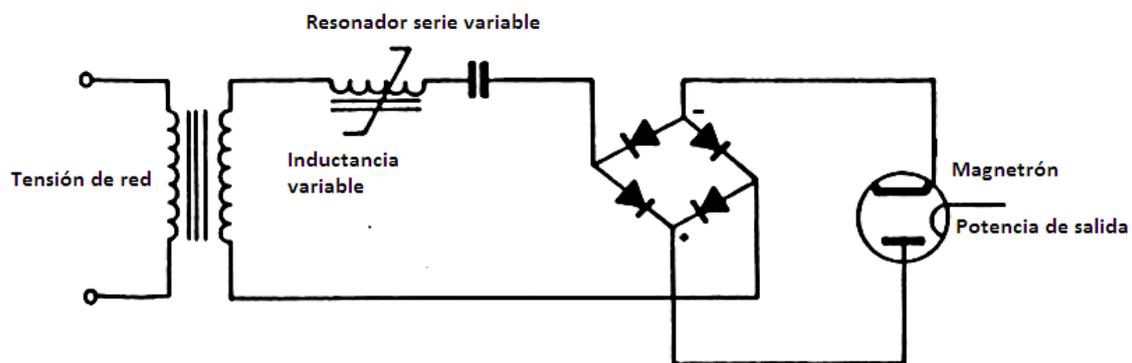


Figura 3. 7: Fuente con reactor variable.

3.3.4 Fuente con control por campo magnético variable.

Este tipo difiere bastante de los anteriores, ya que controlamos la corriente del ánodo a través del campo magnético aplicado a través del magnetrón.

En 3.8 podemos observar el esquema de control más usado. Se puede apreciar como el control para mantener dicho campo eléctrico se realiza mediante una señal de referencia y un circuito de control. Su ventaja viene en que para magnetrones de alta potencia no es necesario el control de intensidades de corriente demasiado elevadas.

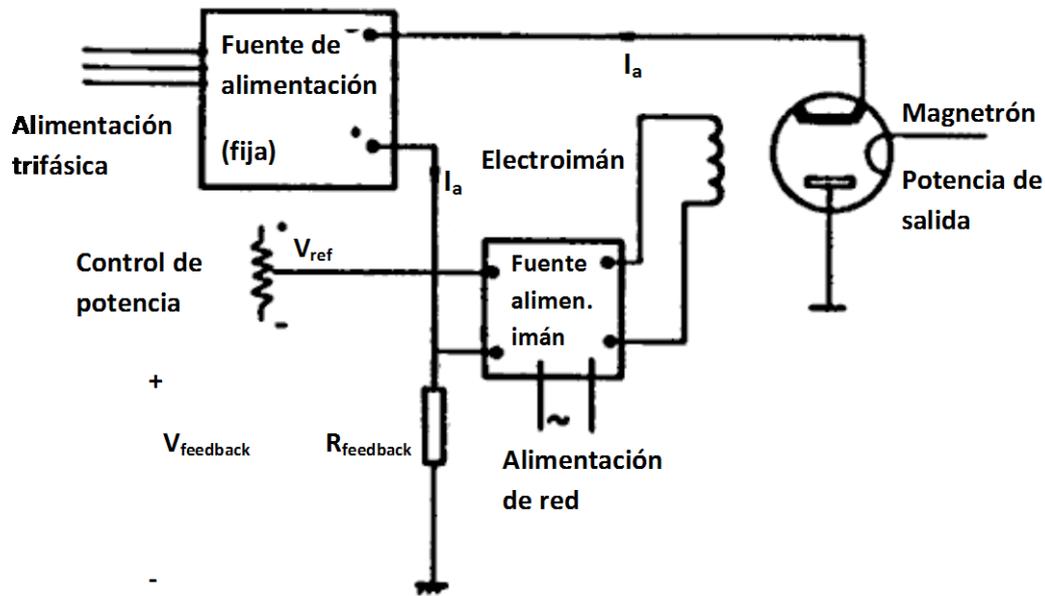


Figura 3. 8: Fuente con campo magnético variable.

3.4 El aplicador de microondas.

Se define como la parte del sistema en la cual se introduce la muestra a ser calentada. Se le suele denominar cavidad, aunque existen aplicadores que están basados en guías de onda terminadas en cargas adaptadas.

Es el máximo responsable de dos cuestiones fundamentales del proceso:

- a) La eficiencia.
- b) La uniformidad de la temperatura en la muestra a calentar.

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

Por lo que podemos dar como definición más completa la siguiente: es aquella estructura metálica que permite confinar la energía de microondas junto con el material a calentar y que es responsable de la eficiencia energética del proceso y de la uniformidad de calentamiento.

3.4.1 Características.

El aplicador debe cumplir los siguientes requisitos:

- Debe adaptarse a las dimensiones físicas y eléctricas del material.
- Debe adaptarse al tipo de aplicación.
- Adaptación a las características del terminal.
- Eficiencia energética.

- Uniformidad de campo eléctrico.
- Cumplir los requisitos económicos de las empresas
- Dimensionado de la potencia a usar.
- Confinamiento adecuado de la energía de microondas.

3.4.2 Tipos.

Podemos hablar de una primera división entre aplicadores basados en cavidades resonantes y aplicadores basados en guías de onda. En el primer caso, la muestra es introducida en una cavidad metálica y el campo eléctrico será una combinación de los modos que resuenan en la misma en la frecuencia del magnetrón. Estas cavidades a su vez se pueden clasificar en monomodo y multimodo.

En nuestro caso, nos vamos a centrar en las multimodo ya que es la utilizada en el montaje experimental de la secadora.

Las cavidades multimodo son aquellas en las que a la frecuencia de trabajo coexistirán varios modos resonantes dentro del espacio delimitado por las paredes metálicas. El patrón de calentamiento vendrá dado por la geometría de la cavidad y la muestra así como de las propiedades dieléctricas de la misma.

Como norma general, en su interior se usarán técnicas de uniformización de campo basadas en el movimiento de la muestra a calentar o en el uso de agitadores de modos.

En la figura 3.9 podemos observar la geometría de una cavidad multimodo vacía así como las componentes que existirán para los modos resonantes TE (transversales eléctricos) y TM (transversales magnéticos). Como indica su nombre los modos TE no tienen componente z en el campo eléctrico mientras que los TM no tienen componente z en el campo magnético.

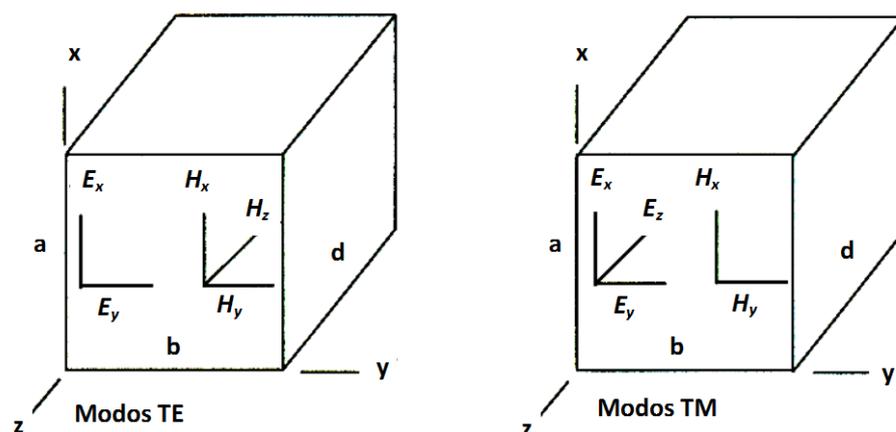


Figura 3. 9: Cavidad resonante multimodo y modos TE y TM.

Las expresiones de los campos eléctricos y magnéticos para los modos TE se muestran en el sistema de ecuaciones (3.1):

$$\begin{aligned}
 E_x &= \frac{j\omega\mu_0 n\pi}{h^2} \frac{n\pi}{b} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 E_y &= -\frac{j\omega\mu_0 m\pi}{h^2} \frac{m\pi}{a} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 E_z &= 0 \\
 H_x &= -\frac{1}{h^2} \frac{m\pi p\pi}{a L} H_0 \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 H_y &= -\frac{1}{h^2} \frac{n\pi p\pi}{b L} H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 H_z &= H_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 h^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

De igual manera, el sistema de ecuaciones (3.2) muestra las componentes de campo eléctrico y magnético para los modos TM:

$$\begin{aligned}
 H_x &= \frac{j\omega\varepsilon\varepsilon_0 n\pi}{h^2} \frac{n\pi}{b} \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 H_y &= -\frac{j\omega\varepsilon\varepsilon_0 m\pi}{h^2} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 H_z &= 0 \\
 E_x &= -\frac{1}{h^2} \frac{m\pi p\pi}{a L} E_0 \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 E_y &= -\frac{1}{h^2} \frac{n\pi p\pi}{b L} E_0 \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \operatorname{sen}\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 E_z &= E_0 \operatorname{sen}\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \cos\left(\frac{p\pi}{L}z\right) \\
 h^2 &= \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Siendo a , b y L las dimensiones de la cavidad. Por otro lado x , y y z son las coordenadas en las cuales se evalúa cada componente de campo. Por último, los índices m , n y p marcan las variaciones del campo eléctrico/magnético a lo largo de los ejes x , y y z , respectivamente.

Otra característica de las cavidades resonantes es la frecuencia de resonancia (3.3) en función de las dimensiones de la cavidad, de las propiedades magnéticas y dieléctricas del material presenten en el interior de la cavidad y de los índices de estos modos. Se puede apreciar como para unas dimensiones constantes, la frecuencia de resonancia del modo será mayor conforme aumenten los índices considerados para este cálculo.

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{L}\right)^2} \tag{3.3}$$

En nuestro caso el aplicador utilizado es una cavidad multimodo de microondas que presenta las siguientes dimensiones: 60 x 52.5 x 42.5 cm. Dicha cavidad incluye en su interior un tambor rotatorio el cual se encarga de mover la muestra para que la energía entregada por los magnetrones emita sobre las diferentes zonas de la muestra.

3.5 Guías de onda.

Es un elemento fundamental en el calentamiento por microondas. Se usan de manera casi única como el medio de transmisión de la energía de microondas por sus características: permiten transmitir grandes potencias con una atenuación casi nula y, por tanto, con poco nivel de calentamiento.

El principal problema de este medio de transmisión es que presentan un comportamiento dispersivo de forma que solo pueden usarse en condiciones monomodo, lo cual restringe su uso a anchos de banda pequeños.

Generalmente se usan guías de onda normalizadas con tamaño estándar y, en el caso del calentamiento por microondas, la guía de onda más usada a 2.45 GHz es el modelo WR-340 cuyas dimensiones internas para la sección transversal a la dirección de propagación son 8.6 x 4.3 cm².

En la figura 3.10 podemos observar una guía de onda de este modelo acoplada a un 'launcher' en el cual acoplar el magnetrón:

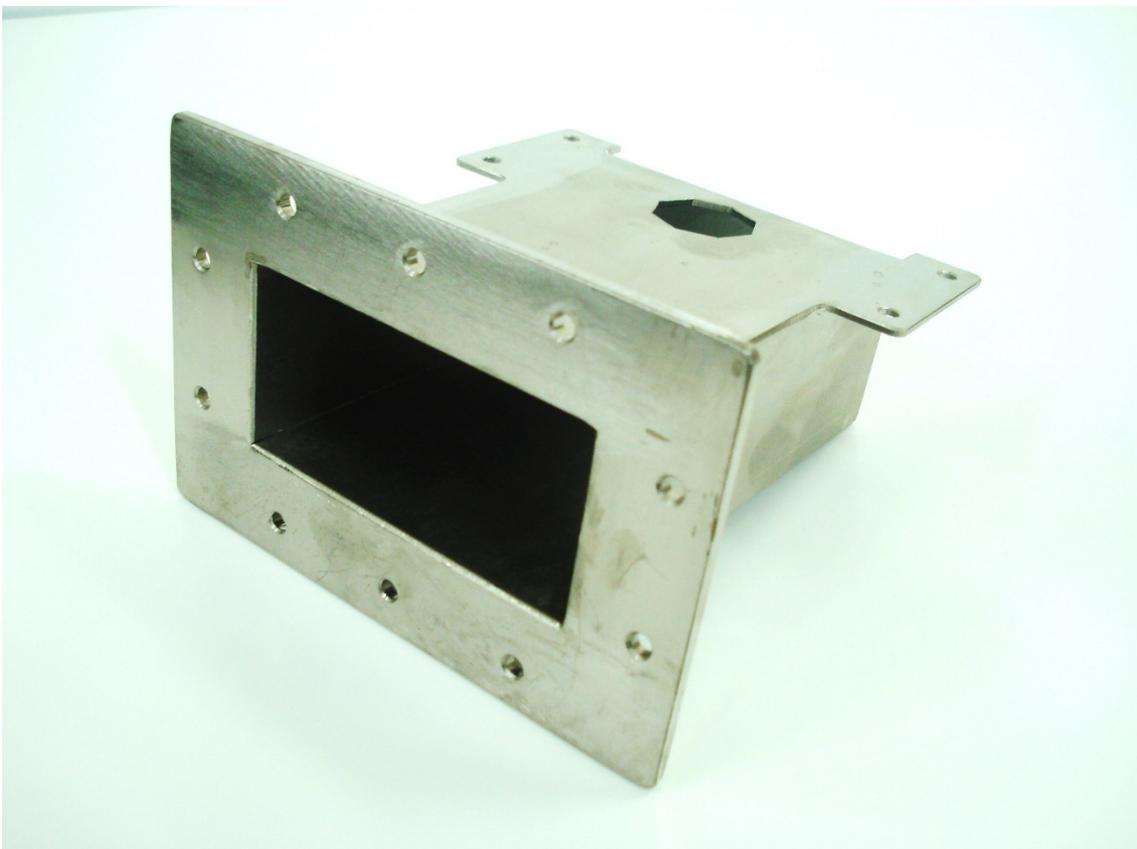


Figura 3. 10: Guía de onda WR-340.

4. Montaje experimental y proceso.

4.1 Elementos.

En este apartado vamos a analizar cada uno de los elementos usados para nuestras pruebas experimentales.

En la figura 4.1 podemos apreciar el montaje completo del sistema con las distintas partes que lo componen enumeradas.

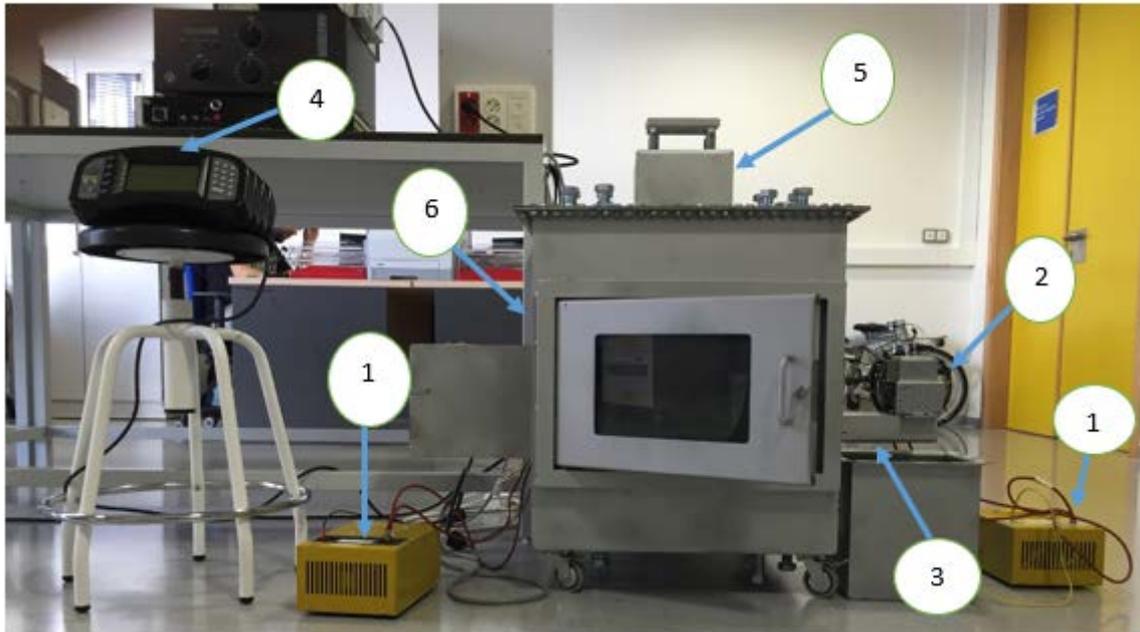


Figura 4. 1: Montaje experimental.

Los elementos numerados son los siguientes:

1. Fuente de alimentación MAGDRIVE1000.
2. Magnetrón Panasonic modelo: 2M244-M23.
3. Guía de onda.
4. Termopar Fluke modelo: 1560.
5. Sistema de extracción de aire.
6. Cavidad en cuyo interior se encuentra el bombo que almacena la ropa (figura 4.2).

Mencionar que dentro de la cubierta que protege al magnetrón y la guía de onda se encuentra el sistema de refrigeración del magnetrón.

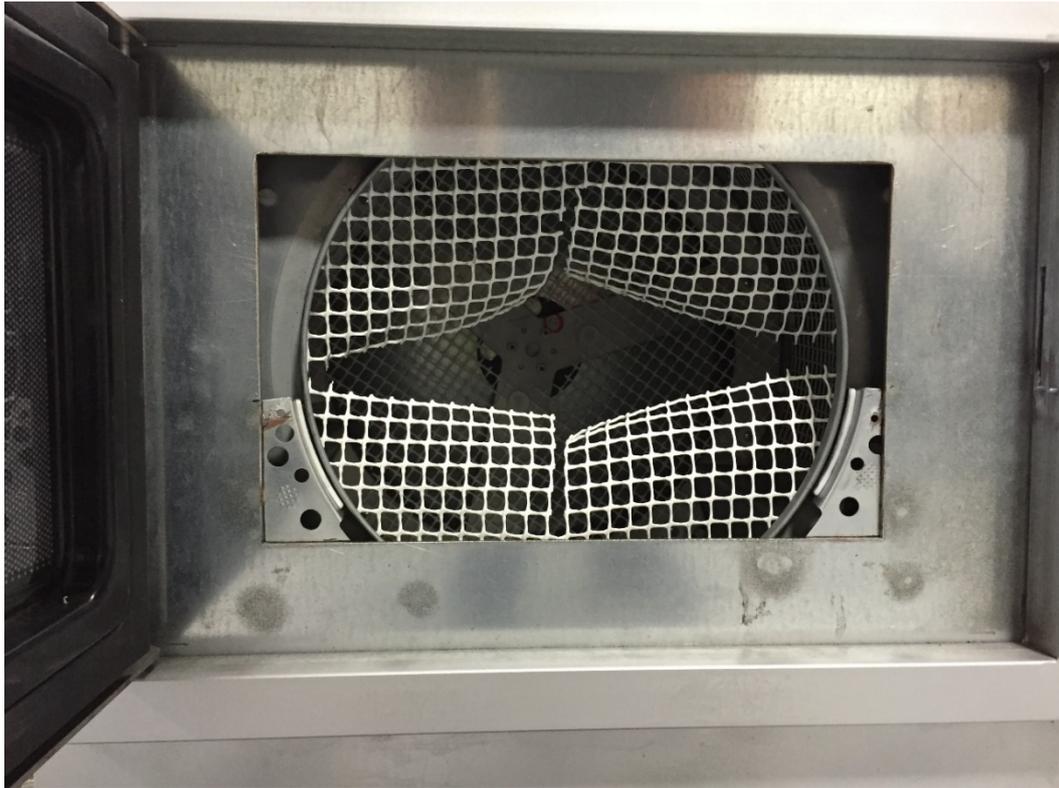


Figura 4. 2: Interior de la cavidad.

4.1.1 Fuente MAGDRIVE1000.

Es un elemento importante, ya que lo vamos a controlar mediante software. Se comunica mediante un cable RS232 al ordenador (figura 4.3). Su función principal será la de transmitir al magnetrón los patrones de potencia definidos para las diferentes pruebas.

Además de transmitir la potencia al magnetrón también se comunicará en todo momento con el ordenador, verificando que la transmisión se está realizando sin errores.

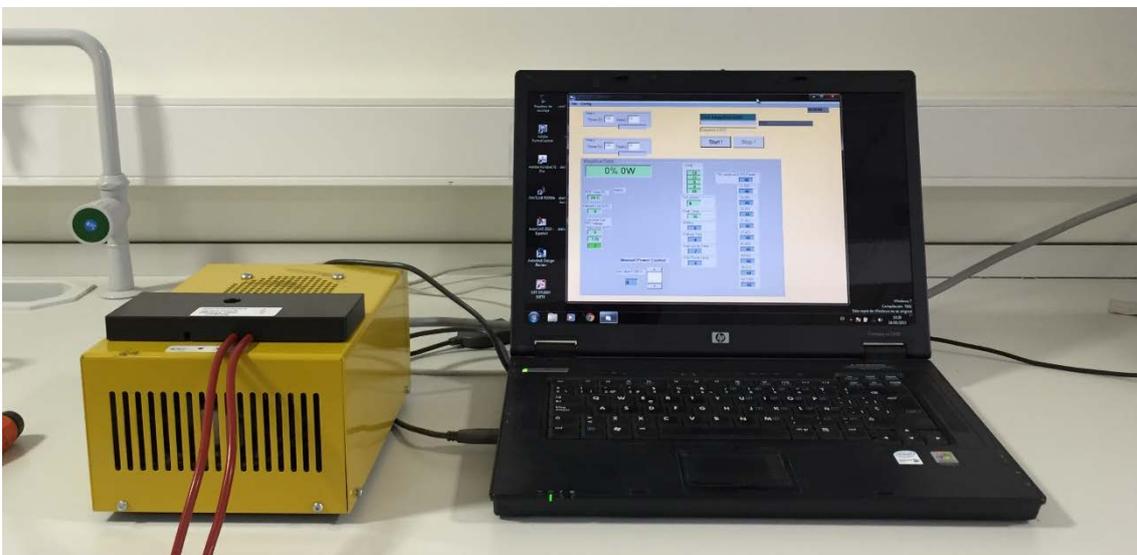


Figura 4. 3: Conexión PC – Fuente.

Datos eléctricos y medioambientales.

Datos eléctricos de entrada:

- Voltaje: 230 V AC.
- Corriente: 6.5 A.
- Frecuencia: 50/60 Hz.
- Conexión: Cable 3 x 1.5 mm², longitud 1 m. Conector CEE – 7/XVII.

Datos eléctricos de salida:

- Potencia de salida: 100 – 1320 W.
- Tensión nominal de ánodo: 4.3 KV (dependiente del magnetrón).
- Corriente nominal de filamento: 5 – 10 A.
- Magnetrón recomendado: Panasonic 2M244.
- Conector: Dimensiones 6.3 x 0.8 mm.

Datos medioambientales:

- Caja: Caja metálica con ventilación forzada.
- Grado de protección: 1.
- Grado de contaminación: 2.
- Rango de temperaturas: 5 – 40 °C, 80% RH.

Medidas de la fuente.

Las dimensiones y el peso de la fuente son los siguientes:

- Peso: 2.5 Kg.
- Dimensiones: 165 x 230 x 130 mm.

En la siguiente figura se ven las medidas más detalladas:

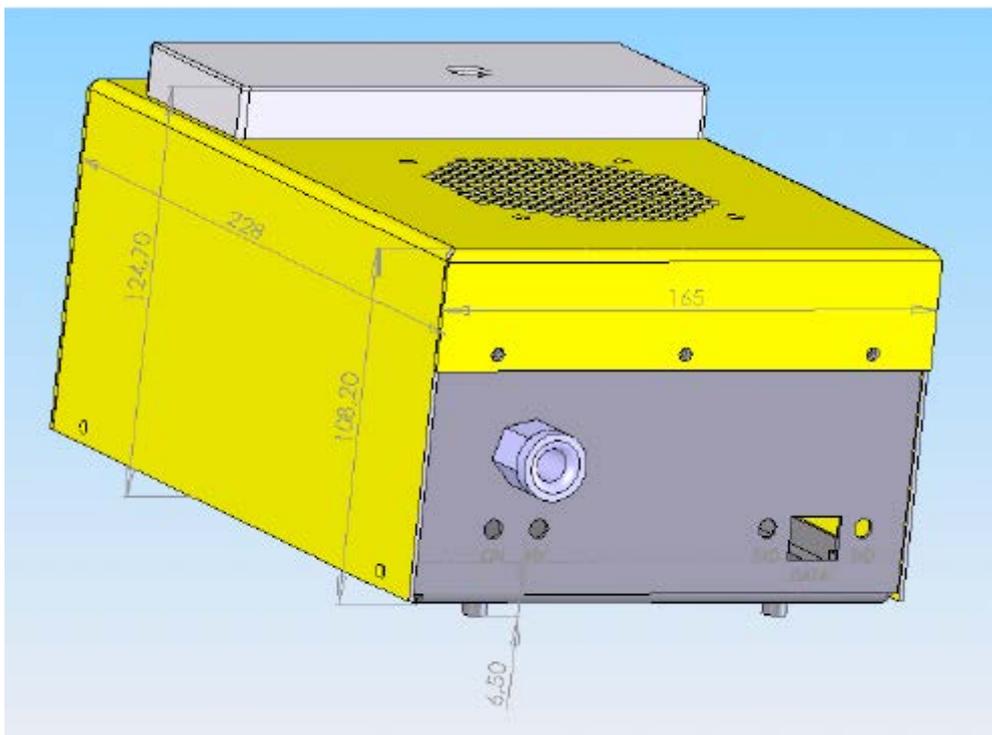


Figura 4. 4: Dimensiones.

Indicadores

En la figura 4.5 podemos apreciar los diferentes indicadores que presenta la fuente cuyo funcionamiento es el siguiente:

- ON: Led verde que indica 230 V AC y potencia interna.
- HV: Led rojo que indica alta tensión de salida activa y/o filamento activo.
- RxD: Led amarillo que indica comunicación con un sistema de control externo.
- TxD: Led amarillo que indica comunicación de la fuente.

Cuando se conecta la fuente, el ventilador y HV se activan unos pocos segundos para una prueba de verificación. Durante dicha prueba no se produce alto voltaje.



Figura 4. 5: Indicadores de la fuente MAGDRIVE1000.

4.1.2 Magnetron Panasonic modelo 2M244-M23.

El magnetron usado es el recomendado por el fabricante de la fuente MAGDRIVE1000, debido a que cumple todas las características y proporciona el mejor rendimiento a la fuente.

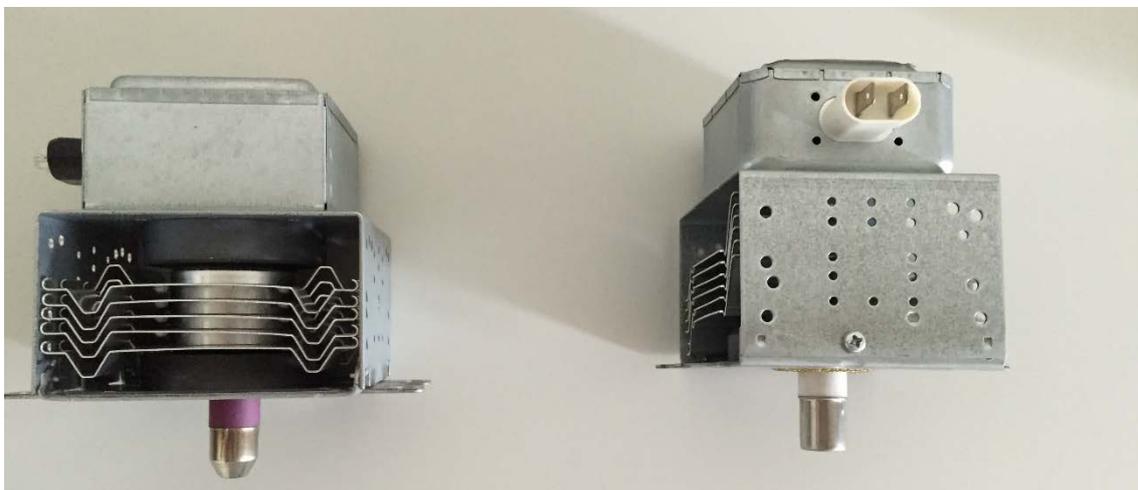


Figura 4. 6: Magnetron 2M244-M23.

Especificaciones

Características	Especificaciones
Frecuencia de operación	2470 MHz
CW Potencia de salida máxima	1060 W
Voltaje ánodo	4.55 KV
Corriente ánodo máxima	370 mA
Voltaje filamento	3.5 V
Corriente filamento	12 A
Transmisión RF	En una guía onda rectangular o en una cavidad directamente
Eficiencia	Aprox. 72%
Refrigeración	Aire forzado (> 1000 l/min)
Peso neto	Aprox. 0.9 Kg

Tabla 4. 1: Especificaciones del magnetrón.

En la figura 4.7 podemos observar las dimensiones que presenta el magnetrón:

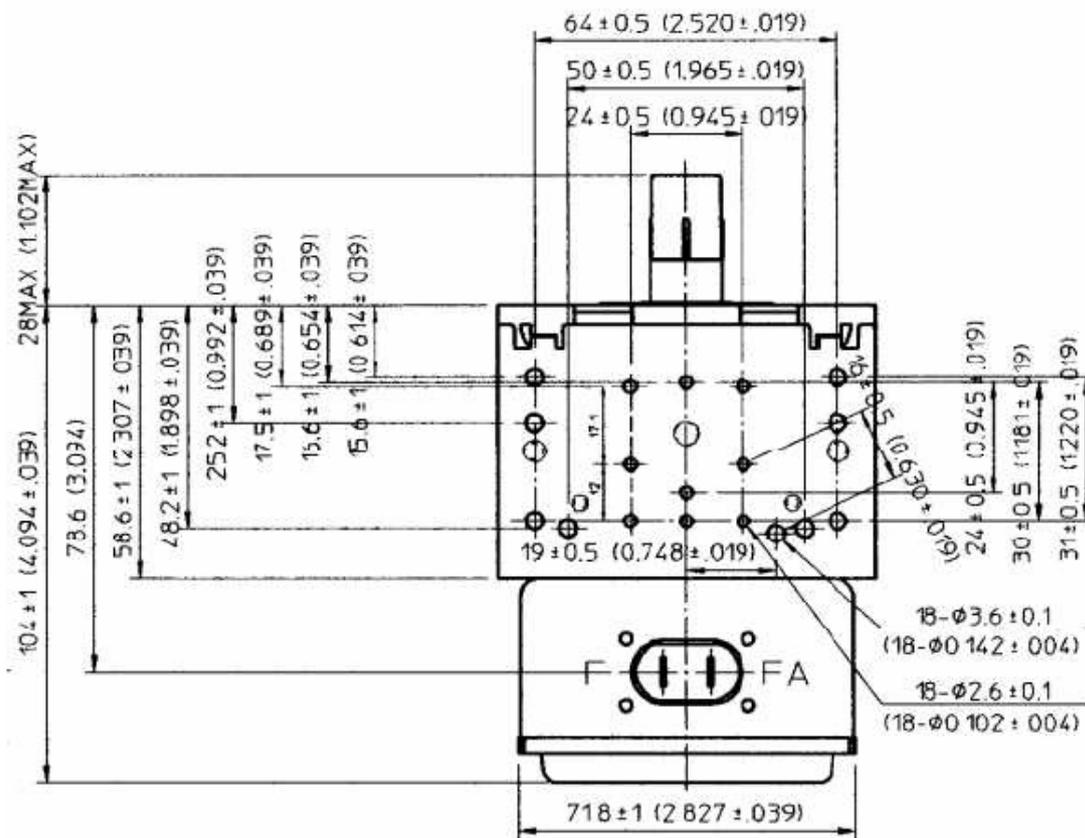


Figura 4. 7: Dimensiones.

4.1.3 Termopares:

En nuestro montaje hemos utilizado dos modelos de termopar para las siguientes funciones:

- Fluke 1560: Utilizado para controlar la temperatura de los magnetrones.
- Center 305: Utilizado para medir la temperatura de la ropa.

Fluke 1560.

En la figura 4.8 podemos apreciar una captura de la interfaz gráfica del termopar. Utilizamos el termopar con tantas entradas habilitadas como necesitemos. En nuestro caso hemos utilizado una única entrada, ya que solo medimos la temperatura para los casos en los que hemos utilizado un único magnetrón.

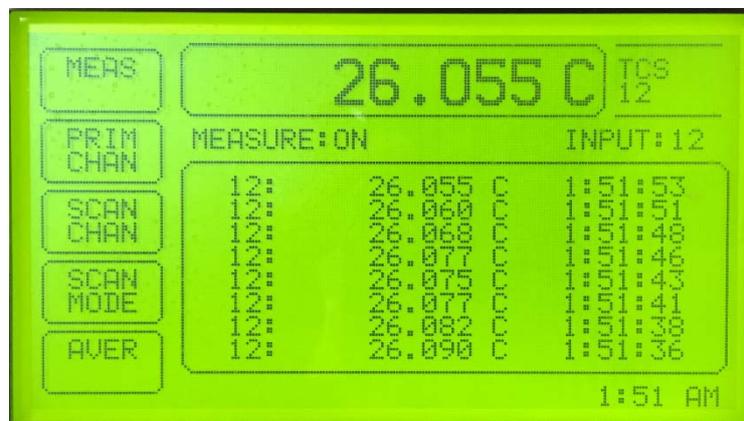


Figura 4. 8: Termopar Fluke 1560.

Center 305.

Su funcionamiento es muy sencillo. Basta con encenderlo y colocar el termopar en el lugar donde queremos medir la temperatura. En la figura 4.9 podemos observar una imagen del modelo utilizado.



Figura 4. 9: Termopar Center 305.

La precisión que presenta cada termopar se puede apreciar en la tabla 4.2:

Modelo	Precisión
Fluke 1560	$\pm 0.035 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Center 305	$\pm 0.2 \%$ de la lectura

Tabla 4. 2: Precisiones termopares.

4.2 Proceso.

Para las distintas pruebas realizadas en el proyecto, hemos seguido el mismo proceso, el cual vamos a describir a continuación en una serie de pasos:

1. Antes de comenzar el proceso, es necesario pesar la ropa seca para obtener la cantidad de ropa empleada, que para nuestras pruebas han sido muestras de ropa de 1 Kg y 2 Kg. En la figura 4.10 podemos observar una imagen de la ropa en la báscula antes de mojarla. Destacar que para pesar la ropa, es necesario tarar antes la bandeja en la que se encuentra la ropa.



Figura 4. 10: Pesado inicial de la muestra.

2. Mojamos la ropa y seguidamente la volvemos a pesar para obtener la cantidad de agua que ha absorbido la ropa. También medimos la temperatura de la ropa para tener la temperatura inicial con la que la ropa inicia el proceso de secado. Podemos apreciar como en la figura 4.11 estamos midiendo la temperatura de la ropa inicial.



Figura 4. 11: Medida de la temperatura inicial.

3. Tras introducir la ropa en la secadora y ponerla en funcionamiento, realizamos procesos de secado de 5 minutos de duración en los que realizamos las siguientes tareas: cada minuto vamos controlando la potencia del magnetrón (o magnetrones), la temperatura del magnetrón y la temperatura del aire extraído mediante el sistema de extracción.
4. Trascurridos los 5 minutos, paramos la secadora y sacamos la ropa de ella para volver a pesarla, viendo así cuanto ha disminuido la masa de agua, y medimos la temperatura para obtener cuánto se está calentando.
5. Una vez realizado el paso 4, entramos en un bucle en el que vamos repitiendo los pasos 3 y 4 hasta llegar al final del proceso de secado. En nuestro caso, para las distintas pruebas el proceso de secado ha tenido una duración de 1 hora.

5. Resultados.

En este capítulo vamos a analizar los resultados obtenidos para las diferentes pruebas. Las gráficas muestran evoluciones de las diferentes magnitudes medidas: temperaturas, potencia, etc. Podremos observar también gráficas correspondientes a los incrementos y decrementos de las magnitudes. Para finalizar, estudiaremos las potencias y eficiencias obtenidas en cada proceso.

5.1 Prueba 1: Magnetrones 1 y 2.

Para esta prueba las condiciones y configuración utilizadas han sido las siguientes:

- Muestra de ropa: 1 Kg.
- Uso conjunto de los magnetrones 1 y 2.
- Peso muestra húmeda: 2.714 Kg.
- Duración proceso: 50 minutos.
- Potencia máxima radiada por el magnetrón 1: 1,360 KW.
- Potencia máxima radiada por el magnetrón 2: 1,324 KW.

Vamos a analizar los diferentes resultados obtenidos:

La figura 5.1 representa la evolución de la temperatura de la muestra de ropa. Se puede apreciar como al inicio del proceso de secado, debido al calentamiento la temperatura sube considerablemente respecto a la temperatura inicial. También se pueden apreciar dos picos de temperatura en la figura, esto es debido a que no se mide siempre en los mismos puntos, si no que se van cogiendo aleatoriamente diferentes puntos de la muestra.

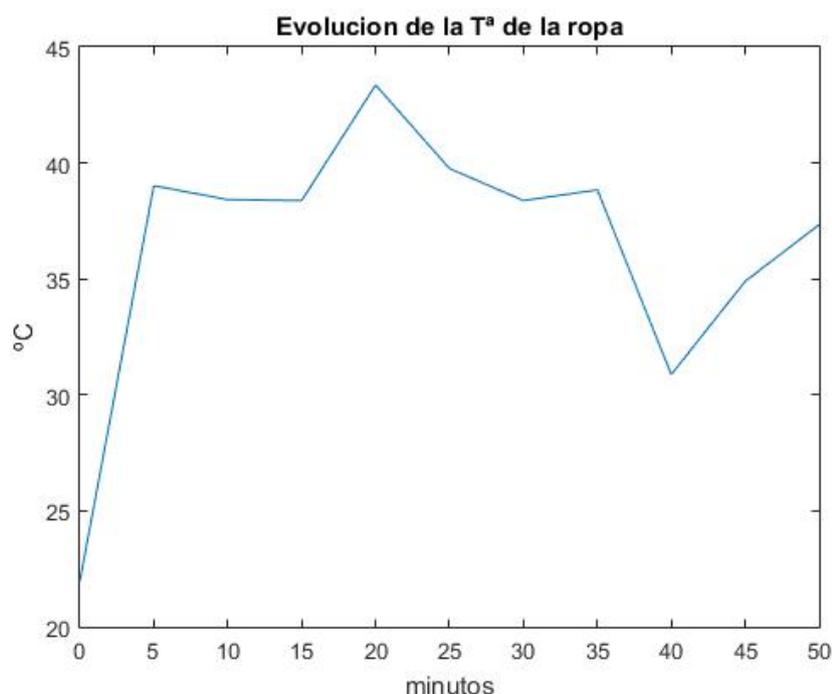


Figura 5. 1: Prueba 1 - Evaluación de la temperatura de la ropa.

En la siguiente imagen, figura 5.2, vemos la evolución del peso de la muestra. Podemos observar como el peso de la muestra va disminuyendo casi de manera lineal. Se puede apreciar cómo no llegamos a alcanzar el peso de la muestra totalmente seca, esto es debido a que para evitar reflexiones en el interior de la cavidad se decidió parar el proceso antes de llegar al peso de la muestra seca, además de para evitar la aparición de arcos en los magnetrones que ocasionen su rotura.

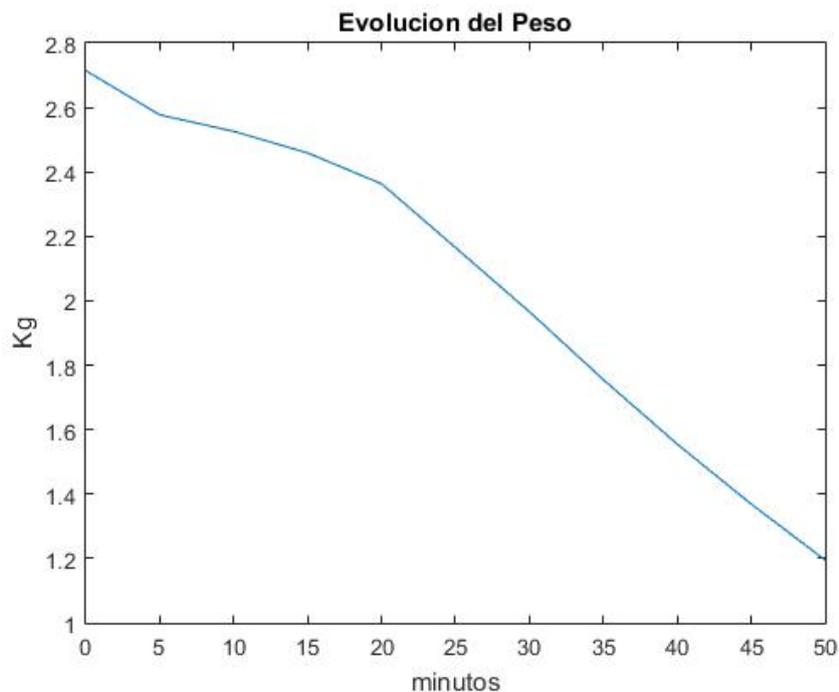


Figura 5. 2: Prueba 1 – Evolución del peso de la muestra.

Ahora vamos a pasar a analizar el contenido de humedad en base seca (X), figura 5.3, se puede apreciar como tiene la misma forma que la gráfica anterior, figura 5.2, pero cambia el eje de abscisas, esto es a consecuencia de que estamos viendo la evolución de X, que en este caso viene de restar a la masa total de la muestra, la masa de la muestra seca.

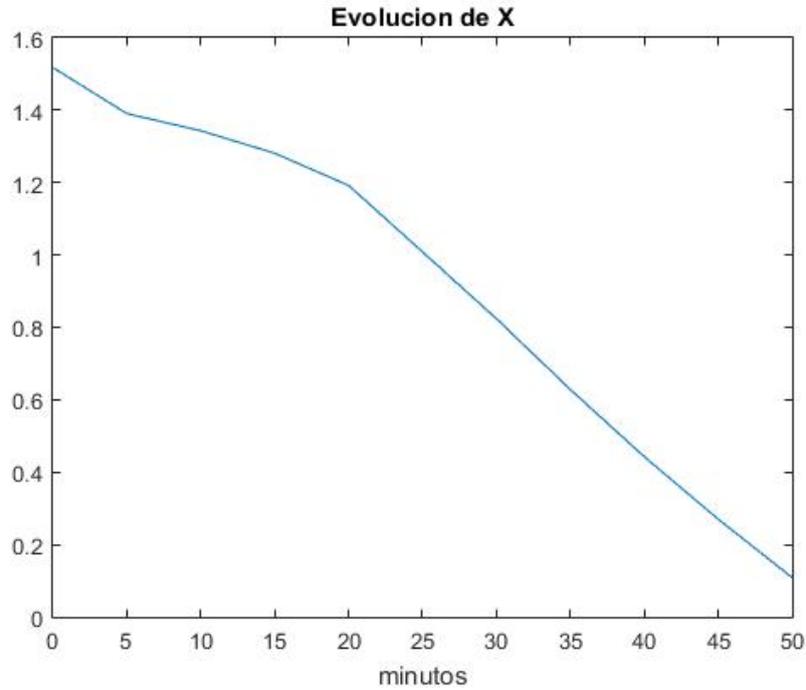


Figura 5. 3: Prueba 1 - Evolución de X.

A continuación vamos a analizar la potencia consumida por la secadora. En la figura 5.4 se puede observar dicha potencia la cual, aparece reflejada en la ecuación 2.47. Se puede observar que la potencia no es un valor fijo sino que se encuentra en todo momento entre 3.1 y 3.11 KW. El que la potencia no sea un valor constante es debido a que la potencia entregada por las fuentes MAGDRIVE 1000 a los magnetrones no es constante.

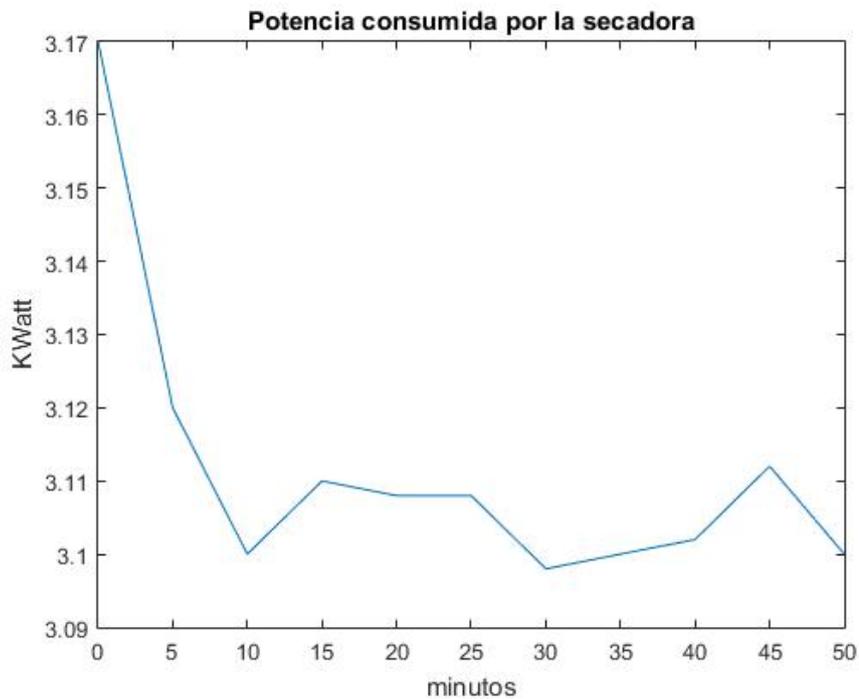


Figura 5. 4: Prueba 1 - Potencia consumida por la secadora.

En la figura 5.5 se representa la temperatura del aire que expulsa el sistema de extracción. Como se puede apreciar, conforme va transcurriendo el proceso de secado la temperatura va aumentando como consecuencia del incremento de temperatura en el interior de la cavidad durante nuestro proceso de secado.

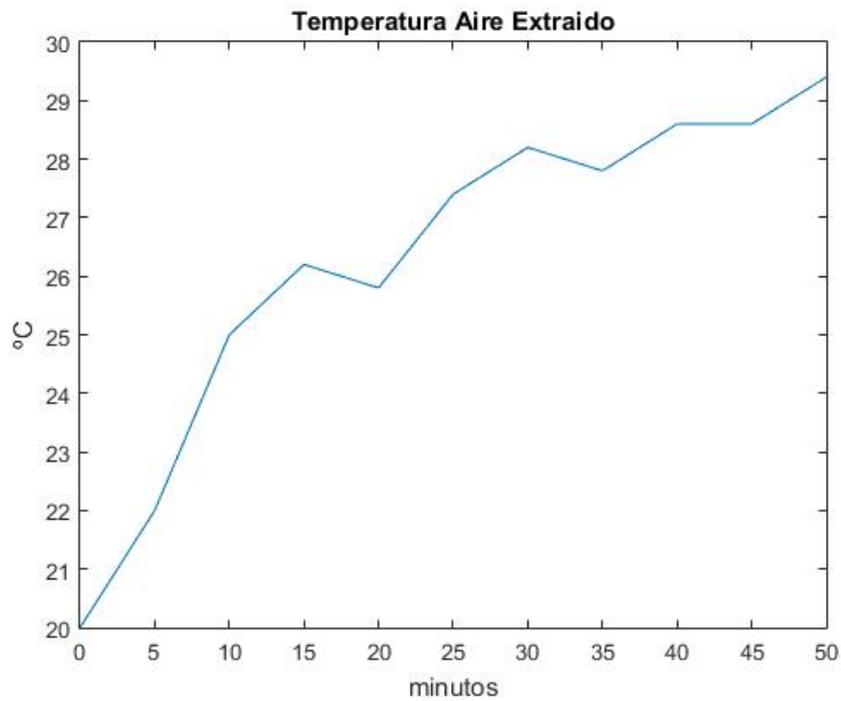


Figura 5. 5: Prueba 1 - Evolución temperatura aire extraído.

A continuación, vamos a analizar los incrementos en las diferentes medidas realizadas.

Comenzaremos con el incremento de temperatura en la muestra del proceso. En la figura 5.6 se puede apreciar la gráfica que representa dicho incremento. Los distintos picos que aparecen en la figura son debidos a que tomábamos temperatura en puntos de la muestra aleatorios. Además debido a que algunas muestras se secaban antes que otras podemos justificar de esta manera la presencia de valores negativos.

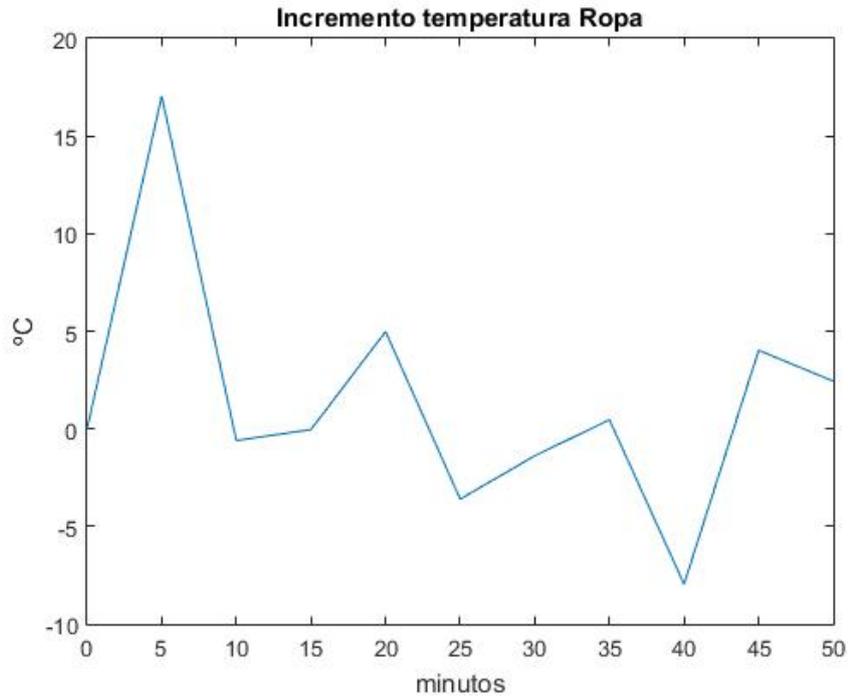


Figura 5. 6: Prueba 1 – Incremento temperatura ropa.

En la figura 5.7 vamos a analizar el incremento en la temperatura del aire expulsado por el sistema de refrigeración. Como se puede apreciar al comienzo del proceso se produce un incremento elevado y a partir de ahí va incrementando lentamente conforme avanzamos en el secado. Los decrementos que se ven en la gráfica, se deben a que, como cada 5 minutos de proceso se paraban otros 5 para realizar el pesado y la medida de la ropa, el vapor de agua se ha evaporado por completo y por tanto, la temperatura en el interior de la cavidad disminuye.

Decir también que al abrir la puerta de la secadora, salía vapor de agua del interior, por lo que de esa manera ayudábamos a que se extraiga el vapor de agua, y por tanto aparezcan decrementos con respecto al anterior punto del proceso.

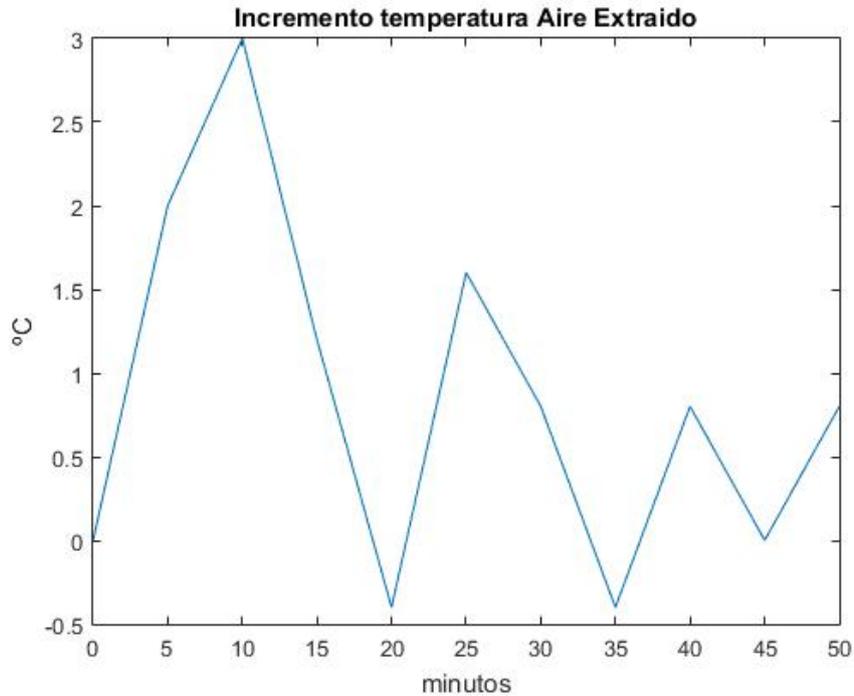


Figura 5. 7: Prueba 1 - Incremento temperatura aire extraído.

En la figura 5.8 pasamos a analizar el decremento de la masa de agua en la muestra. Podemos observar como para los diferentes puntos siempre tenemos un decremento positivo, es decir, durante todo el proceso se va secando el contenido de humedad.

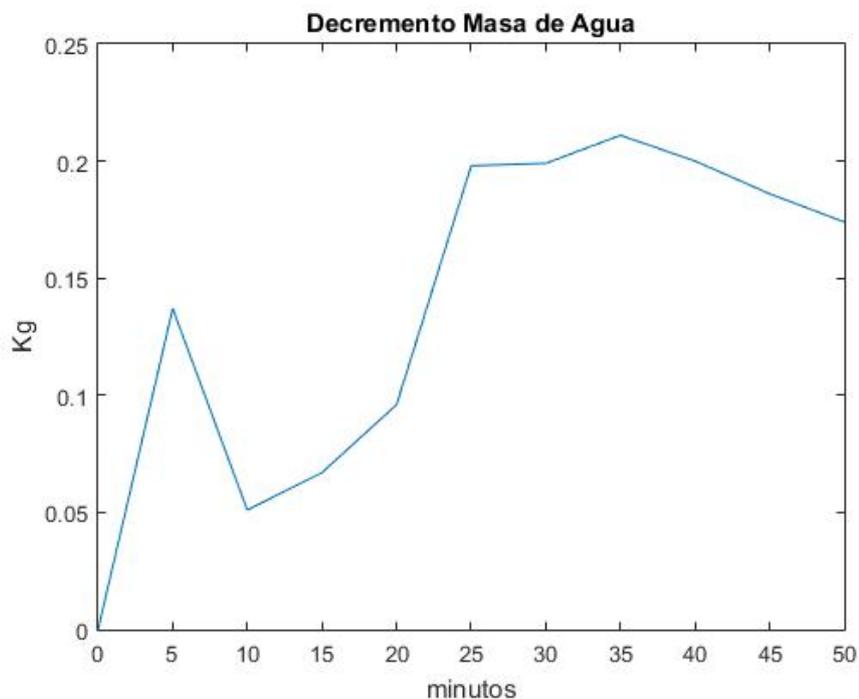


Figura 5. 8: Prueba 1 - Decremento masa de agua.

Vamos a analizar ahora la potencia absorbida en el proceso, dicha potencia será la absorbida por las diferentes prendas de ropa. Dicha potencia se calcula mediante la ecuación 2.46. En la figura 5.9 aparece la evolución de la potencia absorbida. Se puede apreciar como la potencia

va incrementando conforme va avanzado el proceso de secado, hasta llegar a un punto en el que a partir de él, la potencia se mantiene “constante”. Dicho punto coincide con el momento en el que en la figura 5.3, X decrece de manera lineal.

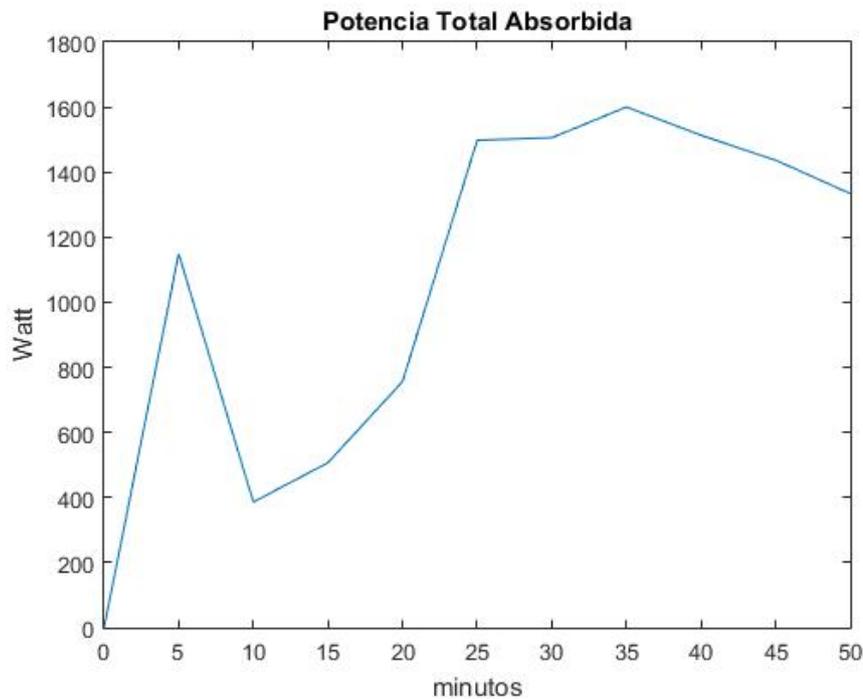


Figura 5. 9: Prueba 1 - Potencia total absorbida.

Como parte final de la prueba, se calculó la eficiencia tanto de la cavidad como eléctrica, figuras 5.10 y 5.11, respectivamente. Se puede apreciar cómo no superamos una eficiencia de un 0.6, eficiencia magnética, y un 0.5 en la eficiencia eléctrica, ecuaciones 2.44 y 2.45. Dichos valores se podrían aumentar para alcanzar una eficiencia importante, como podremos observar en el capítulo de conclusiones y líneas futuras.

También se puede apreciar como ambas eficiencias presentan la misma forma que la potencia total gastada, coincidiendo los puntos de menor potencia con los de menor eficiencia. También hemos obtenido los valores medios de las eficiencias. En el caso de la eficiencia en la cavidad, tenemos un valor medio de 0.4078 y en la eléctrica 0.3421. En ambos casos son eficiencias muy bajas, por tanto si las aumentáramos podríamos reducir la duración del proceso de secado.

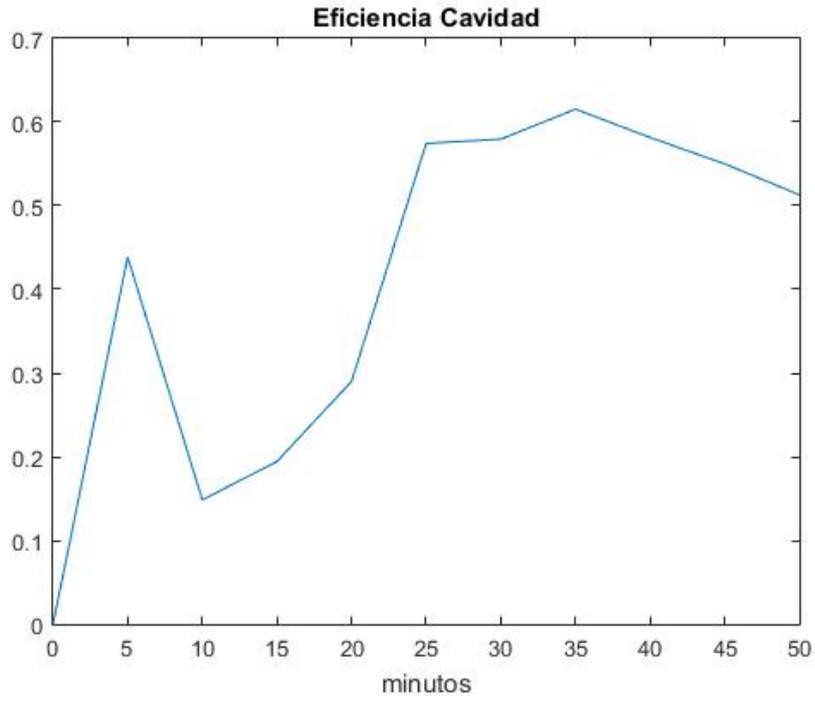


Figura 5. 10: Prueba 1 - Eficiencia cavidad.

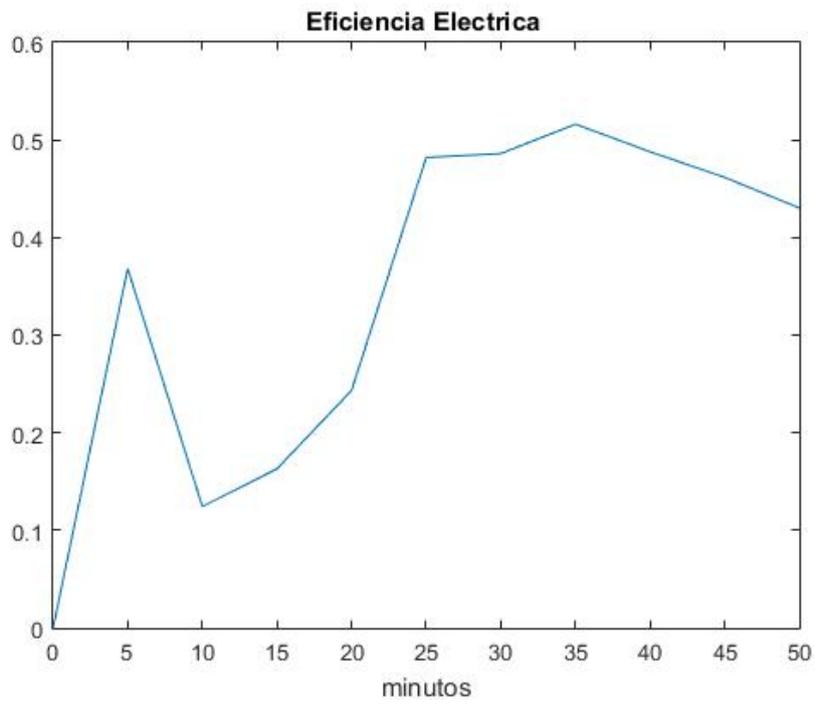


Figura 5. 11: Prueba 1 - Eficiencia eléctrica.

5.2 Prueba 2: Magnetron 1.

En este caso las condiciones y configuración utilizadas han sido las siguientes:

- Muestra de ropa: 2 Kg.
- Magnetron 1.
- Peso muestra húmeda: 4.79 Kg.
- Duración proceso: 1 hora.
- Potencia máxima radiada por el magnetron 1: 1,322 KW.

Como en la prueba 1, ahora vamos a pasar a comentar y analizar los resultados obtenidos:

En la figura 5.12, vemos la evolución de la temperatura de la muestra, podemos apreciar como al comienzo del proceso, la temperatura aumenta considerablemente hasta situarse en el intervalo 30-34°C. Por tanto, como la muestra se calienta estaremos eliminando el contenido de humedad.

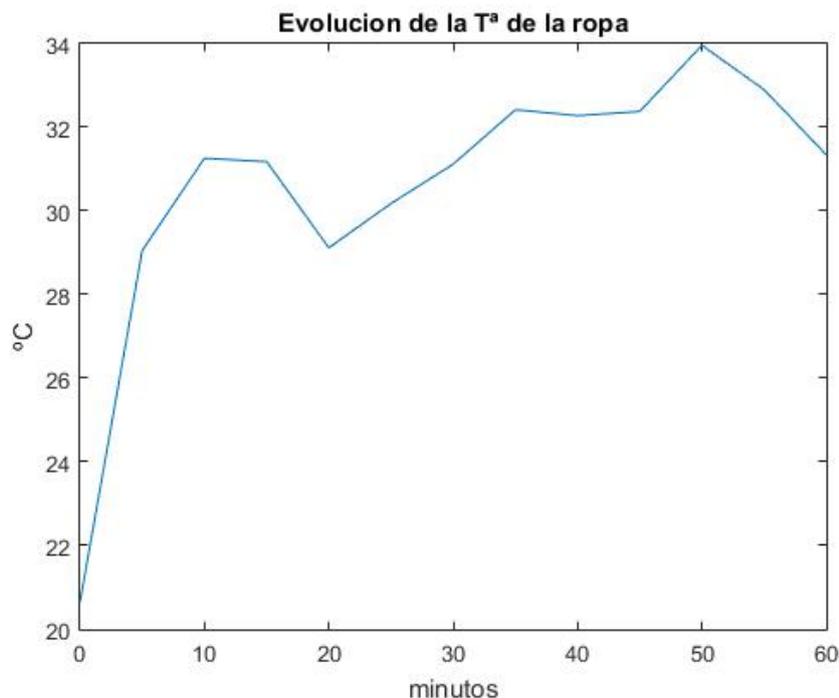


Figura 5. 12: Prueba 2 - Evaluación de la temperatura de la ropa.

En la siguiente figura (figura 5.13), vamos a analizar la evolución del peso en el proceso. Se puede observar como el peso de la muestra disminuye aproximadamente de forma lineal. Comentar que para esta prueba no hemos finalizado cuando la muestra ha estado totalmente seca, si no que cuando se ha alcanzado una hora de proceso se ha dado por terminado. Decir que se ha elegido una hora para poder calcular la eficiencia eléctrica y la eficiencia en la cavidad por hora.

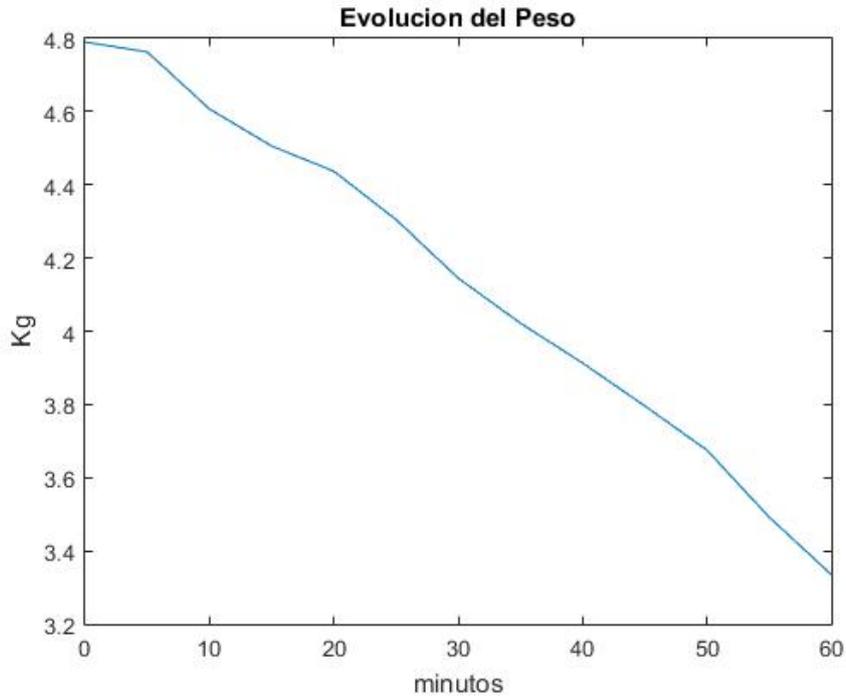


Figura 5. 13: Prueba 2 – Evolución del peso de la muestra.

A continuación tenemos la evolución de X, figura 5.14, como sucede en la prueba 1, presenta la misma forma que la figura 5.13, cambiando el eje y como hemos explicado en la primera prueba.

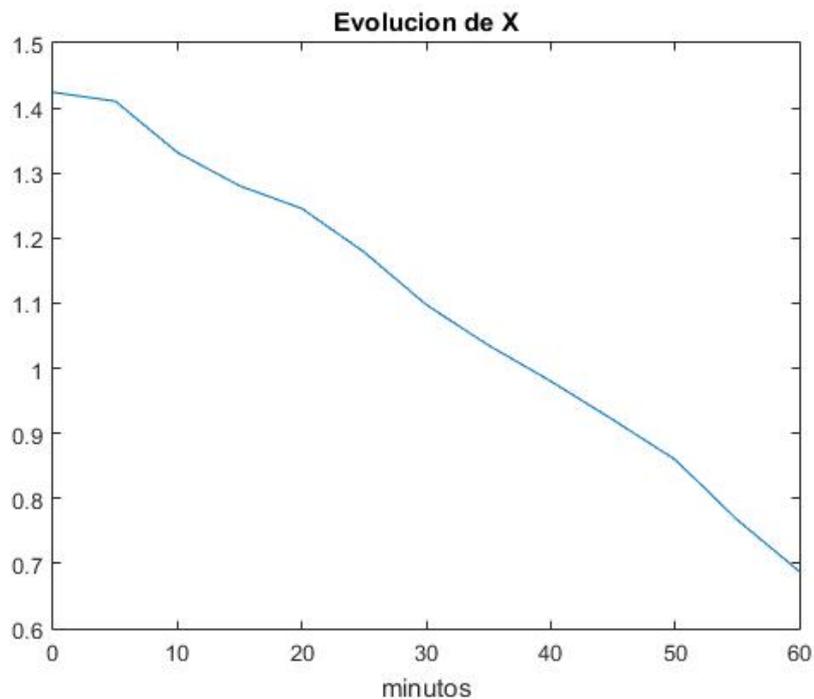


Figura 5. 14: Prueba 2 - Evolución de X.

Seguidamente, figura 5.15, tenemos la evolución de la potencia de la secadora a lo largo del proceso, obtenida usando la ecuación 5.1. Se puede observar cómo se reduce el consumo respecto a la primera prueba, esto es como consecuencia de que en esta prueba hemos usado

únicamente un magnetrón. Como vemos la potencia se encuentra en el intervalo 1.86-1.9 KW, como consecuencia de la potencia entregada por la fuente Magdrive1000, como hemos explicado en la prueba 1.

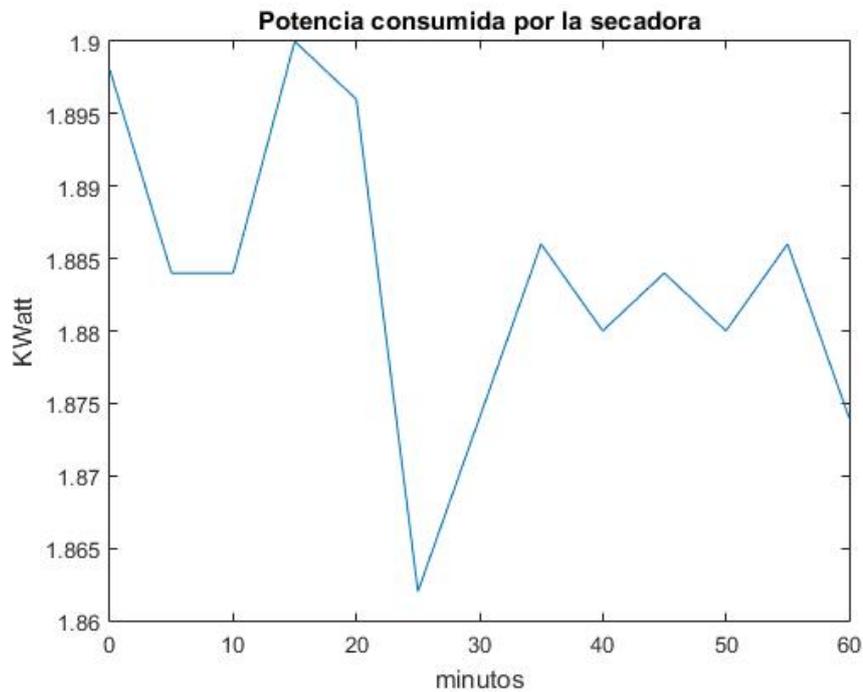


Figura 5. 15: Prueba 2 - Potencia consumida por la secadora.

En la figura 5.16 tenemos la evolución de la temperatura del aire extraído por el sistema de refrigeración. Como se puede apreciar, al igual que sucede con la prueba anterior, la temperatura del aire extraído va aumentando a consecuencia del calentamiento de la muestra.

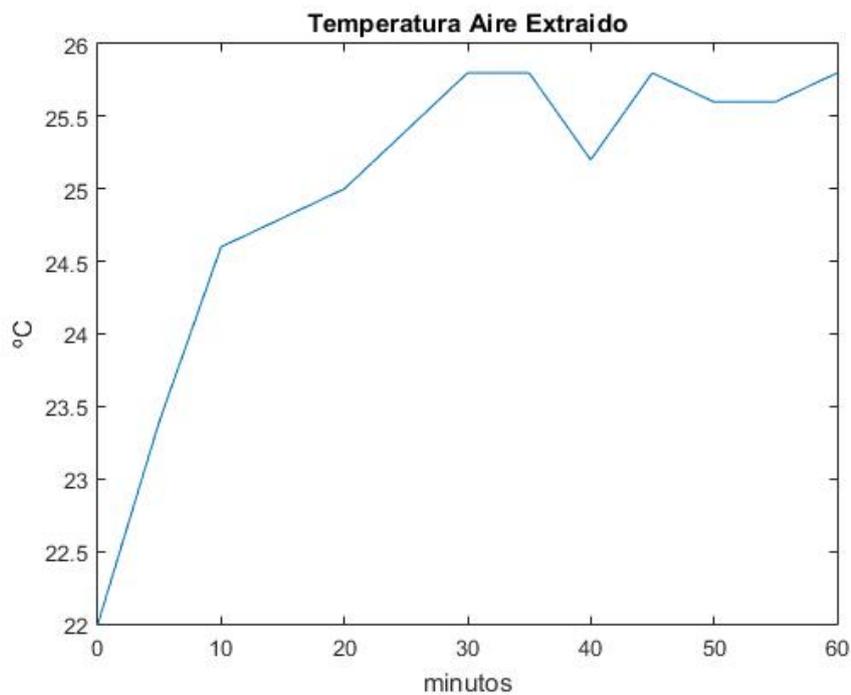


Figura 5. 16: Prueba 2 - Evolución temperatura aire extraído.

En esta prueba se ha añadido una nueva medida de temperatura, la temperatura de funcionamiento del magnetrón. Con ella lo que se pretende es controlar que el magnetrón no supera los límites para un funcionamiento óptimo, evitando así su rotura o incorrecto funcionamiento.

En la figura 5.17 se puede apreciar la evolución de esta temperatura. Podemos observar cómo se encuentra en torno a los 130°C en funcionamiento. En el siguiente capítulo, podremos analizar cómo se podría disminuir la temperatura, para así aumentar la vida útil del magnetrón.

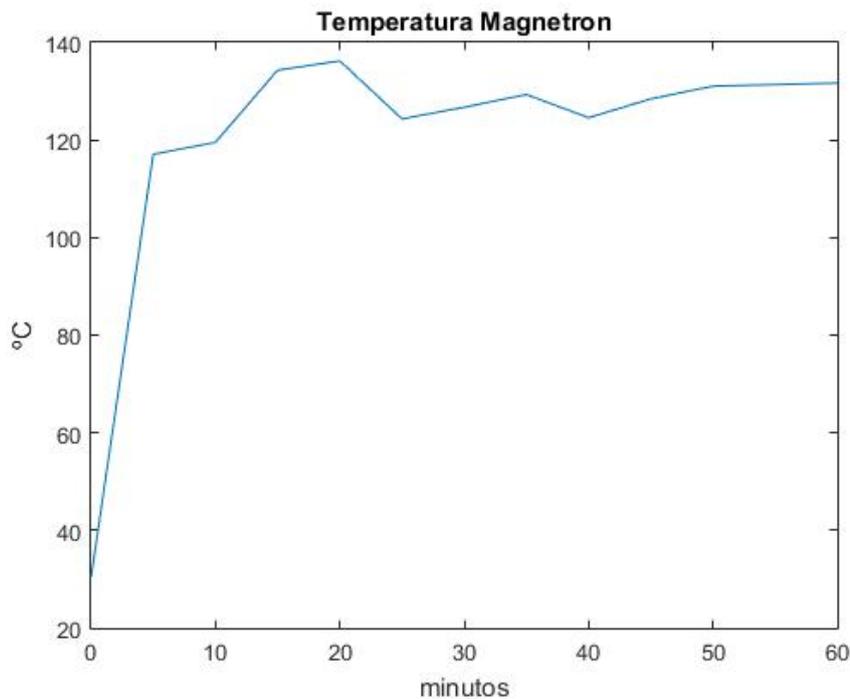


Figura 5. 17: Prueba 2 - Temperatura magnetrón.

Seguidamente vamos a analizar los incrementos y/o decrementos de las diferentes medidas de un punto a otro del proceso.

En la figura 5.18 podemos observar el incremento de la temperatura en el magnetrón. Se puede distinguir claramente cómo se calienta al comienzo del proceso para a partir de ahí, mantenerse en torno a 0, es decir, se mantiene casi constante durante el proceso.

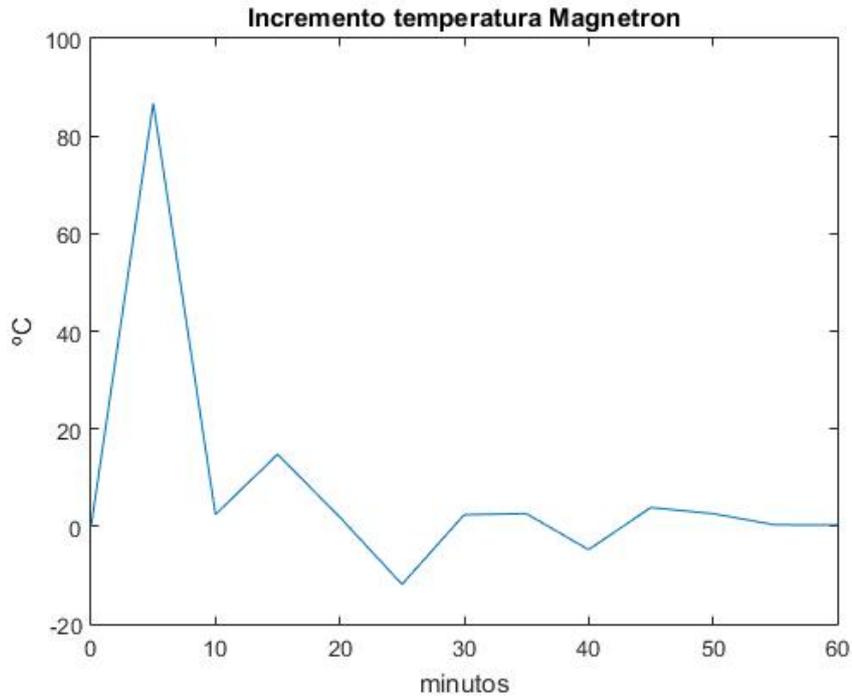


Figura 5. 18: Prueba 2 - Incremento temperatura magnetron.

Seguidamente tenemos el incremento de la temperatura extraída del sistema, figura 5.19. Se puede apreciar como la temperatura aumenta, debido al proceso de calentamiento, pero al igual que en la prueba 1, tenemos leves decrementos a consecuencia de que se extrae todo el vapor de agua del interior de la cavidad.

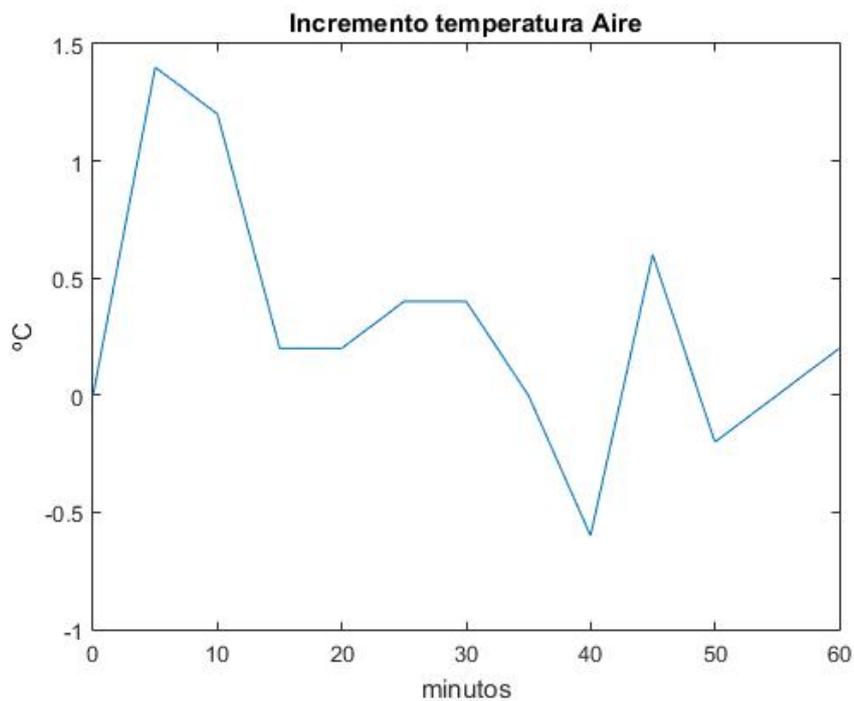


Figura 5. 19: Prueba 2 - Incremento temperatura aire.

Seguidamente pasamos a estudiar el decremento de la masa de agua de un punto a otro del proceso, figura 5.21, se puede observar como siempre tenemos decremento, en algunos puntos del proceso más que en otros, pero siempre disminuye la masa de agua, es decir, estamos secando, que es lo que buscamos en nuestro proyecto.

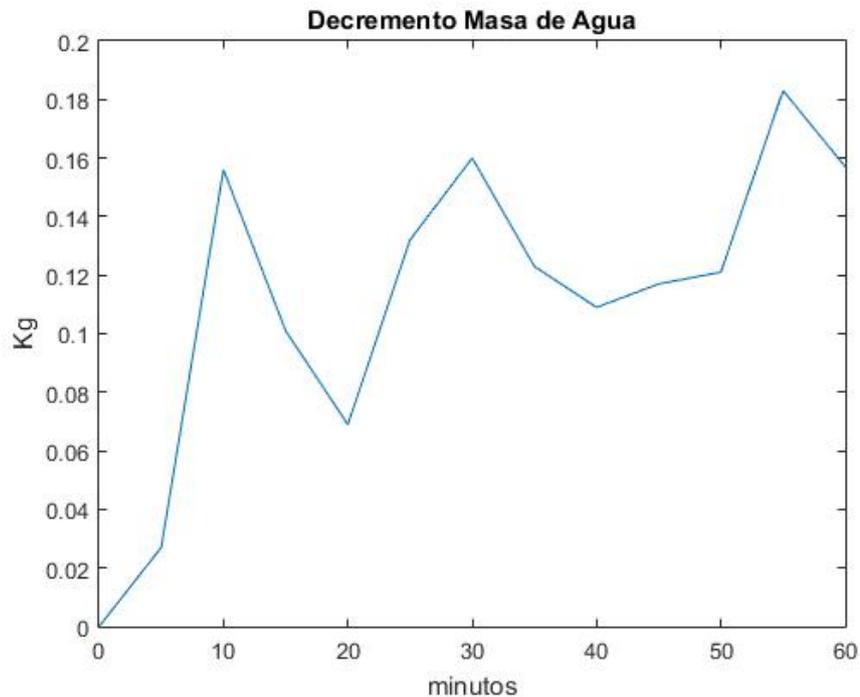


Figura 5. 20: Prueba 2 - Decremento masa agua.

En la figura 5.21 tenemos la evolución de la potencia absorbida en el proceso, la cual ha sido explicada en la ecuación 2.46. Se puede observar como presenta la misma forma que la figura 5.20, decremento de la masa de agua, coincidiendo los puntos de menor potencia con los puntos en que menos se produce un decremento de la masa de agua.

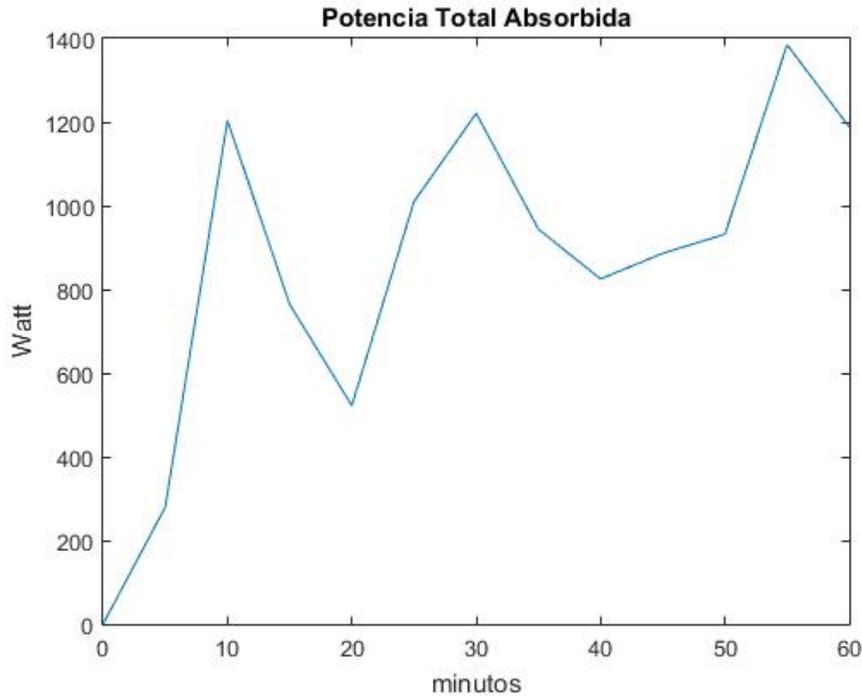


Figura 5. 21: Prueba 2 - Potencia total absorbida.

Finalmente, para terminar de analizar la prueba 2, obtenemos las eficiencias, tanto en el interior de la cavidad como la eléctrica, dadas por las ecuaciones 2.44 y 2.45, respectivamente. En la figura 5.22 tenemos la eficiencia de la cavidad, se puede apreciar como tiene la misma forma que la potencia total gastada, figura 5.21, coincidiendo los puntos de menos potencia con los puntos de menor eficiencia. Si sacamos la media de todos los puntos, tenemos una eficiencia de 0.6587, la cual nos interesaría que fuera más alta para sacar un mayor rendimiento a la cavidad.

En la figura 5.23, podemos apreciar la eficiencia eléctrica, al igual que sucede con la eficiencia en la cavidad, figura 5.22, presenta la misma forma que la potencia total gastada, figura 5.21. Como podemos apreciar, los puntos de menor potencia gastada coinciden con los de menor eficiencia. Al igual que con la eficiencia de la cavidad, hemos obtenido la media, dándonos un valor de 0.4563, lo que significa un valor bajo, ya que ni siquiera llegamos a alcanzar el 50%.

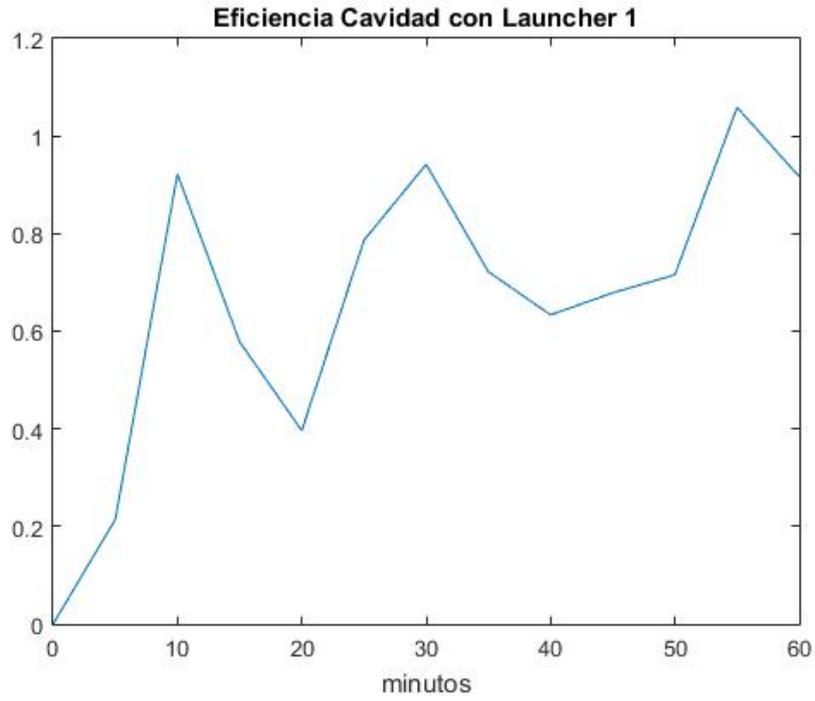


Figura 5. 22: Prueba 2 - Eficiencia cavidad.

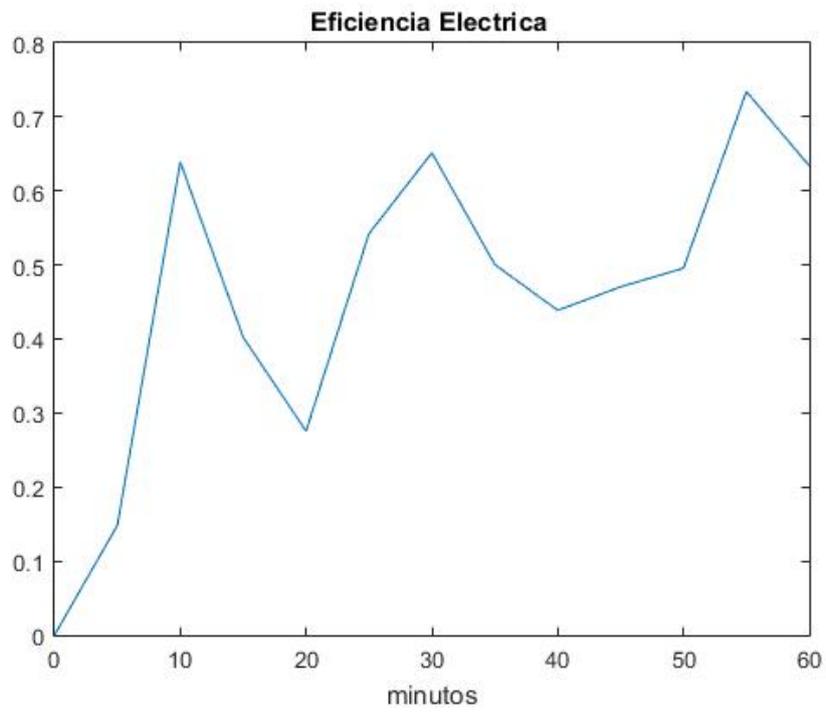


Figura 5. 23: Prueba 2 - Eficiencia eléctrica.

5.3 Prueba 3: Magnetron 2.

En este caso las condiciones y configuración utilizadas han sido las siguientes:

- Muestra de ropa: 2 Kg.
- Magnetron 2.
- Peso muestra húmeda: 4.84 Kg.
- Duración proceso: 1 hora.
- Potencia máxima radiada por el magnetron 2: 1,320 KW.

Pasamos ahora a comentar los resultados:

En la figura 5.23 tenemos la evolución de la temperatura de la muestra. Al igual que para las dos pruebas anteriores, va aumentando conforme el proceso avanza. Como hemos explicado para las dos pruebas anteriores, la presencia de picos tiene que ver con la elección aleatoria de los puntos de toma de temperatura.

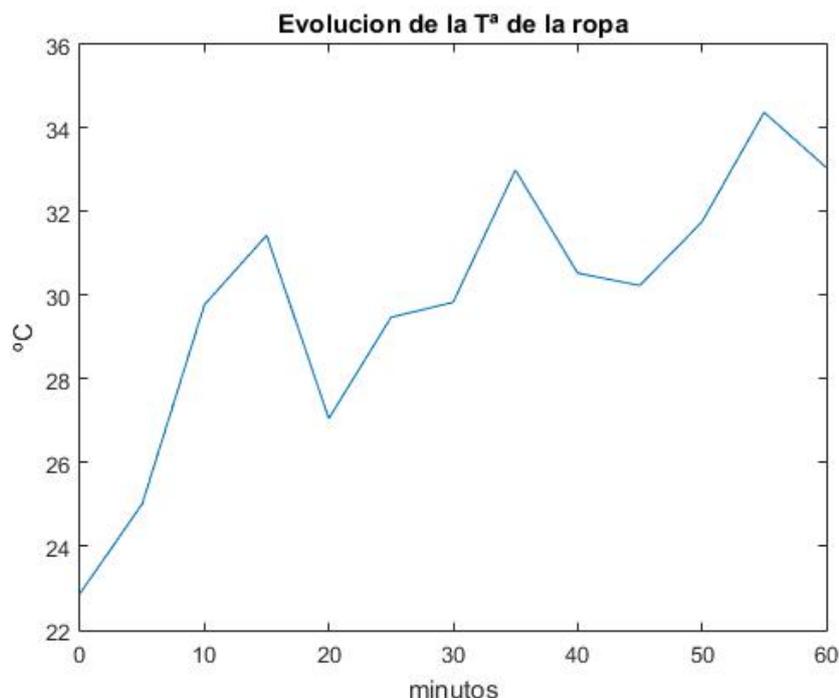


Figura 5. 24: Prueba 3 - Evaluación de la temperatura de la ropa.

Al igual que en las anteriores pruebas, ahora pasamos a estudiar la evolución del peso y del contenido de humedad en base seca, figuras 5.25 y 5.26 respectivamente. Como se puede observar va disminuyendo con carácter lineal. Como sucede en las anteriores pruebas, ambas figuras presentan la misma forma con la diferencia en el eje y, como se ha explicado para las pruebas anteriores.

También cabe comentar que, no llegamos al final del proceso de secado, si no que cuando llevamos una hora de proceso lo damos por finalizado porque ya podemos obtener las eficiencias en una hora de proceso.

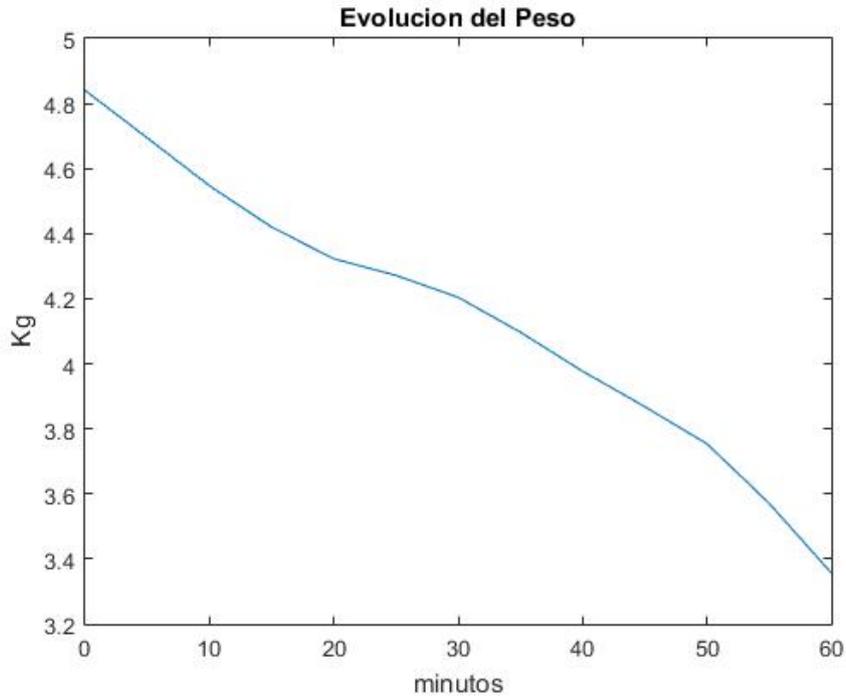


Figura 5. 25: Prueba 3 - Evolución del peso de la muestra.

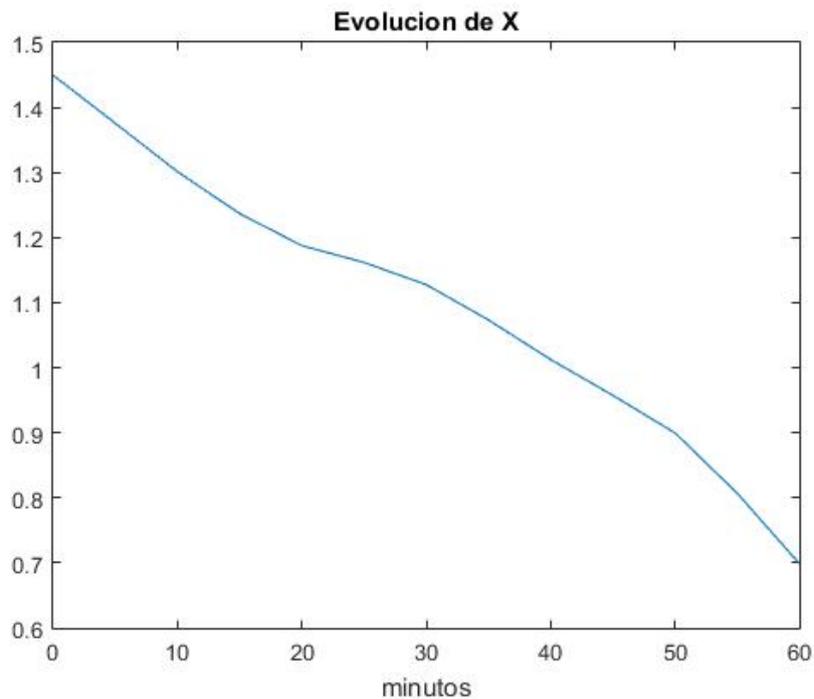


Figura 5. 26: Prueba 3 - Evolución de X.

Pasamos a representar la potencia consumida por la secadora en el proceso, figura 5.27, la cual se obtiene al igual que para los procesos anteriores mediante la ecuación 5.1. Podemos apreciar cómo se encuentra siempre en un intervalo, en este caso 1.865-1.9, al igual que sucede en las pruebas anteriores es debido a la entrega de potencia de la fuente MAGDRIVE100 que no es constante.

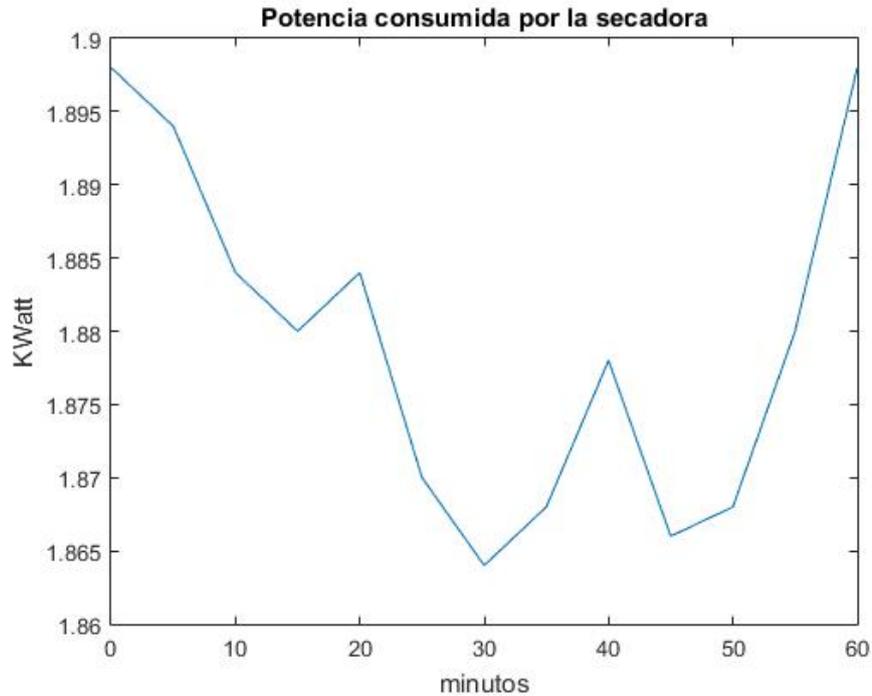


Figura 5. 27: Prueba 2 - Potencia consumida por la secadora.

Continuamos con la temperatura del aire que extrae el sistema de refrigeración, figura 5.28, se puede apreciar como aumenta con el avance en el proceso, por tanto la muestra que se encuentra en la cavidad se está calentando, los pequeños decrementos de temperatura, se deben, como en las anteriores pruebas, a la eliminación completa del vapor de agua que se encuentra en el interior de la cavidad mientras se realizan las medidas en la muestra entre intervalos del proceso.

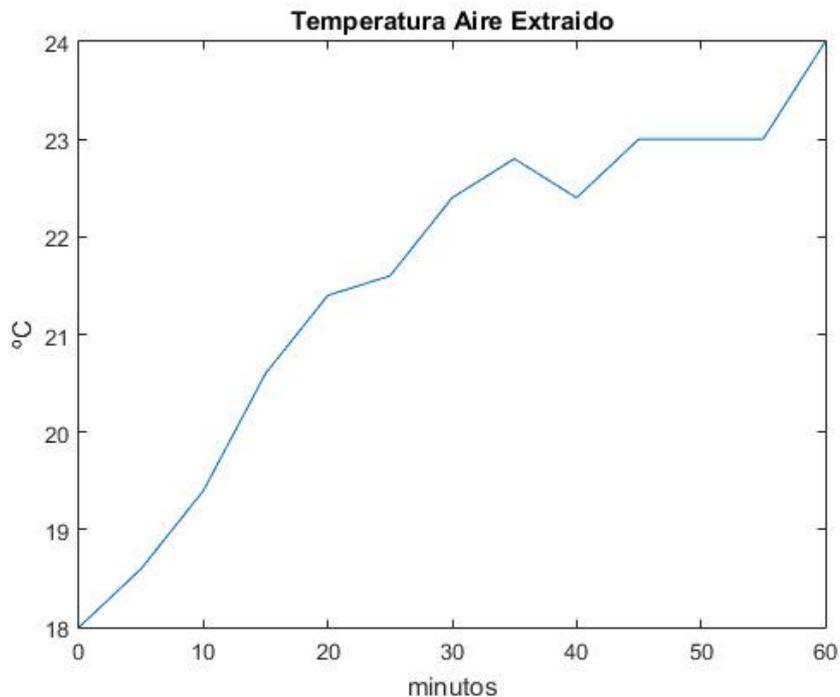


Figura 5. 28: Prueba 3 - Evolución temperatura aire extraído.

Seguidamente podemos apreciar otra gráfica sobre temperatura, en este caso la correspondiente al magnetrón, figura 5.29, podemos observar como la temperatura se mantiene “constante” a lo largo del proceso. También hay que destacar que es recomendable trabajar a menor temperatura, pero para ello, sería necesario modificar el sistema de refrigeración como podremos apreciar en las líneas futuras.

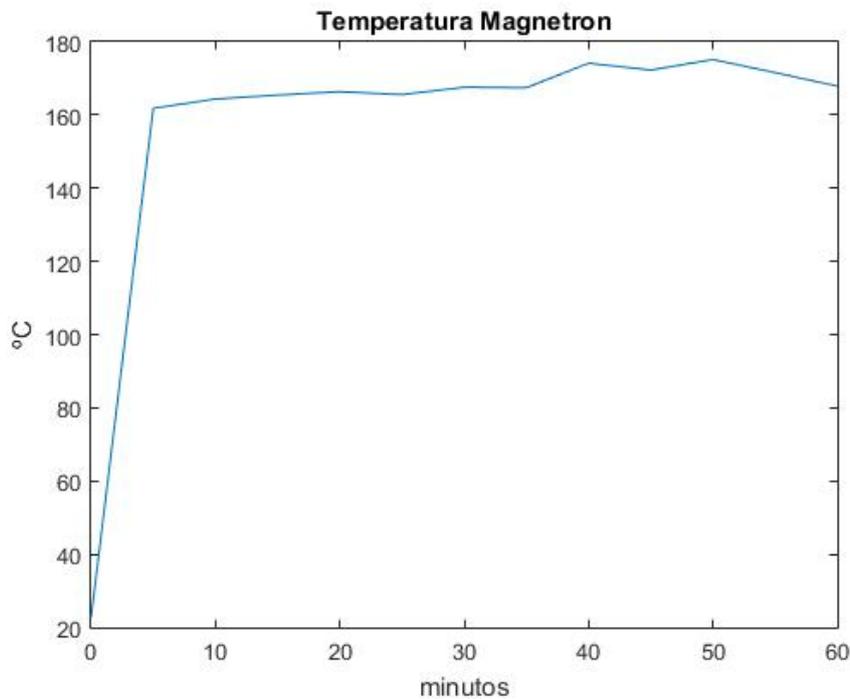


Figura 5. 29: Prueba 3 - Temperatura magnetrón.

Tras comentar la evolución de las diferentes magnitudes medidas, vamos a analizar cómo se han comportado dichas magnitudes respecto al punto anterior, como hemos realizado también en las pruebas anteriores.

Comenzamos con la temperatura del magnetrón, figura 5.30, se puede apreciar cómo tras entrar en funcionamiento el magnetrón, no hay apenas variaciones en la temperatura, es decir, se mantiene estable a lo largo del proceso.

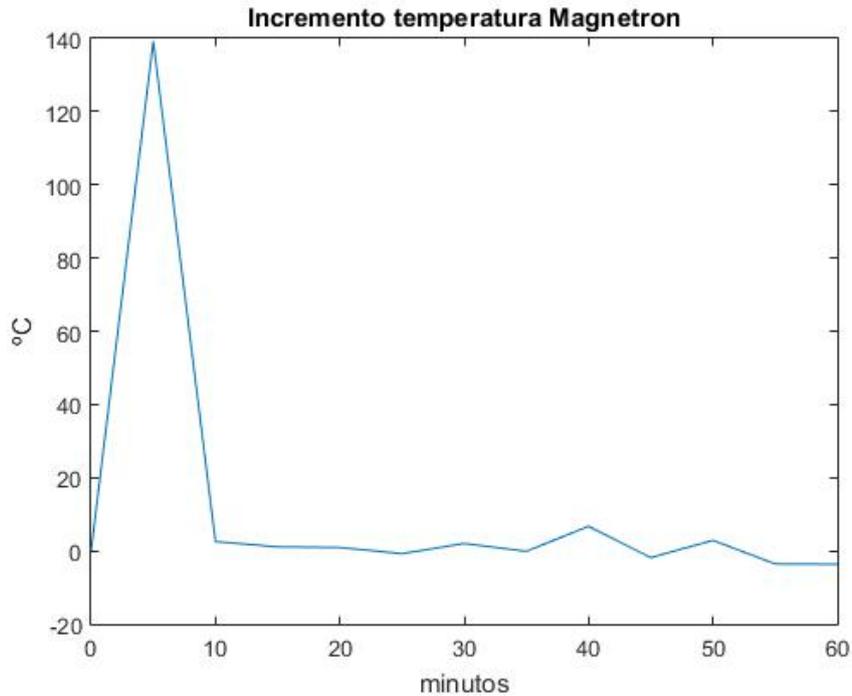


Figura 5. 30: Prueba 3 - Incremento temperatura magnetrón.

Pasamos ahora a analizar la temperatura de la muestra, figura 5.31, como podemos observar, tenemos un comportamiento desigual a lo largo del proceso, a consecuencia de que al elegir los puntos de medida de manera aleatoria y la muestra estar formada por diferentes materiales que se calientan de manera diferente, en un instante del proceso tenemos un incremento y en el siguiente podemos tener un decremento, como por ejemplo se da en el instante en el que llevamos 20 minutos de proceso.

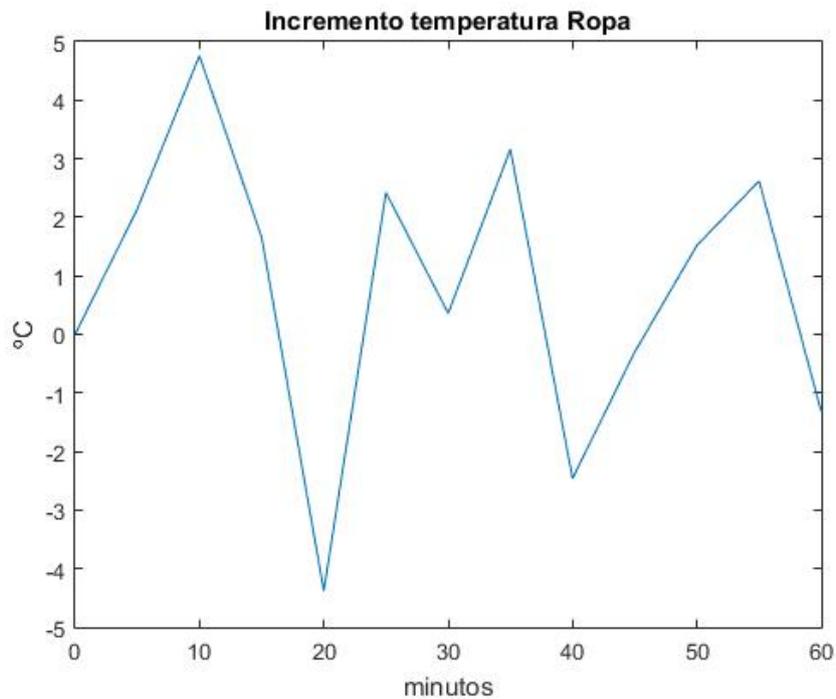


Figura 5. 31: Prueba 3 - Incremento temperatura ropa.

Continuamos con la temperatura del aire que expulsa el sistema de extracción, figura 5.32, al igual que hemos explicado al hablar de la evolución de dicha temperatura durante el proceso, las disminuciones en la temperatura son debidas a la expulsión total del vapor de agua, favorecida por la apertura de la cavidad a la hora de poder realizar las medidas correspondientes entre instantes del proceso.

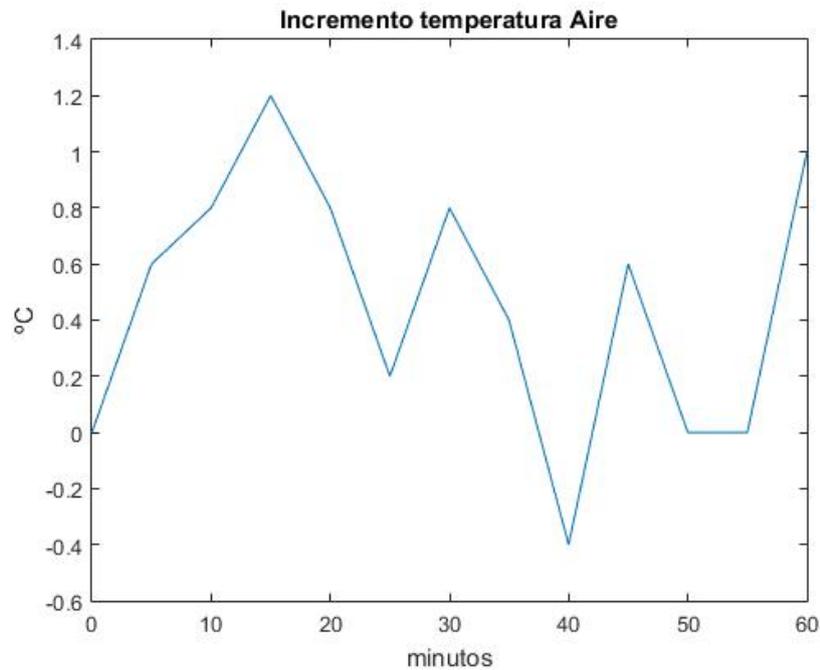


Figura 5. 32: Prueba 3 - Incremento temperatura del aire extraído.

En la figura siguiente, figura 5.33, tenemos la disminución de la cantidad de agua respecto a punto anterior durante el proceso. Como se puede apreciar, siempre tenemos disminución de agua por lo tanto estamos consiguiendo el objetivo de secar durante el proceso.

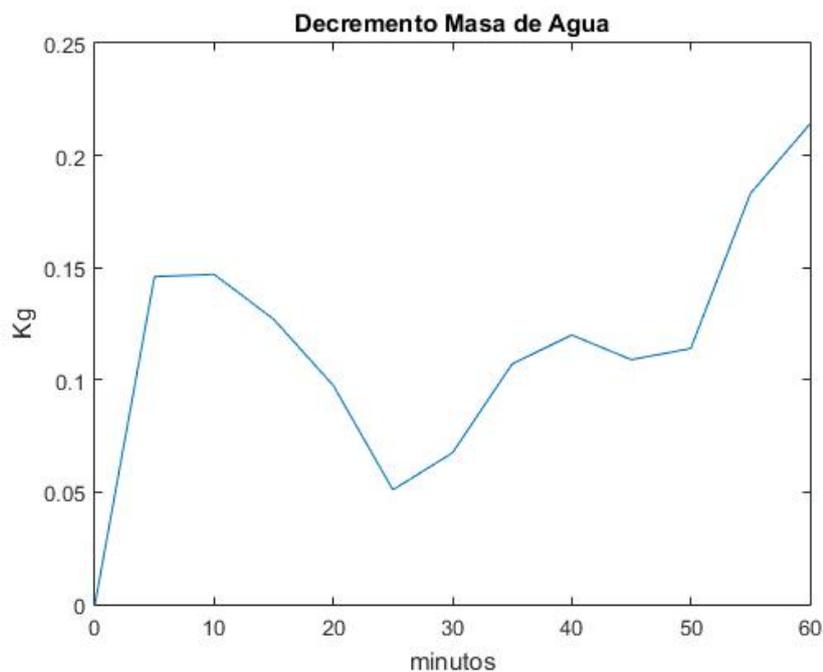


Figura 5. 33: Prueba 3 - Decremento masa agua.

Para finalizar esta prueba vamos a hablar tanto de la potencia absorbida en el proceso, figura 5.34, como de las eficiencias en el interior de la cavidad y la eléctrica, figura 5.35 y 5.36, respectivamente.

En la figura 5.34 podemos apreciar como los instantes en los que consumimos menos potencia coinciden con los instantes en los que se produce una menor disminución de cantidad de agua. En cuanto a las eficiencias, ambas presentan la misma forma que la potencia.

Respecto a la eficiencia en la cavidad, figura 5.35, al comienzo del proceso conseguimos una eficiencia bastante buena, aproximadamente 0.9, pero va disminuyendo hasta 0.3, momento en el que vuelve a subir para quedarse estabilizada en torno a 0.6. La eficiencia media en la cavidad en este caso es de 0.6741, mayor que en la prueba dos. Se debe comentar que se obtienen eficiencias mayores de 1 en la cavidad lo cual puede deberse a varios motivos:

1. Errores de pesada.
2. Mayor evaporación que la debida a la absorción por microondas debido a que introducimos aire caliente en la cavidad.
3. Goteo de la ropa dentro de la cavidad.

En cuanto a la eficiencia eléctrica, figura 5.36, presenta el mismo comportamiento que la eficiencia en la cavidad pero con diferentes valores, alcanzamos un máximo de 0.6 para disminuir hasta 0.2, volviendo a subir y quedándose estabilizada en 0.45. Para esta prueba la eficiencia media ha sido de 0.4669, al igual que con la eficiencia en la cavidad, mayor que en la prueba anterior.

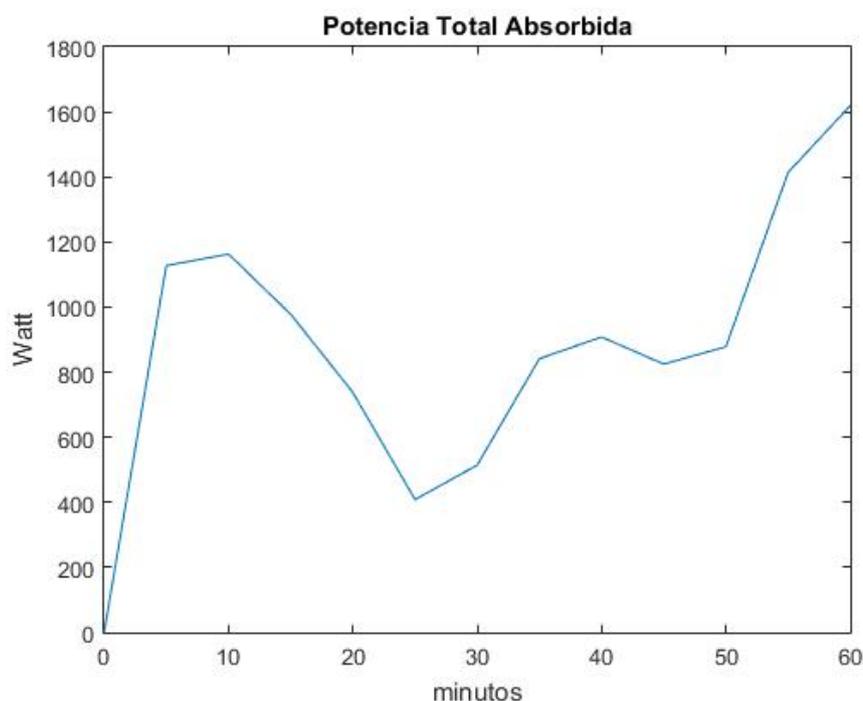


Figura 5. 34: Prueba 3 - Potencia total absorbida.

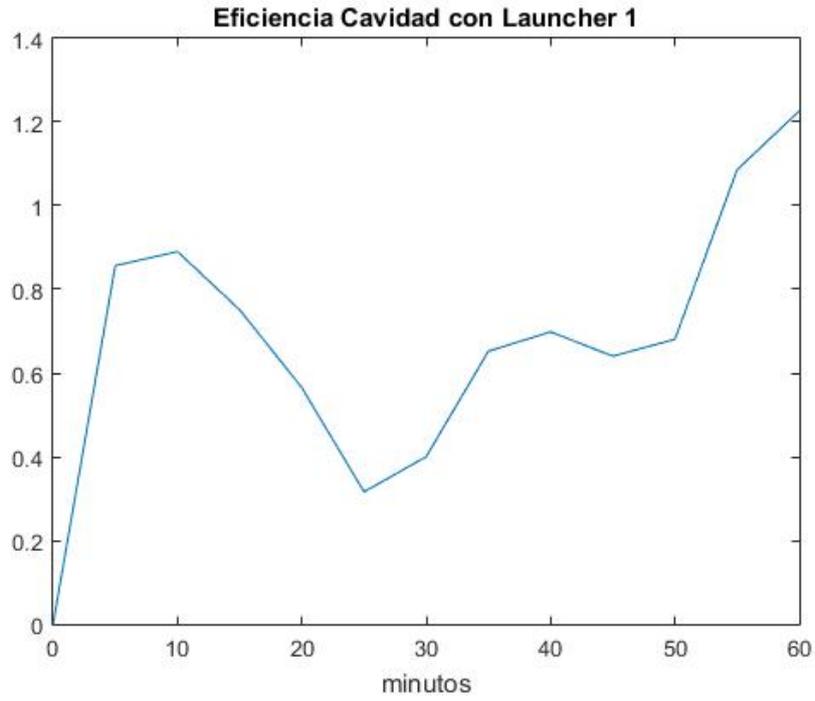


Figura 5. 35: Prueba 3 - Eficiencia cavidad.

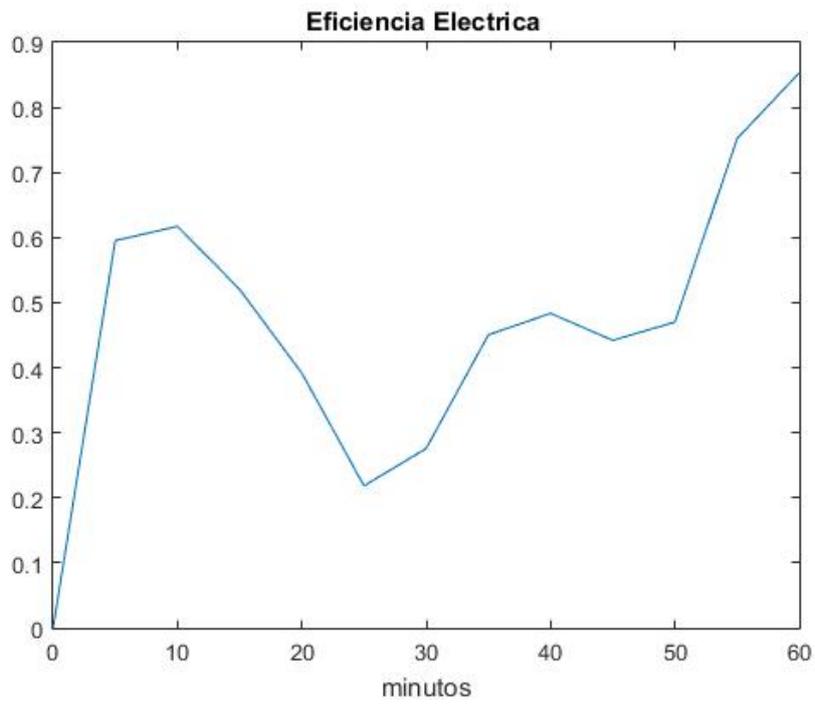


Figura 5. 36: Prueba 3 - Eficiencia eléctrica.

6. Conclusiones y líneas futuras.

6.1 Conclusiones.

El objetivo de nuestro proyecto ha sido comprobar la eficiencia energética del prototipo de secadora por microondas mediante la evaluación de diferentes pruebas de secado. Si nos centramos en los valores de eficiencia obtenidos, tabla 6.1, se puede decir que las eficiencias obtenidas han sido bajas respecto a lo esperado.

Sin embargo, aun habiendo obtenido unos valores de eficiencia bajos, hemos sido capaces de en los distintos procesos de secado, obtener una reducción de X bastante elevada, por lo que con un aumento de las eficiencias (eficiencia de la cavidad y eficiencia eléctrica) podemos decir que el prototipo puede ser capaz de reducir la cantidad de humedad en base seca a una mayor velocidad, y por tanto, reduciendo el tiempo de secado.

Se observa una menor eficiencia, además, cuando se utilizan los dos magnetrones de forma simultánea lo que implica que ambos podrían estar acoplados. Este diseño debería revisarse puesto que además puede provocar que ambos magnetrones se acaben por romper.

Para ello, proponemos una serie de mejoras, explicadas en el apartado de “Líneas futuras” de cara a aumentar la eficiencia del prototipo.

Prueba	Eficiencia Cavidad	Eficiencia Eléctrica
Mag. 1 y 2 con 1 Kg	0.4078	0.3421
Mag. Izquierdo con 2 Kg	0.6741	0.4669
Mag. Derecho con 2 Kg	0.6587	0.4563

Tabla 6. 1: Eficiencias medias de los pruebas de secado

6.2 Líneas futuras.

De cara a una mejora de nuestro prototipo, y por tanto de la obtención de mejores resultados en el proceso de secado, mejora de la eficiencia, etc. proponemos las siguientes líneas futuras:

- Mejora en el sistema de refrigeración de los magnetrones: Con el empleo de ventiladores de mayor potencia podremos reducir la temperatura de trabajo de los magnetrones, evitando así, el sobrecalentamiento de estos y en consecuencia, un incorrecto funcionamiento y una vida útil muy corta.
- Mejora en el sistema de extracción de aire húmedo: Como hemos visto en los resultados, en la evolución de la temperatura del aire extraído, hemos visto como había momentos en el proceso en el que disminuía la temperatura debido a que al abrir la puerta de la cavidad salía todo el vapor de agua del interior. Con un mejor sistema de extracción podemos conseguir que durante los distintos subperiodos del proceso de secado se consiga extraer toda la humedad del interior de la cavidad, evitando así que en el siguiente subproceso de secado tengamos que eliminar la cantidad de humedad del subperiodo anterior.

- Realización de la estructura del bombo en un material no metálico: Aprovechando el auge de la impresión 3D, se propone la sustitución de la estructura del bombo por una estructura no metálica, ya que al estar utilizando un bombo con estructura metálica y dada la elevada velocidad a la que gira, pueden producirse reflexiones que pueden provocar la rotura de los magnetrones.

Si hubiera que seguir un orden en la realización de las propuestas de mejora descritas anteriormente, sería importante realizar sobretodo la primera, debido a que su coste no es elevado y con ello aumentar la vida útil de los magnetrones.

7. Bibliografía.

1. J. Monzó-Cabrera, *Estudio del Secado Asistido por Microondas en los Materiales laminares*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, SPUPV, 2002.
2. A.C. Metaxas, and R.J. Meredith, *Industrial Microwave Heating*. London: Peter Peregrinus Ltd., 1983.
3. Frank P. Incropera and David P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Hardcover)*, John Wiley & Sons Inc; 4th Pkg edition, 2000.
4. T.V. Chow-Ting-Chan and H.C. Reader, *Understanding Microwave heating Cavities*, London: Artech House, 2000.
5. J. Monzó-Cabrera, J.M. Catalá-Civera, A. Díaz-Morcillo, D. Sánchez-Hernández, P. J. Plaza-González, E. de los Reyes. *A Three-Stage Microwave-Assisted Drying Model Based on the Dielectric Properties of Laminar Materials: Theoretical Development and Validation*. *Microwave and Optical Technology Letters*, vol 32(6), pp. 465-469, 2002.
6. J. Monzó-Cabrera, D. Sánchez-Hernández, P. J. Plaza-González, J.M. Catalá-Civera, *A Model for Microwave-Assisted Drying Of Leather: Development And Validation*, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, Vol: 39 (1), pp. 53-64, 2004.
7. Arun S. Mujumdar (Editor), *Handbook of Industrial Drying*, Third Edition (Hardcover), CRC; 3ª edición, 2006.
8. J. Monzó-Cabrera, A. J. Canós, J.M. Catalá-Civera, E. de los Reyes, *Simulation of Temperature Distributions in Pressure-Aided Microwave Rubber Vulcanization Processes*, *Journal of Microwave Power*, 37(2): 73-88, 2002.
9. E. Domínguez-Tortajada, J. Monzó-Cabrera, and A. Díaz-Morcillo, *Uniform Electric Field Distribution in Microwave Heating Applicators by Means of Genetic Algorithms: Optimization of Dielectric Multilayer Structures*, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 55, No. 1, pp. 85-91, 2007.
10. D. Perreault, course materials for 6.334 Power Electronics, Spring 2007. MIT OpenCourseWare (<http://ocw.mit.edu/>), Massachusetts Institute of Technology. Downloaded on [17 de Noviembre de 2008].
11. J. Monzó-Cabrera, J.M. Catalá-Civera, A. Díaz-Morcillo, P. J. Plaza-González, E. de los Reyes, *Enthalpy Calculations For The Estimation Of Microwave-Assisted Drying Efficiency On Laminar Materials*, *Microwave And Optical Technology Letters / Vol. 31*, No. 6, December 20 2001.
12. Manual Fuente Alimentación MAGDRIVE1000.
13. Manual FLUKE 1560.
14. Manual CENTER 305.
15. Hoja de Especificaciones magnetrón Panasonic 2M244-M23