

## Proyecto de prototipo de máquina para sapecado y secado de yerba mate por microondas

Heck Pedro Guillermo <sup>a</sup>, Pros Juan Cruz <sup>a\*</sup>, Seewald Leonardo Damián <sup>a</sup>, Vogel Pablo Ezequiel <sup>a</sup>,  
Perrone Oscar E. <sup>a, b</sup>, Oliveira Mario O. <sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería (FIO), Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Electromecánica, FIO, UNaM, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: [pedro.guillermo.93@gmail.com](mailto:pedro.guillermo.93@gmail.com), [jcpros27@gmail.com](mailto:jcpros27@gmail.com), [leonardoseewald@gmail.com](mailto:leonardoseewald@gmail.com),  
[pablo13vogel@gmail.com](mailto:pablo13vogel@gmail.com), [operrone1@gmail.com](mailto:operrone1@gmail.com), [mario.oliveira@fio.unam.edu.ar](mailto:mario.oliveira@fio.unam.edu.ar)

---

### Resumen

Este trabajo presenta los avances alcanzados en cuanto al estudio legal y desarrollo técnico de un prototipo de máquina para sapecado y secado de yerba mate por medio de las microondas. Para ello, en este documento se destaca las principales reglamentaciones a cumplir en cuanto al producto manipulado y en cuanto a características técnicas y de seguridad que debe cumplir el prototipo. Además, se presenta la etapa de determinación energética y optimización del diseño de la cavidad resonante, donde se utilizó un proceso iterativo para la obtención de un resultado satisfactorio, teniendo en cuenta el cumplimiento de la reglamentación legal correspondiente. Este proyecto se está desarrollando en el marco de la asignatura Proyecto Electromecánico 2, de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Facultad de Ingeniería de Oberá.

**Palabras Clave** – Yerba Mate; Microondas; Sapecado; Secado.

### 1 Introducción

El proyecto surge debido a la problemática de contaminación ambiental que provocan los métodos actuales de sapecado y secado de la yerba mate debido a que generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>; además de los riesgos que estos gases presentan para la salud [1]. Esto motiva a crear una alternativa innovadora de secado y sapecado de yerba mate, proponiendo un proceso menos dañino para la salud, y el medio ambiente teniendo más control sobre el mismo.

Se justifica su realización ante la imposibilidad que presenta el método actual de sapecado y secado de yerba mate de garantizar el cumplimiento de los reglamentos alimenticios establecidos por la Unión Europea, en los cuales se establece una limitación en la cantidad de hidrocarburos aromáticos policíclicos que pueden contener los productos alimenticios [2], siendo esta una condición determinante a la exportación de yerba mate como un producto alimenticio regular hacia destinos europeos.

El empleo de microondas representa una mayor eficiencia en lo que respecta al consumo energético, es decir, se aprovecha mejor la energía suministrada para realizar el proceso de sapecado y secado. Además, este método genera que tanto las ramas como las hojas de yerba mate se sequen de forma homogénea a diferencia del método tradicional [3].

Para el diseño del prototipo, se deben tener en cuenta las reglamentaciones necesarias tales como las del Instituto nacional de yerba mate [4], código alimentario argentino [5], código alimentario de la unión europea [2], ministerio de salud y acción social [6] y reglamento de radiocomunicaciones de la unión internacional de telecomunicaciones [7].

## 2 Estudio legal

La evaluación legal busca determinar la viabilidad del proyecto, identificando las normativas y los reglamentos existentes para el desarrollo del mismo. En este caso, dicha evaluación se realizará en función a todo lo referido a la Yerba Mate (YM) como materia prima y al proceso de sapecado y secado de la misma a través de microondas.

Las normativas brindan los lineamientos necesarios para definir los parámetros de la YM al inicio y al final del proceso en la fase de producción, así como algunas cuestiones relacionadas al diseño del prototipo como ser la emisión de ondas electromagnéticas y los recaudos que hay que tener al respecto.

Algunos reglamentos brindan la información necesaria para regular tanto el cuidado de la materia prima, y también las condiciones de trabajo del operador.

En lo que respecta a las características del producto al final del proceso de secado se trabaja con las siguientes resoluciones establecidas por el Instituto Nacional de Yerba Mate (INYM) [4]:

- Resolución 49/2002: el cual resuelve la oficialización del reglamento de la “Cosecha de la Yerba Mate” y el reglamento de la “Secansa de la Yerba Mate”.
- Resolución 347/2021: el cual resuelve que se modifica el Art. 5° de la Resolución del INYM N.º 11/2017 (Reglamento de Control de Calidad de Materia de Yerba Mate).

También en conjunto con lo establecido por el INYM, se respeta lo dictado en los capítulos del Código Alimentario Argentino que se mencionan a continuación [5]:

- Capítulo IV: establece los materiales con los cuales se construyen los utensilios y maquinaria que se puede utilizar en la construcción de nuestro prototipo.
- Capítulo XV: define al producto en sus diferentes formas después de cada proceso y luego brinda los parámetros que requiere el producto para mantenerse en condiciones adecuadas para la venta.

Por último, en lo que respecta a las características finales del producto, se trabaja con respecto al Capítulo XV del Código Alimentario Argentino y con el Código Alimentario de la Unión Europea Reglamento (UE) 2015/1933 [2], el mismo establece los valores límites de los hidrocarburos aromáticos policíclicos y benzopireno para sustancias alimenticias.

En este sentido para poder determinar un diseño óptimo y seguro para los operarios se procedió a trabajar con lo siguiente:

- Ministerio de Salud y Acción Social, según la resolución 202/95 con sus artículos 1,2,3 y 4 aprueba el estándar nacional de seguridad para la exposición a radiofrecuencia comprendida entre 100 kHz y 300 GHz, conforme lo establecido en el "manual de estándares de seguridad para la exposición a radiofrecuencia comprendido entre 100 kHz y 300ghz" y “radiación de radio frecuencia” [6].

- Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) Reglamento de Radiocomunicaciones: En base a la misma se pudo determinar la frecuencia de onda para aplicaciones industriales sin que estén afecten a otros servicios o dispositivos [7].

En lo que respecta al tratamiento de los residuos electrónicos específicamente, propios del descarte del material al finalizar su vida útil, por ejemplo, el recambio de magnetrones se relevó que no hay normativa vigente en el territorio argentino, pero si existe, el proyecto en Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), que tuvo inicio en marzo de 2018, tiene una duración de cinco años y es de alcance regional [8]. El objetivo general del proyecto es lograr el manejo ambientalmente racional de RAEE, especialmente en la gestión de los Compuestos Orgánicos Persistentes, mediante el fortalecimiento de las iniciativas nacionales, de la cooperación regional, de los sistemas de intercambio de información y de la gestión del conocimiento.

En tanto a las condiciones laborales en la República Argentina, el decreto 351/79 se aprueba la reglamentación de la Ley No. 19.587 (B.L. 1972-163) sobre Higiene y Seguridad en el Trabajo y autoriza al Ministerio de Trabajo a otorgar plazos, modificar valores, condicionamientos y requisitos establecidos en la misma [9]. Dentro de la misma se establece los valores límites de carga térmica, exposición sonora y exposición a microondas. Mientras que las remuneraciones mínimas a percibir por parte del personal que ejecuta actividades relacionadas a la industria yerbatera están definidas según la resolución 104/2019 de la Comisión Nacional de Trabajo Agrario.

Se concluye así que respetando lo establecido por las diferentes entidades, el prototipo de máquina se adecuará a las necesidades materiales aptas para el contacto con sustancias alimenticias y respetará los niveles máximos permitidos de filtraciones de ondas electromagnéticas. Además, se obtendrá un producto que cumplirá con las normas alimenticias que rigen el territorio argentino, y las normas de la UE.

### **3 Estudio técnico**

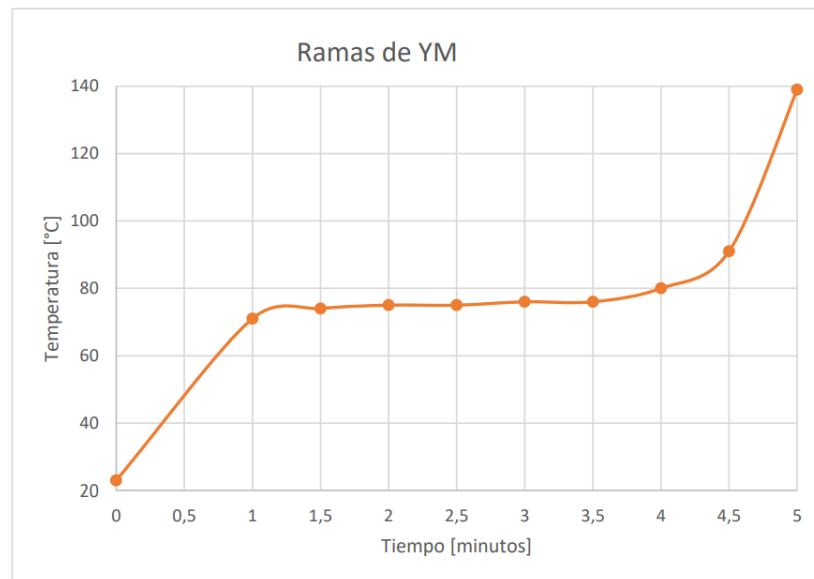
#### *3.1 Energía necesaria*

La energía que se requiere durante el proceso de sapecado y secado es utilizada, para calentar el material y para evaporar el agua contenida en la misma. Esta es función de la cantidad de agua a evaporar (calor latente), y en menor medida del calor específico del producto para elevar su temperatura (calor sensible).

En la Tesis de Maestría de Passardi (2004) [3], se realiza el sapecado y secado de yerba mate por medio de un microondas de uso doméstico operando a 2450 MHz y con una potencia de consumo de 1200 W y una potencia radiada de 700 W. Luego de experimentar con varias muestras, se determina un consumo energético específico del microondas respecto de la masa de yerba mate. Este consumo es determinado por medio de una prueba calorimétrica con un recipiente de agua, midiendo el tiempo, la energía consumida, la potencia instantánea y la variación de la temperatura del agua. Con los resultados de este experimento se determina además del consumo energético una

estimación del rendimiento. Con el valor del rendimiento se puede determinar cuanta energía es la requerida por el producto para sapecarse y secarse.

En [3], también se describe la cinética de secado de la yerba mate, donde se analiza la temperatura en función del tiempo de secado. De esta variable se pueden obtener varias conclusiones interesantes sobre el proceso, en primer lugar, la distinción de tres zonas muy marcadas, las cuales se pueden observar en la Fig. 1. En segundo lugar, durante la etapa de temperatura aproximadamente constante es donde ocurre la mayor evaporación del agua libre que presenta la hoja.



**Fig. 1. Variación de la temperatura de las ramas de yerba mate em función del tiempo [3]**

En el presente trabajo se utilizará los resultados obtenidos por [3] para todo el cálculo y dimensionamiento de la máquina.

### *3.2 Diseño de la cavidad*

La cavidad es el lugar donde se realiza el proceso de sapecado y secado del producto a través de las ondas electromagnéticas. La cavidad puede ser de varias formas y dimensiones.

En este caso el proceso será de tipo continuo por lo que la cavidad debe ser abierta en dos lugares para poder hacer el ingreso y egreso de la Yerba Mate. El producto será desplazado a través de una cinta plana, por lo que la cavidad será de tipo rectangular. Este tipo de cavidades es una de las más utilizadas para procesos continuos [10]. El diseño de la cavidad posee mucha relevancia debido al impacto que tiene en el proceso y además es de alta complejidad.

Como primera aproximación para obtener las dimensiones de la cavidad, se tiene en cuenta, el flujo masico del material que debe pasar por la máquina, su densidad y la velocidad que tendría la cinta transportadora.

Como parámetro de diseño el horno debe secar 50 kilogramos de yerba por hora. De esta forma, con la ecuación (1) se calcula el flujo volumétrico de hoja verde que ingresaría al horno [11].

$$\dot{V}_{HV} = \frac{\dot{m}_{HS} * 2.85}{\rho_{YM}} \quad (1)$$

Donde:

$\dot{V}_{HV}$ : flujo volumétrico de hoja verde [ $m^3_{HV}/h$ ].

$\dot{m}_{HS}$ : flujo masico de hoja seca [ $kg_{HS}/h$ ].

$\rho_{YM}$ : densidad de yerba mate [ $kg_{HV}/m^3$ ].

El valor de 2,85 en la ecuación (1) es la equivalencia de hoja verde con respecto a hoja seca obtenida de [3] y para la densidad se toma el valor experimental presentado en [11], el cual es de 38 kgHV/m<sup>3</sup>.

Además, el flujo volumétrico está definido por el área transversal de ingreso del producto multiplicado por la velocidad de paso, tal como se observa en la ecuación (2), [11].

$$\dot{V}_{HV} = A * v \quad (2)$$

Donde:

$\dot{V}_{HV}$ : flujo volumétrico de hoja verde [ $m^3_{HV}/h$ ].

A: área transversal de la yerba sobre la cinta [ $m^2$ ].

v: velocidad de la cinta [ $m/s$ ].

El área transversal se define considerando un espesor de producto que permita el paso del aire para evacuar el vapor de agua y además esté acorde al grado de aplastamiento con el cual se realizó la medición de densidad. Se opta por un ancho de cinta que resulte en una velocidad de cinta coherente.

Con las consideraciones mencionadas se define de manera aproximada las dimensiones de la cavidad. Sin embargo, esta debe permitir que las ondas electromagnéticas entren en resonancia para que la amplitud del campo eléctrico aumente, además de poseer un calentamiento lo más uniforme posible, por lo que se debe profundizar en el diseño de la cavidad para optimizar el proceso de sapecado y secado.

### 3.3 Diseño de una cavidad multimodo

Las cavidades multimodo son las más comunes para el calentamiento por microondas, debido a que la construcción es relativamente sencilla, ya que es una cavidad rectangular en este caso con accesorios, posee una capacidad amplia para procesar distintos productos, ya sea con variación de tamaño como de propiedades eléctricas [10].

Un horno multimodo soporta una gran cantidad de modos de resonancia simultáneamente, donde estas se suman vectorialmente en el espacio para dar un determinado valor de campo eléctrico.

Una cavidad rectangular se puede considerar como una guía de onda con los extremos cortocircuitados en ambos extremos, formando una caja cerrada. La guía de onda puede albergar varios modos  $TE_{mn}$  y  $TM_{mn}$  (la componente de campo eléctrico en la dirección de propagación de los modos TE es nula, igual que la del campo magnético de los modos TM, los subíndices  $m$ ,  $n$  y  $p$  indican el número de variaciones del campo correspondiente a lo largo de las dimensiones alineadas con los ejes ortogonales de la cavidad [12]) cada uno teniendo una longitud de onda diferente. Cada una resuena cuando la longitud del horno es de  $p \cdot \lambda_g / 2$  ( $\lambda_g$ : longitud de onda de la onda de microondas [12]) para un modo particular. Los números enteros incluido el cero  $m, n, p$  son la mitad de una onda de campo eléctrico sinusoidal a lo largo de cada eje respectivo [10].

Por definición una cavidad multimodo debe tener muchos modos resonantes en la vecindad de la frecuencia de operación del generador [10]. El número de modos de resonancia se denota como una figura de mérito de la cavidad.

Los valores de los multiplicadores  $m, n, p$  pueden valer desde cero hasta  $m < 2a / \lambda_0$ ,  $n < 2b / \lambda_0$  y  $p < 2l / \lambda_0$ . En la Fig. 2 se pueden observar las dimensiones de la cavidad de manera genérica ( $a, b, l$ ).

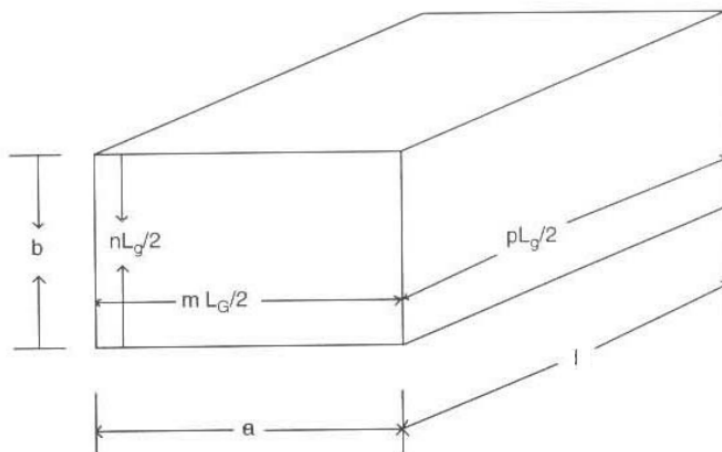


Fig. 2. Dimensiones genéricas de la cavidad resonante

La ecuación (3) representa la frecuencia de resonancia para cada modo, teniendo las dimensiones de la cavidad [10]. Con las dimensiones aproximadas por la cantidad de producto a secar y su densidad, se puede buscar refinar las dimensiones maximizando el número de modos dentro de la banda de frecuencia de trabajo del generador [10].

$$f_r = \frac{C}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} \quad (3)$$

Donde:

$f_r$ : frecuencia de resonancia del nodo [MHz].

$C$ : velocidad de la luz [m/s].

$m, n, p$ : multiplicadores.

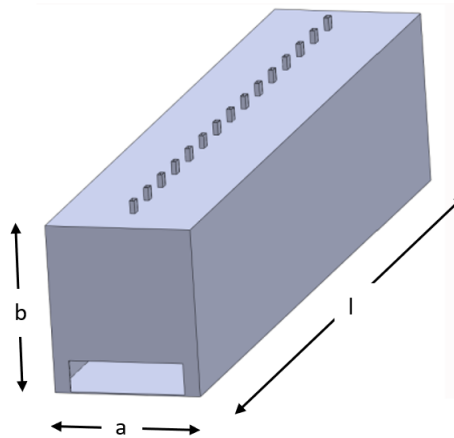
$a, b, l$ : dimensiones de la cavidad resonante [m].

La determinación del número de modos que tiene su frecuencia dentro del rango de frecuencia de trabajo se calcula con un código de programación de elaboración propia mediante el software MATLAB [13], el cual es presentado en el Apéndice A. El mismo permite ingresar las dimensiones de la cavidad, la banda de frecuencia y así determinar los valores de los multiplicadores de media onda, seguidamente realiza todas las combinaciones posibles de estos para luego calcular todas las frecuencias de resonancia. Luego se filtra a las frecuencias que se encuentran en el rango que se va a utilizar, determinando de esta manera la cantidad de modos que presenta esa cavidad especificada.

Se iteran varias dimensiones de cavidades dentro del rango que se especifica para cada lado del rectángulo, para así obtener una combinación de dimensiones que maximice el número de modos. Las dimensiones resultantes del proceso iterativos se muestran en la Tabla 1 y se pueden apreciar en la Fig. 3.

**Tabla 1 Dimensiones de la cavidad resonante (elaboración propia)**

a	1,1 m
b	1,6 m
l	7,1 m



**Fig. 3 Dimensiones genéricas de la cavidad resonante**

#### **4 Conclusiones**

El objetivo de este documento es presentar los avances relacionados con el diseño de un prototipo de máquina para el sapecado y secado de Yerba Mate por microondas. Mediante los estudios iniciales se logró recopilar y analizar información sobre la legislación que rige cuestiones directamente relacionadas a la fabricación de una máquina de secado de yerba mate a través de microondas. Por otro lado, se pudieron obtener los parámetros iniciales para el cálculo y el pre dimensionamiento de la misma, tales como la energía necesaria y recomendaciones para el diseño, obtenidas gracias a un trabajo de indagación bibliográfica. Se obtuvieron las dimensiones generales de la cavidad resonante mediante un programa de optimización desarrollado por el grupo en el software MatLab. Como trabajo futuro se continuará con el estudio técnico, análisis ambiental y evaluación económica del proyecto.

#### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de la Catedra Proyecto Electromecanico 2 (EM533), a los docentes de la misma y a la Facultad de Ingenieria de Obera. Los autores agradecen al Ing. Oliveira Mario por la colaboración prestada en la preparación de este artículo.



## Apéndice A. Programa de MatLab para el optimizado de la cavidad resonante

```
clear all
close all
clc

f0 = 2450*10^6; % frecuencia magnetron
c0 = 299792458; %velocidad de la luz en el vacio
lambda0 = c0/f0; %longitud de onda
deltaf0 = 50*10^6; % Variacion de frecuencia del magnetron (unilateral el valor)
rango = [f0-deltaf0,f0+deltaf0]; % Rango de operacion del magnetron

a = [1.2:0.05:1.4]; % Ancho de cavidad
b = [1.4:0.05:1.6]; % Alto de cavidad
l = [6.9:0.05:7.1]; % Largo de cavidad

res=[0 0 0 0];
for i=1:1: numel(a)
    for j=1:1: numel(b)
        for k=1:1: numel(l)

            m_max=fix(2*a(i)/lambda0);
            n_max=fix(2*b(j)/lambda0);
            p_max=fix(2*l(k)/lambda0);

            m=[0:1:m_max];
            n=[0:1:n_max];
            p=[0:1:p_max];

            nmodos=0;
            for ii=1:1: numel(m)
                for jj=1:1: numel(n)
                    for kk=1:1: numel(p)
                        fr=c0/2*((m(ii)/a(i))^2+(n(jj)/b(j))^2+(p(kk)/l(k))^2)^(1/2);
                        if ((fr>rango(1)) && (fr<rango(2)))
                            nmodos=nmodos+1;
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```

```

        end
    end
    if nmodos>res(4)
        res=[a(i) b(j) l(k) nmodos];
    end
end
end
end

```

```

disp('Ancho:')
disp(res(1))
disp('Alto:')
disp(res(2))
disp('Largo:')
disp(res(3))
disp('Numero de modos:')
disp(res(4))

```

## Referencias

- [1] M. C. Gallero, “Cambios y permanencias en la producción de yerba mate: Un estudio desde la historia ambiental en Misiones (Argentina).” Misiones, Argentina, 2018
- [2] UE Unión Europea Standar 835, 2015/1993.
- [3] R. L. Passardi, “Determinación de parámetros de secado de Yerba Mate mediante horno microondas” Universidad nacional de misiones. Oberá, Misiones, Argentina, 2004.
- [4] INYM Instituto Nacional de la Yerba Mate, Resolución 49/2002, Resolución 347/2021.
- [5] Código Alimentario Argentino Capitulo IV, Capitulo XV, Art 1193, 1194, 1195.
- [6] MSAL Ministerio de Salud y Acción Social Resolución 202/95 Art 1, 2, 3, 4.
- [7] ITU Unión Internacional de Telecomunicaciones, Reglamento de Radiocomunicaciones 2020.
- [8] Proyecto RAEE Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, 2018.
- [9] Decreto 351/97 Reglamentación de la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo, 1979.
- [10] R. Meredith, “ENGINEERS' HANDBOOK of INDUSTRIAL MICROWAVE HEATING” London, United Kingdom: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [11] M. Arntzen, D. Hultgren, H. Waidelich, “Alternativa tecnológica para el sapecado y secado de ramas de yerba mate aplicando microondas” Universidad nacional de misiones. Oberá, Misiones, Argentina, 2019.
- [12] Menéndez, J.A., Moreno, A.H. (Eds.). (2017). “Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas”. Latacunga, Ecuador: Editorial Universidad Técnica de Cotopaxi, Primera Edición, pp 315. ISBN: 978-9978- 395-34-9
- [13] MATLAB. (2014). version 8.3.0 (R2014a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.