

Alternativa Tecnológica para el Zapecado y Secado de Ramas de Yerba Mate aplicando Microondas

David R. Hultgren^a, Matias A. Arntzen^a, Henry Waidelich^a, Hector F. Berent^a, Mario O. Oliveira^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

^b Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Energía Eléctrica – LIDEE, FI-UNaM, Oberá, Misiones, Argentina
e-mails: matiarntzen@gmail.com, davidrh87@gmail.com, henrywaidelich@gmail.com,
hectorberent@yahoo.com.ar, ingenioli@gmail.com

Resumen

La elaboración industrial de yerba mate, presenta hoy operaciones de zapecado y secado, con equipamiento tecnológico que permite a las ramas de yerba mate el contacto directo con gases y humos provenientes de la combustión de material biomásico con aire. Cuando esta combustión es incompleta, se forman Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP₄) que son transportados y depositados en las ramas de yerba. Estas sustancias son potencialmente carcinógenos y no deben superar en yerba mate elaborada los 50µg/kg yerba según el Código Alimentario Europeo (2015) entre otros. Por tal motivo, este trabajo tuvo como objetivo general, revisar la bibliografía científica para evaluar la viabilidad técnica del uso de microondas en las operaciones de zapecado y secado de ramas de yerba mate, para en una segunda etapa del Proyecto, diseñar un prototipo.

Palabras Clave –Microondas, Secado, Tecnología, Yerba mate, Zapecado.

1. Introducción

La Yerba Mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire (Aquifoliácea)) es un árbol nativo de América del Sur, muy representativo del pueblo originario Guaraní, que lo utilizaba para elaborar un alimento estimulante conocido como “Caá matí” el cual se lo conoce actualmente con el nombre de “Mate”.

La transformación primaria de la yerba mate (YM), consiste en el zapecado, secado y canchado. El objetivo del zapecado es la inactivación enzimática, que produce la oxidación de la hoja. El secado, tiene por finalidad obtener un nivel de humedad mínimo requerido por la normativa alimentaria. El canchado consiste en una molienda gruesa para facilitar su transporte y estacionamiento. El proceso tradicional del zapecado consiste en la exposición rápida de la rama de yerba mate a altas temperaturas mediante la acción de la llama y gases producto de combustión de material biomásico.

Las consecuencias de realizar el proceso de zapecado mediante la quema de material biomásico, es la combustión incompleta, la cual trae aparejada muchos compuestos, incluyendo entre ellos a los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), caracterizados por su peligrosidad mutagénica y por ser un potencial cancerígeno [1].

El 90% del consumo mundial se traduce a los tres países productores: Argentina con un 54%, seguido por Brasil con un 40% y Paraguay con un 6%. Además, aparecen Uruguay, Siria y Chile, como otros consumidores significativos. El resto de los países totalizan actualmente cerca del 1% del consumo mundial [2]. Esta concentración del consumo se puede explicar entre otros motivos, por la dificultad de expansión a otros mercados debido a las restricciones alimenticias que estos presentan

en cuanto al contenido de HAP, tal es el caso del código alimentario de la Unión Europea (UE 2015/1933) [3].

En base a las problemáticas de exportación mencionadas anteriormente, se está realizando un estudio de factibilidad para proponer un proceso de zapecado y secado mediante ondas de alta frecuencia, que garantice la ausencia de los HAP.

2. Estudio del Estado del Arte

2.1. Producción Primaria

La producción primaria puede resumirse como un conjunto de procedimientos que se realiza a la hoja de yerba mate, dentro de un establecimiento conocido como “secaderos”. Las principales etapas las conforman el zapecado, presecado, secado y canchado [4].

2.1.1. Zapecado

El zapecado es un proceso térmico en el cual las hojas crepitan y las vesículas de agua se rompen creando una discontinuidad superficial que permite la evaporación y difusión de aire hacia la estructura interna de la hoja [5], produciendo la inactivación de las enzimas polifenol oxidasa y peroxidasa, evitando así la oxidación de la hoja. [1].

En la actualidad este proceso térmico se realiza mediante la exposición directa de las ramas a la llama y gases calientes producto de la combustión de biomasa de monte implantado. El equipamiento usualmente empleado se representa en la Fig. 1 y consta de un cilindro metálico horizontal con una leve inclinación, que rota a bajas revoluciones. Además, el cilindro cuenta con aletas dispuestas de forma alternada con una leve inclinación y en un extremo posee una chimenea para lograr la evacuación de gases [5].

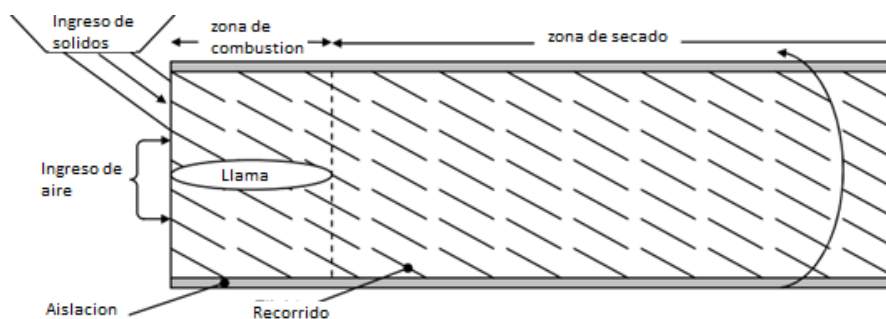


Fig. 1. Esquema del proceso de zapecado [6]

2.1.2. Secado

El secado es una etapa ubicada a continuación del zapecado cuya finalidad es reducir el contenido de humedad de la yerba mate en un rango del 3% al 7% en base húmeda (BH) [7]. En la actualidad se emplean tres métodos de secado:

a) Secadero Tipo Barbacué

Es un tipo de secansa estática con carga y descarga manual de la yerba mate. Consiste en una construcción de mampostería y una malla metálica donde se colocan las ramas. Los gases y el aire

caliente ingresan por la parte inferior a través de tubos provenientes de un hogar a leña. Para conseguir la humedad requerida con este método, es necesario que la yerba esté expuesta al calor entre 12h y 18h siendo la misma removida en forma manual cada 3h-4h [4].

b) Secadero de Cinta

Es un método de secado que consiste en cintas transportadoras las cuales desplazan al producto de forma continua, pudiéndose situar cintas superpuestas o bien en forma consecutiva. El proceso de secado se produce por la circulación del producto en sentido transversal con los gases calientes, el cual es introducido desde la parte inferior. El gas caliente puede ser humos productos de combustión, o bien aire caliente obtenido de un intercambiador de calor humo-aire. El tiempo requerido para completar el proceso es de aproximadamente 3h a 6h, con aire ingresando a 110°C [8].

c) Secadero Rotatorio

Es llevado a cabo en cilindros rotativos similares al que se utiliza en el zapecado. Se alimentan desde un extremo tanto las ramas como los gases de combustión y aire. Se caracterizan por trabajar a altas temperaturas durante cortos tiempos de residencia (menores a 1h). Este método es utilizado como una primera etapa de secado denominada presecado. Tiene por objetivo reducir el contenido de humedad de la yerba mate, consiguiendo corregir cualquier diferencia de tratamiento en la etapa de zapecado [5].

2.1.3. Canchado

Es la molienda gruesa de las ramas ya secadas y su objetivo es facilitar el almacenamiento como así también aumentar la superficie de producto expuesta al aire. La maquinaria utilizada consiste en un molino de martillos, que poseen cribas de salida. Además de la molienda se realiza un tamizado con zarandas rotativas con el objetivo de separar los palos de mayor tamaño. El producto obtenido se lo introduce en bolsas de arpilleras para su posterior almacenamiento [7].

2.2. Normativas y reglamentación

A continuación, se expone, las condiciones que debe cumplir la yerba mate, según el código alimentario argentino. Además, se presenta resumidamente lo establecido por el código alimentario de la Unión Europea.

2.2.1. Código Alimentario Argentino

A continuación, se expresa, lo que se entiende por Yerba Mate, según el código alimentario argentino [9].

“Artículo 1193 - (Resolución Conjunta SPRyRS y SAGyPA N° 41/2006 y N° 641/2006)

“Con la denominación de Yerba Mate o Yerba se entiende el producto formado por las hojas desecadas, ligeramente tostadas y desmenuzadas, de Ilex Paraguariensis Saint Hilaire (Aquifoliácea) exclusivamente, mezcladas o no con fragmentos de ramas secas jóvenes, pecíolos y pedúnculos florales.”

Artículo 1195 - (Res 307, 29.11.90)

La yerba mate elaborada que se tenga en depósito, exhiba o expendá deberá responder a las siguientes características:

- a) Humedad (100-105°C): máx 9,5%
- b) Cenizas totales (500-550°C): máx 9,0%, Método AOAC (sobre producto seco)
- c) Cenizas insolubles en ácido clorhídrico al 10% p/v máx 1,5%
- d) Cafeína: mín 0,6%, Método de Cortes (sobre producto seco)
- e) (Res MSyAS N° 990, 22.12.97) Extracto acuoso mínimo 25%, método AOAC (sobre producto seco).
- f) Sustancias vegetales extrañas: máx 1,0%
- g) Semillas de yerba mate: máx 1,0%
- h) No deberá estar ardida, alterada o agotada.”

2.2.2. Código Alimentario Unión Europea

El Reglamento (UE) 2015/1933 de la Comisión, de 27 de octubre de 2015, modifica el Reglamento (CE) N° 1881/2006 en lo que respecta al contenido máximo de hidrocarburos aromáticos policíclicos en la fibra de cacao, los chips de plátano, los complementos alimenticios, las hierbas secas y las especias secas. El mismo establece en 6.1.14, que para hierbas secas la máxima concentración de Benzopirenos (BaP) no debe superar los 10 µg/kg, y la máxima concentración de 50µg/kg para la suma total de Benzoantraceno (BaA), Criceno (Chry), Benzoacefantrileno (BbF) y BaP, a esta sumatoria se la denomina (HAP₄) [1].

2.3. Métodos alternativos de Zapecado

Se han probado técnicas alternativas para la etapa de zapecado que consistieron en pruebas de laboratorio y ensayos de prototipo. Sin embargo, no han tenido desarrollos e implementación hasta el momento en secaderos de Yerba Mate, a excepción del zapecado mediante agua hirviendo (BWZ).

2.3.1. Agua Hirviendo (BWZ):

Las pruebas realizadas con este método fueron mediante un prototipo construido por un productor Misionero, dónde las muestras de Yerba Mate son expuestas a la acción del agua hirviendo por un tiempo de 30s.

Los resultados obtenidos con este método, arrojaron valores de humedad a la salida del zapecado, mayores que el método tradicional, ya que se incorpora agua al sólido durante la realización de la etapa, requiriendo de esta forma mayores tiempos de secado. En la Tabla 1 se observa que el contenido de cafeína, no presenta diferencias sustanciales con respecto al método tradicional. Además, el contenido de Polifenoles, posee diferencias apreciables con respecto a los métodos utilizados actualmente. En cuanto al color del producto, se obtuvo un tono más oscuro respecto al método tradicional y perceptibles diferencias sensoriales [1].

2.3.2. Vapor de Agua (WSZ)

Este método utiliza un prototipo construido por Barrionuevo [1]. Dónde las muestras de Yerba Mate se someten a vapor de agua que se encuentra a una presión de 1,5 atm por un tiempo de 10 min.

Los resultados obtenidos con esta técnica indican contenidos de humedad altos a la salida del zapecador por la propia naturaleza de la práctica. En la Tabla 1 se observa que el contenido de cenizas totales y el porcentaje de cafeína no presentan diferencias sustanciales respecto de los obtenidos con

los métodos tradicionales. Por su parte, el color del producto presenta un tono más oscuro y las diferencias sensoriales son perceptibles respecto al método tradicional [1].

2.3.3. Radiación de Alta Frecuencia (HFR)

En este caso los trabajos realizados con este tipo de técnica involucran un método integral de zapecado y secado. El prototipo en el cual se realizaron los ensayos corresponde a Laube [10]. Cabe destacar que al tratarse de un proceso integral no se obtiene la cantidad adecuada de humedad a la salida del zapecado, como si se mencionó en los métodos anteriores. Los resultados obtenidos con esta técnica indican contenido de cenizas totales de valor similar a las prácticas tradicionales de zapecado (Tabla 1), mientras que las cenizas insolubles en ácido presentan el mayor valor respecto a los demás métodos. En cuanto a la cafeína los valores logrados son los de mayor porcentaje respecto al tradicional y a los métodos alternativos. El contenido de Polifenoles no presenta diferencia con respecto al método tradicional y por su parte el color del producto y las características organolépticas arrojaron los valores más parecidos a los métodos tradicionales [1].

Tabla 1. Comparación de los distintos métodos de Zapecado con respecto al método tradicional (TZ) [1]

Parámetros Psico químicos		Método de Manufactura					
		BWZ	TZ ₁	WSZ	TZ ₂	HFR	TZ ₃
Contenido Total de Cenizas (g/100g HS)*		627±0,26	649±0.26	581±0.16	570±0.2	575±0.18	596±0.35
Contenido de Ceniza Insoluble en Acido (g/100g HS)		0.46±0.07	0.42±0.06	0.34±0.05	0.38±0.07	0.42±0.08	0.13±0.05
Extracto Soluble (g/100g HS)		38.93±1.34	40.74±0.94	37.52±1.66	40.47±0.47	41.06±1.79	40.79±1.49
Cafeína (g/100g HS)		0.9±0.03	0.9±0.07	1.15±0.04	0.93±0.06	1.23±0.1	0.96±0.05
Contenido Total de Polifenol (g GAE/100g HS)		8.85±0.48	10.14±0.42	7.75±0.88	10.05±1.46	8.33±1.4	8.25±0.64
Parámetros de Color	L	37.29±1.67	37.82±1.84	35.42±1.67	38.2±0.95	36.21±0.87	36.06±1.18
	a	-1.47±0.41	-1.62±0.34	-0.17±0.11	-2.06±0.19	-1.92±0.39	-2.43±0.28
	b	12.33±0.77	13.84±0.71	13.06±0.6	14.55±0.33	14.1±0.4	13.22±0.7

*HS: Hoja Seca

Los valores de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) para los distintos métodos, se muestran en la Tabla 2. Los valores obtenidos tanto para el Benzopireno y para el HAP4 superan los valores máximos definidos en la sección 2.3.2 [1].

Tabla 2. Valores de HAP para los distintos métodos de Zapecado [1]

HAP	Método de Manufactura					
	BWZ	TZ ₁	WSZ	TZ ₂	HFR	TZ ₃
BaA	ND (0.18b)	12.4±0.6	ND (0.18b)	2.4±0.43	ND (0.18b)	13.42±1.75
Chry	ND (0.35b)	16.5±0.6	ND (0.35b)	2.01±0.08	ND (0.35b)	23.9±2.43
BbF	<LOQ (0.41a)	17.3±0.05	<LOQ (0.41a)	2.51±0.47	ND (0.12b)	22.75±2.93
BaP	ND (0.06b)	17.4±0.42	ND <LOQ (0.20a)	2.77±0.2	ND (0.06b)	37.1±5.47
HAP ₄	NQ	63.6	NQ	9.69	ND	97.17

HAP₄= BaA+ Chry+ BbF+ BaP

<LOQ Limite de cuantificación ND (no detectado) NQ (no cuantificable)

a Limite de Cuantificación b Limite de detección

TZ₁, TZ₂ TZ₃: Método tradicional de zapecado

2.4. Tecnología actual del zapecado de yerba mate por microondas

Según se observa en el informe realizado por Arndt, et al. [11], habían registrados 234 secaderos de yerba mate, en los cuales solo 8 presentaban formas alternativas de secado, o bien una combinación entre distintas partes de los métodos de secado y zapecado. Además, ninguno de ellos trabajaba con método de zapecado de ondas de alta frecuencia, evidenciando así, que esta tecnología no se utiliza en la industria de la yerba mate.

La bibliografía que existe sobre esta tecnología para aplicar sobre el proceso de zapecado y/o secado de yerba mate, es escasa. Sin embargo, se han encontrado trabajos que analizan la viabilidad de utilización de este método desde el punto de vista técnico, tecnológico y económico.

Passardi [5], establece una caracterización de los parámetros que influyen en el secado y zapecado de yerba mate mediante proceso de microondas. En el mismo, se ensayaron distintas muestras de yerba mate, en un horno microondas doméstico de 1200W. Se experimentaron 5 tipos de muestras que consistían en ramas enteras, solo hojas y finalmente otras tres, ensayando distintos diámetros de palos (2,5mm, 5mm y 7,5mm con una longitud de 5cm). Con estas muestras se realizó el análisis de la cinética del secado, el consumo energético y una caracterización física, química y sensorial de las muestras. Los resultados obtenidos demostraron que es técnicamente factible secar yerba mate mediante horno microondas, requiriendo una energía por kilogramo de yerba mate seca de 3,673 kWh/kg. Además, este tratamiento no implica un producto diferente al del proceso tradicional.

Otro trabajo realizado sobre la implementación de ondas de alta frecuencia en el uso del zapecado y secado industrial es el realizado por Laube [10]. Dicho trabajo consistió en la fabricación de un prototipo de Horno Rotativo Continuo de Alta Frecuencia constituido por un módulo de 0,9m de diámetro y 1.4m de largo y 7 emisores de ondas electromagnéticas de 1000W cada uno. Ubicando 5 de estos módulos de forma continua se pudo estimar una producción de 500kg/h de yerba mate seca con un consumo energético de 47kWh. Como resultado se obtuvo que las características de la yerba mate obtenida son similares al método tradicional.

2.5. Introducción a las microondas

Las microondas son radiación electromagnética que opera en el rango de frecuencias desde los 300MHz hasta los 300GHz, es decir con una longitud de onda de 1m hasta 1mm.

El calentamiento a través de las microondas se da por varios mecanismos, de conversión de la energía. La componente eléctrica del campo electromagnético, es la responsable del calentamiento dieléctrico, que se da por dos procesos fundamentalmente la rotación dipolar y la conducción iónica.

Conducción Iónica

Como los iones poseen una carga eléctrica neta distinta de cero, frente a la presencia de un campo eléctrico, estos se aceleran chocando con otras partículas, generando fricción y calor, tal como se observa en la Fig. 2, en la columna de polarización espacial. Como el campo eléctrico varía con alta frecuencia, las partículas se aceleran hacia una dirección y luego en la dirección opuesta, varias veces por segundo [12].

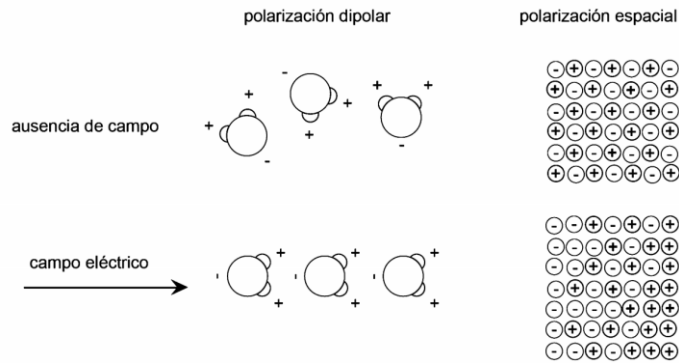


Fig. 2. Rotación dieléctrica (polarización dipolar) y Conducción iónica (polarización espacial) [13]

Rotación Dipolar

Las moléculas que poseen un centro de carga que es asimétrico, tal como lo es el agua, entre otras moléculas, están orientadas de manera aleatoria, pero cuando existe un campo eléctrico, estas se alinean con el campo. esto se observa en la Fig. 1 en la columna de polarización dipolar. Como el campo es variable, esta rotación se produce varias veces por segundo [12].

La ecuación de potencia por unidad de volumen generada en forma de calor, es:

$$P_v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot E^2 \quad (1)$$

Donde: f es la frecuencia del campo electromagnético, ϵ_0 es la permitividad del vacío, ϵ'' es el factor de pérdidas del material a calentar, y E es el valor eficaz de la intensidad de campo eléctrico.

2.5.1. Aplicaciones Industriales

Las frecuencias utilizadas para el calentamiento industrial o comercial están restringidas por normativas, para que no existan interferencias con señales de radio, telefonía, etc. Debido a esto comercialmente se utiliza la frecuencia de 2450MHz (Hornos de microondas domésticos) y para uso industrial se utiliza una frecuencia de 915MHz.

Al calentamiento por microondas se lo denomina “calentamiento volumétrico”, esto es debido a que el calor es generado por el mismo cuerpo al cual se desea calentar, por la interacción del cuerpo con las ondas de alta frecuencia. A diferencia del calentamiento convencional, donde el mecanismo de calentamiento es la transferencia de calor hacia el cuerpo.

Las aplicaciones industriales más comunes para esta tecnología son, para el secado de la madera, en la fabricación de madera contrachapada. Otras industrias como la textil, papelera, agrícola, farmacéutica, cerámica, fundición, carbón [13]. En la industria alimenticia, se utiliza para el secado de pastas, cebollas, algas marinas, papas fritas, concentrados de jugo de frutas, etc. [13].

2.5.2. Ventajas e inconvenientes

El rápido calentamiento comparado con el proceso tradicional, ya que no depende de la transferencia de calor por convección o conducción.

La eficiencia de la conversión de la energía es mejor, ya que no se tiene que calentar un horno, paredes, etc. con sus respectivas piezas, al contrario, se calienta únicamente el cuerpo que se desea. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no todos los materiales se pueden calentar.

El calentamiento se puede realizar a materiales heterogéneos calentando solo las partes de interés. Esto a su vez puede ser una desventaja a la hora de tener un material heterogéneo en composición, pero se requiere que el calentamiento sea homogéneo, habiendo problemas de puntos o lugares de alto calentamiento y otros lugares fríos.

El control sobre el proceso de calentamiento es más efectivo y rápido ya que por su naturaleza se puede controlar su encendido, apagado y además la potencia de emisión. Teniendo en cuenta que el uso de la energía eléctrica como fuente, que puede ser, potencialmente no contaminante.

2.5.3. Reglamentación sobre las bandas de frecuencia

El ente nacional de comunicaciones (ENACOM) [14], define a las bandas de frecuencia en las que se permite la operación de dispositivos sin una autorización individual de cada estación tal que asegure la asignación de una frecuencia o canal para uso exclusivo de la misma. El reglamento de radiocomunicaciones internacionales de la unión internacional de telecomunicaciones (ITU) destina a nivel mundial a las bandas para uso primario para las aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM). En el capítulo dos del reglamento de radiocomunicaciones (International Telecommunication Union (ITU), [15] el artículo 5.150 especifica las bandas de frecuencia que se destinan para aplicaciones industriales, científicas y médicas.

3. Resultados Iniciales

3.1. Energía necesaria

La energía que se requiere durante el proceso es utilizada para calentar el material y para evaporar el agua contenida en la misma. Esta energía 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).

Passardi [5], realiza el zapeado y secado de la YM por medio de un microondas de uso doméstico operando a 2450 MHz, con una potencia de consumo de 1200 W y una potencia radiada de 700 W. En estos ensayos se determinó la cinética de secado, de palos, hojas y ramas de yerba mate. Además, realizó un análisis del consumo energético del mismo, obteniendo así una estimación de la energía requerida para realizar el zapeado y secado del producto, la cual es de 2083 kJ/kg HV. Dentro de los resultados de la cinética del secado de las ramas de YM, obtuvo la variación de la temperatura de la rama en función del tiempo dentro del horno de microondas, tal como se observa en la Fig. 3.

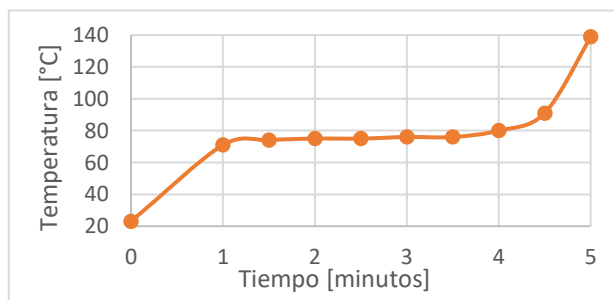


Fig. 3. Variación de temperatura en función del tiempo de secado, según [5].

Laube [10], construyo un prototipo de zapecador rotativo compuesto por 5 módulos de 7 emisores de onda electromagnética de 1000W cada uno, mediante el cual pudo determinar un consumo eléctrico de 376 kJ/kg HV, es decir un valor sustancialmente inferior a Passardi [5], y sin tener en cuenta el rendimiento asociado al magnetron y a la transferencia de la energía radiada al producto, los cuales harían, que la energía de calentamiento sea inclusive menor al valor de 376 kJ/kg HV.

En vista de esta notable diferencia, se procedió a calcular el calor teórico necesario para extraer el agua de la hoja. El calor latente del agua libre dentro de la rama, se estima que se encuentra a una presión distinta a la atmosférica, ya que al secar la hoja con microondas ocurre lo descrito en la Fig. 3, donde se observa que la temperatura se mantiene constante entorno a los 80°C, por aproximadamente 3 minutos. El calor latente del agua para una temperatura de saturación de 80°C es de 2308 kJ/kg. A su vez se estima un aporte de energía en la primera zona de la Fig. 3, para incrementar su temperatura. Se considera un calor específico igual al del agua en estado líquido debido a que al comienzo del calentamiento este es el componente principal del palo y sobre todo de la hoja [7]. Con esta estimación se llega al valor de 1661kJ/kg HV presentado en la Tabla 3. En vista de estos resultados, para los cálculos energéticos se utiliza el valor de energía dado por Passardi, debido a su menor diferencia con el valor teórico determinado anteriormente, y no se tiene en cuenta el valor hallado por Laube.

Tabla 3. Determinación teórica de la energía específica para el secado

Energía Necesaria Teórica	
CP Rama estimada [kJ/(kg HV°C)]	2,718
Variación de temperatura de la rama [°C]	60
Calor latente de vaporización [kJ/kg] (80°C)	2308
Energía requerida para [kJ/kg HV]	1661

HV: Hoja Verde

En el próximo paso se determina el flujo masico del producto a secar, estando relacionado con la potencia del emisor de ondas y la energía necesaria, tal como se muestra en la ecuación (2).

$$\dot{m}_{YM} = \frac{P}{E} \quad (2)$$

donde: $\dot{m}_{YM}$ es el flujo masico de material a secar en, P es la potencia en el material a secar, y E es la energía específica para secar el producto.

Debido al carácter de prototipo del proyecto, se opta por un magnetron de microondas domestico de 2450MHz y una potencia de 800W, obteniendo un flujo masico en el horno de 1,38 kg HV/h.

3.2. Determinación del campo eléctrico

El campo eléctrico es producido por las ondas electromagnéticas que llegan al recinto donde se produce el calentamiento del producto, esto ocurre debido a la interacción de las moléculas polares del material con el campo eléctrico y su variación en función del tiempo. Es necesario lograr una uniformidad en el valor de campo eléctrico en la cavidad descrita, a fin de lograr un calentamiento uniforme [16].

El campo eléctrico necesario se determina según la ecuación (1) descrita en la sección 2.5 la cual especifica numéricamente el campo eléctrico en el interior del material [12].

Las propiedades dieléctricas o permitividad del material determinan el comportamiento del mismo frente a la energía electromagnética a la que es sometida. Su valor, se expresa con un número complejo que posee una parte real denominada permitividad relativa al vacío ϵ' , y una parte imaginaria ϵ'' , que es el factor de pérdida. Este último, es el que determina el grado de interacción del material con el campo eléctrico y por lo tanto cuantifica la capacidad de calentarse a través del mismo.

Siguiendo la metodología expresada en el trabajo de Matzler [17], se calculó la permitividad para las ramas de yerba mate obteniendo un valor de: 6,18 - j2,18.

El volumen de material se determina con el flujo masico ya calculado. La densidad del producto, se extrae de una medición de las ramas de YM en las mismas condiciones con las que entra el material al horno de microondas. Esta medición arroja una densidad de 38 kg HV/m³. Considerando un tiempo de secado de la YM de 30 minutos, según Laube [10], se puede así determinar el volumen del producto, tal como se observa en la ecuación (3).

$$V = \dot{m}_{YM} \cdot \frac{t}{\rho_{YM}} = 0,0182 \text{ m}^3 \quad (3)$$

donde: V es el volumen de producto, t es el tiempo de secado y ρ_{YM} es la densidad de las ramas de YM.

Con los datos antes mencionados se procede a determinar el valor del campo eléctrico, tal como se observa en la ecuación (4).

$$E = \sqrt{\frac{P}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon'' \cdot V}} = 384 \frac{V}{m} \quad (4)$$

3.3. Diseño de la cavidad

La cavidad es donde se realiza el proceso de zapeado y secado del producto a través de las ondas electromagnéticas. En este caso el proceso será de tipo continuo por lo que la cavidad debe ser abierta en dos lugares para poder realizar el ingreso y egreso del material. El material 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.

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 y su densidad. Utilizando la ecuación (5)), se determina la longitud del horno. El flujo volumétrico está definido por el área transversal de ingreso del producto multiplicado por la longitud de de la cinta sobre el tiempo de recorrido del producto. Denominandose a esto ultimo velocidad de la cinta(5).

$$\dot{m}_{YM} = \dot{V} \cdot \rho_{YM} = (Ancho \cdot Alto) \cdot \left(\frac{l}{t}\right) \cdot \rho_{YM} \quad (5)$$

donde: *Ancho* es el ancho del área transversal del material que ingresa al horno, *Alto* es el espesor de la capa de ramas de YM que ingresan al horno microondas, l es la longitud del horno y ρ_{YM} es la densidad de las ramas de YM.

Como punto de partida se define la altura de producto limitada por el aplastamiento y por la capacidad del aire para atravesar la capa de material y llevarse el vapor de agua. Teniendo en cuenta que la medición de densidad se realizó para un espesor de material de 0,2m a 0,3m se adopta 0,15m

como altura de producto, definiendo 0,3m de ancho de cinta como valor fácilmente obtenible por cualquier cinta transportadora. El tiempo de permanencia del producto fue determinado en base a los ensayos realizados por Laube [10]. Los valores hallados se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Principales dimensiones de la cavidad y parámetros del proceso

Parámetros principales de la cavidad y del proceso	
Densidad Yerba mate HV [kg HV/m³]	38
Espesor de YM verde [m]	0,15
Ancho cinta [m]	0,3
Largo cinta [m]	0,4
velocidad cinta [mm/min]	13,48
tiempo [min]	30

Las cavidades multimodo son las más comunes para el calentamiento por microondas, debido a que la construcción es relativamente sencilla. Posee una capacidad amplia para procesar distintos productos, ya sea con variación de tamaño como de propiedades eléctricas [16].

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

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} cada uno teniendo una longitud de onda diferente. Cada una resuena cuando la longitud del horno es de $p.\lambda_g/2$ 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 [16]. Por definición, una cavidad multimodo debe tener muchos modos resonantes en la vecindad de la frecuencia de operación del generador [16]. 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 $m < 2.a/\lambda_0$, $n < 2.b/\lambda_0$ y $p < 2.l/\lambda_0$. En la Fig. 4, se pueden observar las dimensiones de la cavidad (a, b, l).

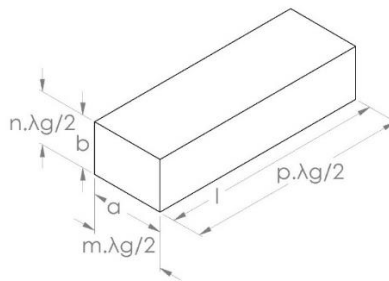


Fig. 4. Dimensiones genéricas de la cavidad resonante

La ecuación (6) representa la frecuencia de resonancia para cada modo, teniendo las dimensiones de la cavidad. 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.

$$f_r = \frac{C}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{l}\right)^2} \quad (6)$$

donde: f_r es la frecuencia de resonancia, C es la velocidad de la luz en el vacío.

La determinación del número de modos que cae dentro del rango de frecuencia de trabajo se calcula con un script de MatLab ® [18]. El mismo permite ingresar un rango de dimensiones de la cavidad y la banda de frecuencias de interés para así determinar los valores de los multiplicadores de media onda. Seguidamente realiza todas las combinaciones posibles de estos para calcular todas las frecuencias de resonancia, para cada combinación de dimensiones, dentro del rango ingresado. 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. Por último, se busca maximizar la cantidad de modos buscando la combinación de las dimensiones que cumpla con este requisito.

Para este caso, el rango de dimensiones ingresado es el siguiente: ancho [480:520]mm, altura de cavidad [375:450]mm, y longitud de cavidad [404:444]mm.

Para el caso del ancho de la cavidad, se considera un ancho ideal del producto de 0,3m al cual se le adicionan 0,05m por cada lado, ya que el producto es irregular. Según Meredith [16], al ancho de la cinta de 0,4m se le adiciona entre un 20% y 30% más, para así obtener el ancho de la cavidad. El alto de la cavidad da una relación entre el volumen total y el volumen del producto estando esa relación entre 2,5 y 3 veces, despreciando el ancho adicional de la cavidad. La longitud de la cavidad se consideró entre la teórica determinada por la ecuación (5) y un 10% más de este mismo.

Los resultados que arroja el MatLab ® [18], son 49 modos para el juego de dimensiones $a = 504mm$, $b = 437mm$, $l = 437mm$.

3.4. Verificación campo eléctrico mediante software de simulación

Una vez obtenido el valor de campo eléctrico en el interior del producto, se realiza la simulación de la cavidad. También, se comprueba que los valores de campo eléctrico no superen la tensión de ruptura del dieléctrico del aire, como menciona Meredith [16].

El método de simulación propuesto para resolver las ecuaciones diferenciales complejas de Maxwell y Fourier es el uso del software de análisis de elementos finitos COMSOL MultiPhysics 5.3a [19] que cuenta con un módulo de resolución llamado RF Module que nos permite caracterizar campos electromagnéticos para RF, microondas, y otros dispositivos de alta frecuencia.

La metodología de trabajo del software es la siguiente, según se observa en la Fig. 5.

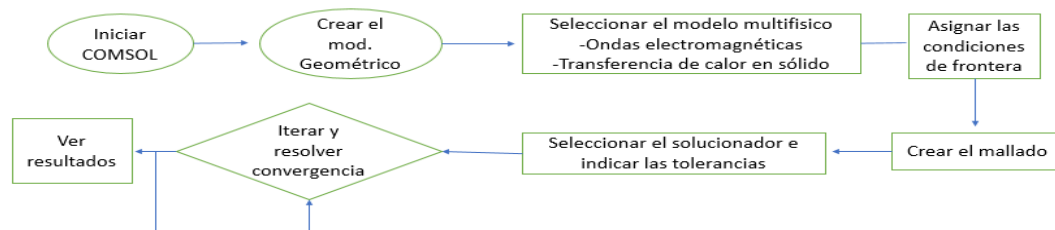


Fig. 5 Diagrama de flujo: metodología para simular mediante software [20]

Al iniciar el programa se seleccionan las físicas de trabajo, en este caso se realiza la selección del modulo RF, el cual considera las ecuaciones de Maxwell y Fourier de forma conjunta. La ecuación de Maxwell, expresada en el dominio de la frecuencia se representa con la forma que se observa en la ecuación (7) donde (∇) es el operador nabla divergencia, E el campo eléctrico para una frecuencia de operación de 2450MHz. Los otros parámetros de la ecuación son propiedades del material, donde μ_R es la permeabilidad relativa, ϵ_r es la permitividad relativa y σ es la conductividad eléctrica.

$$\nabla \cdot (\mu_R^{-1} \nabla \times E) - \frac{\omega^2}{C_0^2} \cdot \left(\epsilon_r - \frac{i \cdot \sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \cdot E = 0 \quad (7)$$

Una vez establecidas las físicas de la simulación, se procede a crear el modelo geométrico y definir las entidades que lo componen, permitiendo la asignación de condiciones de frontera y materiales de cada entidad.

Definidos los parámetros del sistema y sus condiciones de frontera, se procede a crear la malla según criterios establecidos por la propia física del programa determinada al inicio. Una vez creada la malla se procede a realizar el cálculo según métodos de elementos finitos (MEF) y representarlos en gráficos 3D o según se considere idóneo para cada aplicación.

Para resolver el modelo planteado se representa un modelo geométrico simplificado del horno, que se observa en la Fig. 6, donde se observa una flecha que indica el sentido de flujo de la yerba mate.

Para ejecutar la simulación, se considera al sistema como estático, debido al carácter de régimen permanente que presenta el mismo, pudiendo así evaluar la distribución del campo eléctrico según la disposición de emisores de onda con una potencia de 800W.

El resultado obtenido se presenta en la Fig. 7, donde se observa que, para la imagen izquierda, la disposición de emisor de onda simulado genera zonas en las cuales el campo eléctrico excede el valor requerido para realizar el zapecado. El valor de campo eléctrico uniforme requerido es de 380V/m mientras que los resultados expuestos presentan un valor de campo eléctrico de aproximadamente 700V/m en la superficie, mientras que a 10cm de profundidad (imagen derecha, Fig. 7) el mismo disminuye a valores medios de 50V/m.

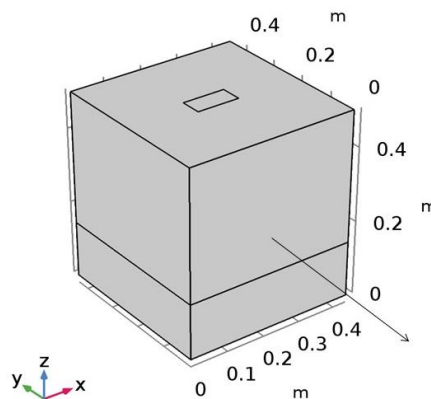


Fig. 6. Modelo de cavidad a simular

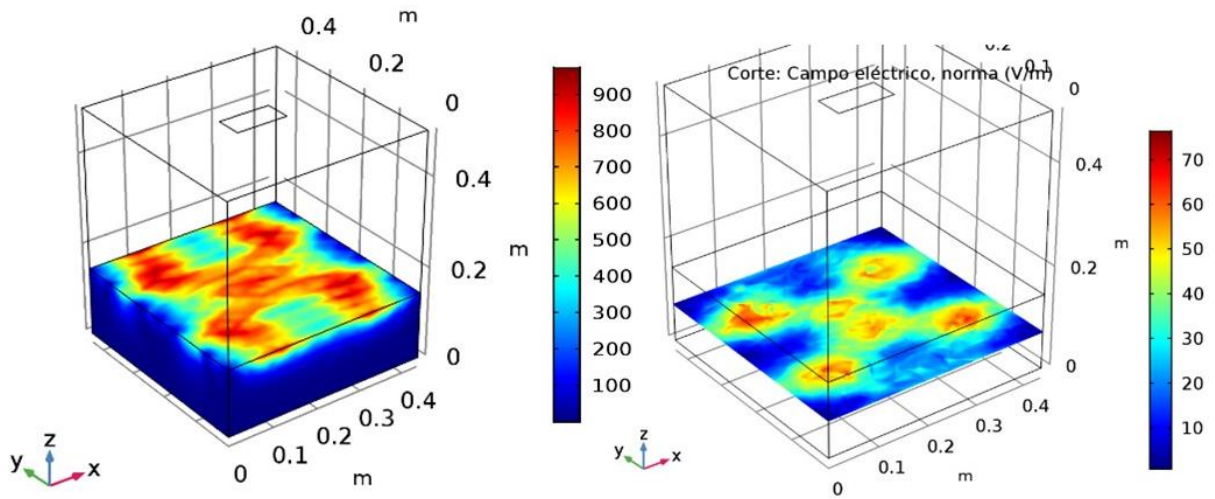


Fig. 7. Campo eléctrico: sobre el producto a secar (Izquierda), a 10cm de profundidad del material (derecha)

4. Conclusiones

Según lo relevado en cuanto a normativas de alimentación se observa que el método tradicional de zapeado y secado de yerba mate, expone la rama al contacto directo con humos y llama, lo que genera que el producto exceda el contenido de HAP exigido por la unión europea. Esto restringe la exportación del producto a la UE lo cual trae consecuencias económicas importantes para el mercado.

En base a estudios de distintos autores sobre métodos de zapeado alternativo, se comprobó que es factible realizar tanto el zapeado como el secado de la yerba mate mediante microondas, manteniendo intactas las propiedades organolépticas obtenidas mediante el método tradicional, así como también cumpliendo con los valores mínimos de HAP requeridos por las normas. Además, existen varias aplicaciones de microondas para el secado de productos alimenticios, que se ejecutan en distintas partes del mundo con resultados satisfactorios, desde el punto de vista de la rapidez de secado, y la eficiencia energética.

Luego de haber planteado las ventajas de la implementación de un método alternativo de zapeado y en vistas que los resultados obtenidos por el mismo no difieren de los métodos tradicionales, se ha planteado resolver el desafío tecnológico que implica poder llevar este método a una escala industrial, para ello se busca diseñar y calcular las distintas partes y procedimientos llevados a cabo a fin de generar un proceso donde se optimicen los recursos disponibles.

Los resultados obtenidos en las simulaciones iniciales presentan una distribución de campo eléctrico que no responde a las necesidades de uniformidad requeridas, por lo que es necesario evaluar otra disposición de emisores de onda para poder optimizar el aprovechamiento del campo eléctrico, y evitar posibles puntos calientes que puedan generar inconvenientes en la calidad del producto final.

Tomando esto como punto de partida, se plantea como trabajo a futuro, el diseño de una maquina a escala industrial que sea capaz de zapear y secar yerba mate mediante microondas, en la misma se incluirá una evaluación económica y ambiental. En la etapa de diseño de equipos a escala industrial, se incluirá una evaluación de la viabilidad económica y ambiental del proyecto.

5. Referencias

- [1] S. Holowaty, A. Thea, C. Alegre y M. Schmalko, «Differences in physicochemical properties of yerba mate (*Ilex Paraguariensis*) obtained using traditional and alternative manufacturing methods,» *Journal of Food Process Engineering*, 2018.
- [2] Microeconómica, Ministerio de Hacienda - Subsecretaría de Programación, «Informe de Cadenas de Valor Yerba Mate,» 2018.
- [3] LA COMISIÓN EUROPEA, «REGLAMENTO (UE) 2015/1933,» 2015.
- [4] J. C. Michalus y D. R. Rabenschlag, «Caracterización del Proceso de Elaboración Primario de Yerba Mate en Obera, Misiones».
- [5] R. L. Passardi, «Determinación de parámetros de secado de Yerba Mate mediante horno microondas,» Obera, 2004.
- [6] J. Peralta y M. Schmalko, «Modeling Heat and Mass Transfer in the Heat Treatment Step of yerba Mate Processing,» *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2007.
- [7] M. E. Schmalko, S. D. Prat Krikum y R. G. Känzig, La Yerba Mate: tecnología de la producción y propiedades, Posadas, Misiones: Editorial Universitaria, 2015.
- [8] R. Passardi, E. Schvezov, M. Schmalko y A. Gonzalez, «Drying of *Ilex paraguariensis* Saint Hilaire by Microwave,» *Drying Technology: An International Journal*, 2007.
- [9] Código Alimentario Argentino, *CAPÍTULO XV - PRODUCTOS ESTIMULANTES O FRUITIVOS*, 2018.
- [10] N. H. Laube, *Hornos rotativos continuo de alta frecuencia para zapeado y secado de yerba mate*, 2008.
- [11] G. Arndt, S. Molina y M. Mayol, «Los secaderos de yerba mate y las buenas prácticas de manufactura,» 2014.
- [12] A. S. Mujumdar, *Handbook of industrial Drying*, CRC Press, 2006.
- [13] J. Á. Menéndez y Á. H. Moreno, *Aplicaciones industriales del calentamiento con energía microondas*, Primera ed., Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi, 2017.
- [14] ENACOM, «Bandas no licenciadas,» [En línea]. Available: https://www.enacom.gob.ar/bandas-no-licenciadas_p680. [Último acceso: 15 05 2019].
- [15] International Telecommunication Union (ITU), «Reglamento de Radiocomunicaciones,» 2016.
- [16] R. Meredith, *ENGINEERS' HANDBOOK of INDUSTRIAL MICROWAVE HEATING*, London: The Institution of Electrical Engineers, 1998.
- [17] C. Matzler, «Microwave (1-100 GHz) Dielectric Model of Leaves,» 1994.
- [18] The Mathworks Inc., «Mathworks matlab,» 2018.
- [19] COMSOL Inc., «COMSOL MultiPhysics 5.3a».
- [20] L. Chen, Z. Huang, K. Wang, W. Li y S. Wang, «Simulation and validation of radio frequency heating with conveyor movement,» 2016.