

Calentador óhmico para extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas

Ohmic heater for extracting essential oils from aromatic plants

Freddy Fernando Valderrama Gutiérrez

Ingeniero Electrónico, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Colombia

Correo-e: freddy.valderrama@unad.edu.co

Resumen— La tecnología de calentamiento óhmico (OH) promete ser una alternativa eficiente comparada con los procesos clásicos de transferencia de calor. OH se caracteriza por lograr un calentamiento rápido y uniforme, esto la hace una tecnología apropiada para la industria de los alimentos. En este trabajo se muestra el diseño y construcción de una cámara de calentamiento óhmico con fines metodológicos, utilizada para la extracción de aceites esenciales de plantas aromáticas; las principales restricciones de diseño son la potencia de extracción y la capacidad volumétrica. Se proponen y analizan dos geometrías para el diseño de la cámara de calentamiento, solamente la geometría de campo eléctrico axial cumple con los requerimientos. Finalmente se reportan los resultados de un experimento de extracción de aceite esencial para verificar el funcionamiento de la cámara construida.

Palabras clave— Calentamiento óhmico, extracción de aceites esenciales, diseño de ingeniería, conductividad eléctrica.

Abstract— Ohmic heating technology (OH) promises to be an efficient alternative compared to the classic processes of heat transfer. OH is characterized by rapid and uniform heating, which makes it an appropriate technology for the food industry. This paper shows the design and construction of an ohmic heating chamber for methodological purposes, and used for the extraction of essential oils from aromatic plants; the design restrictions are mainly electrical and geometric. The main design constraints are extraction power and volumetric capacity. Two geometries are proposed and analyzed in order to design the heating chamber, only the axial electric field geometry achieves the requirements. Finally, the results of an essential oil extraction experiment are reported, in order to verify the performance of the built chamber.

Key Word —Ohmic heating, essential oils extraction, engineering design, electrical conductivity.

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento óhmico es una tecnología que aprovecha la resistividad intrínseca de los materiales para producir calor. Debido a la rapidez y uniformidad de calentamiento producida por OH, esta es una alternativa eficiente para diferentes aplicaciones, especialmente para la industria de los alimentos,

donde las tecnologías de procesamiento térmico que requieren transmisión de calor por convección pueden ser reemplazadas por OH. La investigación en el campo del calentamiento óhmico permaneció estancada desde 1960, en la década de los ochentas el Centro de Investigación y Desarrollo en Electricidad del Reino Unido retomó y mejoró esta tecnología. APV Baker Ltd. es la industria que posee la patente de uso industrial [1]. En las últimas décadas se han producido avances significativos en materiales y equipos para el calentamiento óhmico, encontrando aplicación en diferentes sectores industriales [1].

La tecnología OH consiste en hacer pasar corriente por cierto material con el fin de calentarlo [2], en principio, es posible usar cualquier forma de onda de voltaje de alimentación, específicamente, cualquier amplitud y cualquier frecuencia, sin embargo, se prefiere el uso de los voltajes comerciales sinusoidales de 110/220 V a 60Hz en Colombia; el uso de otras formas y frecuencias de onda del orden de KHz se conoce como campos eléctricos pulsantes (PEF) [3] y [4]. El principio de funcionamiento de OH es similar al de microondas solo que trabaja a bajas frecuencias [5].

Existen dos configuraciones para aprovechar las ventajas del calentamiento óhmico, seleccionar una u otra depende de la naturaleza del material a calentar, cuando este es un fluido se utiliza el calentamiento óhmico continuo, como se muestra en [1] y, cuando la muestra es sólida o es una mezcla se utiliza el calentamiento óhmico estático, como se ilustra en los trabajos [6], [7], [8] y [9]. En [10] se afirma que para el calentamiento óhmico continuo se deben realizar más investigaciones con el fin de desarrollar controles realimentados confiables, que permitan ajustar la potencia de suministro teniendo en cuenta el cambio de conductividad del material, dicho estudio también sugiere desarrollar técnicas de monitorización de la temperatura en tiempo real, para localizar puntos fríos y/o regiones sobrecalentadas durante el calentamiento óhmico. En [11] se indica que una de las ventajas notables de OH respecto a otras tecnologías, es que sus gastos de operación son bajos, ya que el 95% de la energía eléctrica que incide sobre el material se transforma en calor, comparado con microondas donde se tiene una eficiencia del 70%.

Estudios recientes como [12] y [13] muestran un gran potencial para el uso del calentamiento óhmico en el ámbito de extracción de aceites esenciales, dichos estudios hacen énfasis en el ahorro de energía comparado con otras técnicas clásicas de extracción de aceites, como son: Hidrodestilación, y destilación por arrastre de vapor. No obstante, en la mayoría de trabajos reportados en la literatura, el diseño de la cámara de calentamiento óhmico se da por hecho, es por ello que en este trabajo se describen los diferentes aspectos que se deben tener en cuenta para diseñar dicha cámara. Además de lo anterior, se debe resaltar que el diseño que se describe en este trabajo persigue también la futura implementación de técnicas de control para el proceso de extracción, esto último debido a que los aceites esenciales son materiales termolábiles, por lo tanto, la temperatura desempeña un papel muy importante en la calidad del aceite esencial obtenido [14]. Para realizar el adecuado diseño de la cámara de calentamiento óhmico se han tenido en cuenta entre otras las siguientes variables: Materiales, dimensiones mecánicas (geometría de la cámara y capacidad volumétrica), eléctricas (potencia, corriente y voltaje).

OH es conocido como calentamiento de Joule, electro-calentamiento, o calentamiento electro-conductivo. En OH se hace pasar corriente alterna a través de cierto material, con el propósito principal de calentarlo. El calentamiento se produce debido a la conductividad del material, el cual actúa como una resistencia eléctrica, la cual disipa energía en forma de calor.

La Fig.1 muestra la configuración de un calentador óhmico estático, donde: (1) es la fuente de alimentación, (2) es un amperímetro (3) es un voltímetro, (4) y (5) son los electrodos, y (6) es la cámara donde se deposita el material. Usando la configuración de la Fig. 1 es posible variar el voltaje de alimentación mediante un autotransformador que no se muestra en la figura; el lector puede encontrar una descripción de la conexión del autotransformador y su utilidad metodológica en [15].

El material que se introduce al interior de la cámara de calentamiento se comporta como una resistencia eléctrica [7]. El requisito básico para lograr calentamiento es que la conductividad del material no sea nula, algunos estudios experimentales respecto a la conductividad se muestran en [11] y [16]. Existen aplicaciones especiales en las que el material a calentar se debe combinar con cloruro de sodio para aumentar la conductividad total, este es el caso de interés para este trabajo, ya que las plantas aromáticas no cuentan con niveles adecuados de conductividad eléctrica, a esta aplicación se le conoce como hidrodestilación asistida por calentamiento óhmico, la cual se describe detalladamente en [9].

El resto de este trabajo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se presenta el diseño metodológico, en la sección 3 se estudian dos formas geométricas posibles para la construcción de la cámara, luego, en la sección 4 se

presentan los resultados obtenidos, la sección 5 muestra un experimento de validación, y finalmente en la sección 6 se presentan las conclusiones.

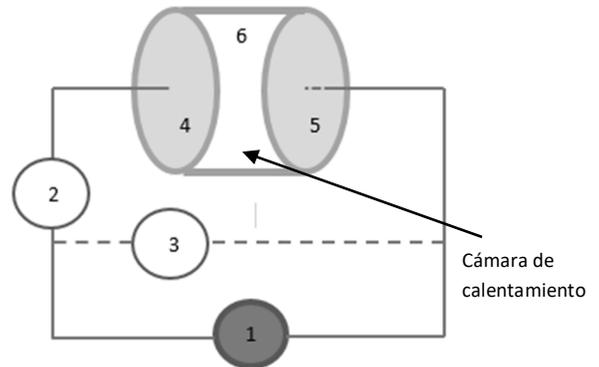


Fig 1. Configuración básica de un calentador óhmico estático.

II. DISEÑO METODOLÓGICO

Se requiere diseñar una cámara de calentamiento óhmico para pruebas de laboratorio con capacidad para 600 [mL] de agua mezclada con plantas aromáticas (*muestra*). Se dispone de una fuente de alimentación AC de 110 Vrms a 60 Hz, la cámara debe permitir la extracción del 99% del aceite esencial usando una potencia de extracción menor a la mitad de la usada en la hidrodestilación clásica, por ejemplo, en [12] se usó 1 [kW]. El diseño debe tener en cuenta la literatura e investigaciones preliminares existentes en torno al calentamiento óhmico, además, la cámara debe permitir la colocación de sensores de temperatura, para la futura implementación de sistemas de instrumentación y control, esto último debido a la termolabilidad de los aceites esenciales, propiedad que como se mencionó anteriormente indica que las temperaturas extremas pueden cambiar la composición final del aceite extraído (degradación), lo cual puede llevar a una disminución de la calidad del mismo.

A. Conductividad de la muestra

Como se mencionó anteriormente, el requisito para que un calentador óhmico funcione, es que la *muestra* presente cierto nivel de conductividad eléctrica, las plantas aromáticas por sí mismas presentan bajas conductividades. Las plantas que se van a utilizar en la cámara de calentamiento son: Eucalipto, romero, y lavanda, cuyas conductividades promedio reportadas en [17], [18] y [19] son 0.0015, 0.0019, y 0.0016 [s/m] respectivamente. La proporción entre la masa de las plantas y el volumen de agua usadas en literatura son pequeñas, por ejemplo en [9] usaron 1-20, es decir, si se tienen 100 gramos de planta, se deben usar 2000 mililitros de agua. Dicha proporción indica que la mayoría de la conductividad es aportada por el agua, la cual debe estar previamente mezclada con cloruro de sodio, estudios previos

recomiendan usar una solución de agua destilada con cloruro de sodio al 1%, cuya conductividad a temperatura ambiente es aproximadamente de 1 [S/m], este valor se estima teniendo en cuenta que en [20] se reporta que la conductividad del agua de mar es cercana 5[S/m] y la concentración de sal en el agua de mar es cercana al 3,5%.

III. ESTUDIO DE LA FORMA DE LA CÁMARA

Por facilidad de construcción y disponibilidad de materiales, se consideran dos formas diferentes para la construcción de la cámara de calentamiento: (i) Cilíndrica con campo eléctrico axial (ii) Cilíndrica con campo eléctrico radial. Su descripción se presenta en las siguientes partes de este documento.

A. Cámara cilíndrica con campo eléctrico axial.

Aunque esta geometría es la más empleada en la literatura los autores no han sustentado su selección. Consiste en una cavidad cilíndrica en donde se alberga el material y los electrodos son colocados en los extremos (A y B), tal y como se observa en la Fig. 2.

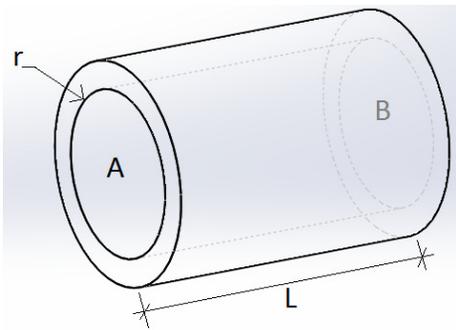


Fig 2. Configuración cilíndrica con campo eléctrico axial.

La cámara cilíndrica de la Fig.2 debe ser fabricada con un material aislante eléctrico y aislante térmico, esto último para evitar pérdidas de energía. Considerando que el material a calentar (Mezcla: agua y plantas) ocupa la totalidad de la cámara, es bien sabido que la resistencia eléctrica vista entre los puntos A y B se puede calcular como:

$$R_{ax} = \frac{L}{\sigma A_r} \quad (1)$$

Donde L es la distancia entre los electrodos, σ es la conductividad de la muestra y, A_r es el área de cada electrodo, la cual se puede calcular mediante:

$$A_r = \pi r^2 \quad (2)$$

1) Variables de decisión y restricciones:

De (1) y (2) se observa que las variables de decisión son la longitud de la cámara y el área del electrodo. La capacidad solicitada es 600 [mL] de muestra, esta restricción permite seleccionar la distancia entre electrodos (L) y el área de los mismos (A_r). Por lo tanto, se debe cumplir que:

$$0.0006 = LA_r \quad (3)$$

Dado que solo una restricción no basta para elegir las dos variables de diseño, y debido a que no hay más restricciones geométricas, es necesario plantear una restricción eléctrica que nos permita determinar las dos variables de decisión. Datos previos reportados en [9] indican que para un proceso clásico de hidrodestilación, se usa un calentador eléctrico de 1000 [W] durante una hora y media (tiempo total de extracción) para extraer el aceite esencial de una muestra de 600 [mL]. Lo anterior, junto con las restricciones del planteamiento del problema descritas en la sección previa, permiten plantear que la potencia la cámara de calentamiento óhmico debe ser máximo de 500 [W], para el diseño hemos usado 250 [W]. Se sabe que el voltaje de alimentación es de 110 [V], lo cual lleva a que la corriente máxima está dada por:

$$I_{max} = \frac{250}{110} = 2,27 [A] \quad (4)$$

Es bien conocido que en un circuito resistivo la potencia disipada es $P = I^2 R$, lo cual junto con la ecuación (1) llevan a la siguiente restricción:

$$P = 250 = I^2 R_{ax} = 2.27^2 \frac{L}{\sigma A_r} \quad (5)$$

Nótese que si la conductividad σ es conocida, las restricciones (3) y (5) permiten determinar directamente el valor de las variables de diseño (A_r y L).

B. Cámara cilíndrica con campo eléctrico radial.

Esta forma de la cámara se empleó en el trabajo [21], sin embargo, no reportan el proceso de diseño, dicho trabajo se limita a estudiar la optimización experimental de la extracción mediante la variación de parámetros eléctricos.

Como se muestra en la Fig. 3, la cámara consiste en una cavidad tubular en donde se alberga el material. El electrodo externo es un tubo de radio interno r_a y, el cilindro interno que también cumple la función de electrodo tiene un radio r_b .

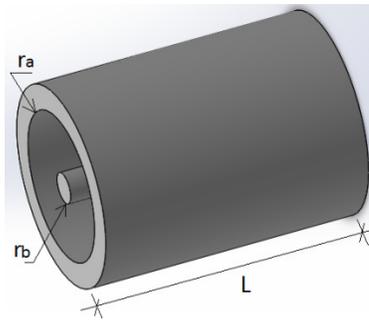


Fig 3. Configuración cilíndrica con campo eléctrico radial.

Es evidente que el material para construir ambos cilindros de la cámara de la Fig.3 debe ser un buen conductor eléctrico, esto implicaría usar una chaqueta exterior para evitar pérdidas térmicas. Realizando un análisis similar al presentado para la cámara de campo eléctrico axial, se puede plantear que la resistencia eléctrica asociada a la muestra es:

$$R_{rad} = \frac{\ln(r_a/r_b)}{2\pi\sigma L} \quad (6)$$

1) Variables de decisión y restricciones:

En este caso son tres las variables de decisión, los radios r_a y r_b y el largo de la cámara (L). También es claro que una restricción de desigualdad debe ser

$$r_a > r_b \quad (7)$$

Al igual que en el caso anterior, el volumen de muestra que se debe albergar es 600 [mL], en este caso de acuerdo con la geometría, la restricción se plantea de la siguiente manera

$$0.0006 = L\pi(r_a^2 - r_b^2) \quad (8)$$

Si se usa la misma limitación de potencia y corriente máxima asociada a la cámara de campo eléctrico axial, entonces se puede plantear que

$$P = 250 = I^2 R_{rad} = 2.27^2 \frac{\ln(r_a/r_b)}{2\pi\sigma L} \quad (9)$$

En este caso existen 3 variables de decisión, dos restricciones de igualdad y una desigualdad, el diseño se puede lograr asumiendo conocido uno de los radios. En la siguiente sección se asumen valores para el radio interno r_b .

2) Efecto de la temperatura sobre la conductividad

Nótese que las ecuaciones (5) y (9) dependen de la conductividad (σ) de la muestra. Es bien conocido que la conductividad depende de la temperatura, específicamente, la conductividad incrementa con el aumento de la temperatura. Para fines de diseño, la mayor conductividad se alcanzaría a

temperatura de ebullición, este valor junto con el conjunto de restricciones mencionadas en la sección anterior, permitirían hallar las dimensiones de la cámara, sin embargo, en la literatura no se encuentran datos de conductividad exactos, por lo tanto, para decidir cuál es la forma ideal de la cámara y sus respectivas medidas se usa la información reportada previamente en este documento, en la sección *conductividad de la muestra*. La conductividad esperada de la muestra a temperatura ambiente es de 1 [s/m], se estima que la conductividad aumente al menos 2 veces al llegar a temperatura de ebullición, lo cual implica una conductividad de diseño de 2 [s/m]. Nótese que, si en la práctica dicha conductividad aumenta más de lo esperado, esto provocará mayor consumo de potencia y a su vez una mayor disipación de calor, lo cual contribuye a un calentamiento más rápido de la muestra.

IV. RESULTADOS OBTENIDOS

En la Tabla 1 se reportan los resultados de diseño obtenidos para las cámaras de campo axial y radial, en cuanto a esta última se asumieron 3 casos, y luego se usaron las ecuaciones (8) y (9) para el diseño.

Diseño	Dimensiones
Cámara 1: Campo eléctrico axial	$L = 24.8 [cm]$ $r = 2.8 [cm]$
Cámara 2: Campo eléctrico radial $r_b = 0.2 [cm]$	$r_a = 16.3 [cm]$ $L = 0.7 [cm]$
Cámara 2: Campo eléctrico radial $r_b = 0.5 [cm]$	$r_a = 17 [cm]$ $L = 0.6 [cm]$
Cámara 2: Campo eléctrico radial $r_b = 1.5 [cm]$	$r_a = 19.8 [cm]$ $L = 0.4 [cm]$

Tabla 1. Dimensiones determinadas para los dos tipos de cámara.

Para el diseño de la cámara axial no hay mayor inconveniente al solucionar las ecuaciones (3) y (5), por otra parte, en cuanto a la cámara 2, se observa que en las ecuaciones (8) y (9) el despeje no es trivial, debido a esto, se decide usar un método gráfico que encuentre los valores de las variables de decisión asumiendo diferentes radios internos como se reporta en la Tabla 1. La Fig. 4 obtenida con Matlab, muestra las gráficas de las ecuaciones (8) y (9) y resalta el punto que soluciona el sistema cuando $r_b = 0.2 [cm]$.

Los resultados indican que la construcción de una cámara con campo eléctrico radial no es viable, ya que, las ecuaciones de diseño (restricciones) conllevan a una cámara muy estrecha, tan solo medio centímetro, lo cual no permitiría colocar instrumentación, ni introducir la

muestra fácilmente. Se debe notar que si el radio del electrodo externo r_a se hace más pequeño, la resistencia eléctrica asociada disminuye, lo cual aumentaría la corriente considerablemente, por ejemplo: asumiendo $r_a = 4 [cms]$ y $r_b = 1 [cms]$, la condición de volumen de la expresión (8) se satisface con $L = 12 [cms]$, por lo tanto la resistencia asociada es $0.9 [\Omega]$, lo cual lleva a que la corriente que atraviesa la cámara sea de aproximadamente $110 [A]$ rms.

Con las dimensiones de la cámara tipo 1 determinadas en la sección anterior, se procede a bosquejar la cámara mediante el software Solidworks, el diseño incluye las siguientes especificaciones:

- Dos orificios para sensores de temperatura, vapor y líquido
- Inclusión de o-rings para evitar la fuga de agua y vapor
- Orificios para cierre hermético de las tapas.

El diseño realizado en Solidworks se muestra en la Fig. 5.

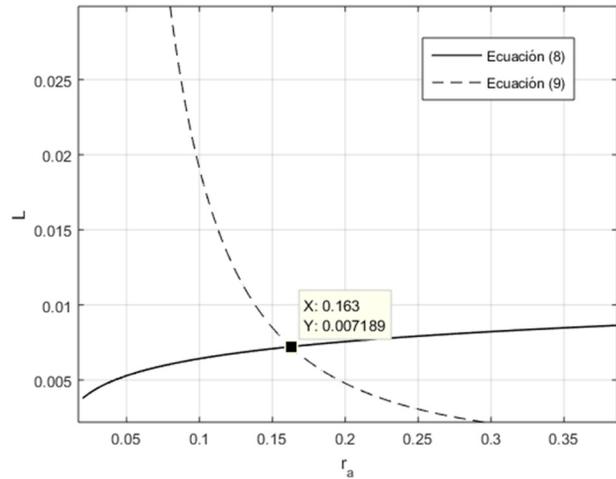


Figura 4. Solución gráfica para el diseño de la cámara 2 ($r_b = 0.2 [cm]$).

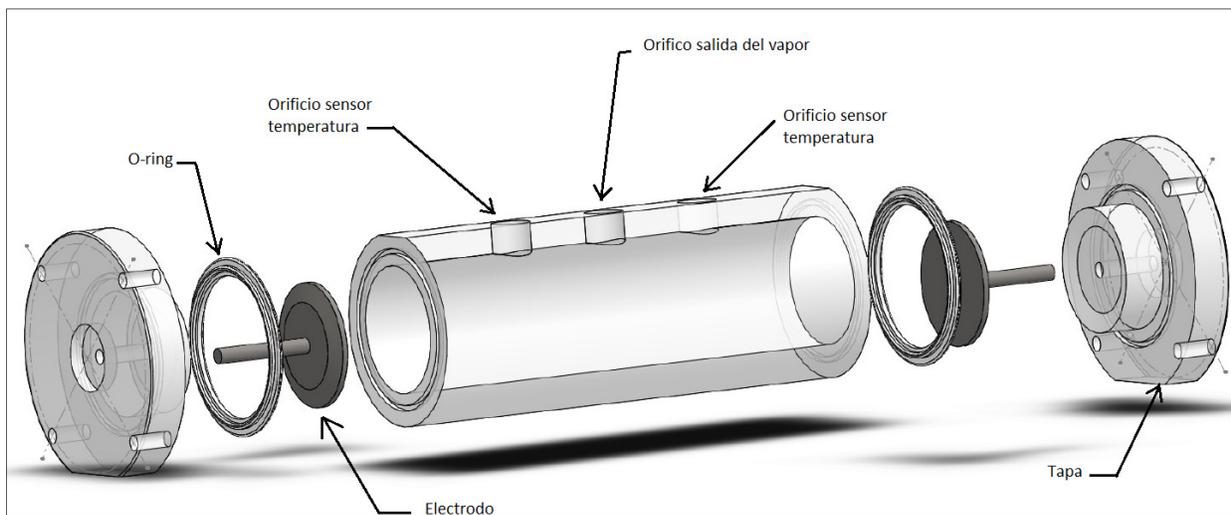


Figura 5. Despiece de la cámara de calentamiento óhmico diseñada.

Los electrodos se construyen en acero inoxidable para atenuar el problema de corrosión reportado en [22] y [23]. El recubrimiento de la cámara junto con las tapas se construye en Nylon 6, aunque lo ideal es usar teflón debido a su alta resistencia térmica, el costo del teflón supera el presupuesto. La Fig. 6 muestra la cámara construida mediante procesos de mecanizado básicos realizados en torno y fresadora.



Figura 6. Cámara de calentamiento construida.

V. EXPERIMENTO DE VALIDACION

Para revisar el funcionamiento de la cámara construida se realizan varios experimentos de extracción de aceite esencial de Eucalipto, en los cuales se mide la corriente y tensión aplicadas con el fin de verificar la potencia de extracción. El montaje realizado se observa en la Fig. 7. La temperatura es capturada mediante una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments, y un termopar tipo T.

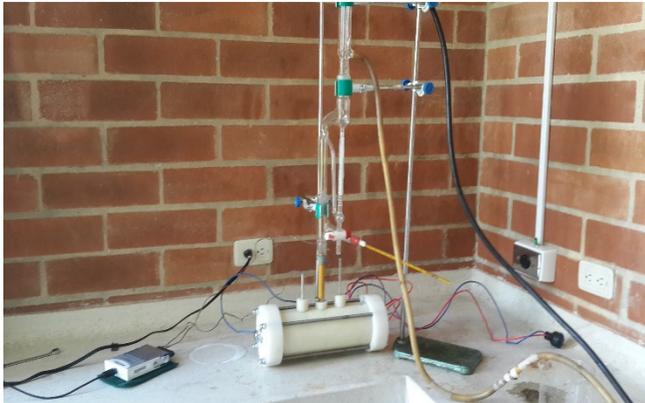


Figura 7. Hidrodestilación asistida por calentamiento óhmico

En la Fig. 8 se muestran los resultados de un experimento de extracción, donde se observa que en estado estable la corriente consumida es 3.2 [A], lo cual indica que se consume una potencia de 352 [W], debido a que la fuente de alimentación utilizada es de 110 [V]. El lector debe notar que no es posible comparar la potencia de extracción de esta cámara con las reportadas en literatura, ya que estas no necesariamente están orientadas a la extracción de aceites, lo cual implica cambio en la conductividad y a su vez en la potencia disipada, se debe resaltar también que la capacidad de la cámara también afecta la potencia disipada, lo cual tampoco permite la comparación con otras cámaras de calentamiento óhmico.

En la Fig. 8 también se observa que el rendimiento de extracción de aceite obtenido es del 6%, este valor es alto ya que según [24] el rendimiento máximo de extracción del eucalipto es 7%, la validación de este último resultado está fuera del alcance de este trabajo, se menciona solo para confirmar el funcionamiento correcto de la cámara de calentamiento diseñada.

VI. CONCLUSIONES

Se logró diseñar y construir una cámara de calentamiento para una capacidad de 600 [mL], con una potencia de extracción de 352 [W] y conectada directamente a la red eléctrica de 110 [V] a 60 [Hz].

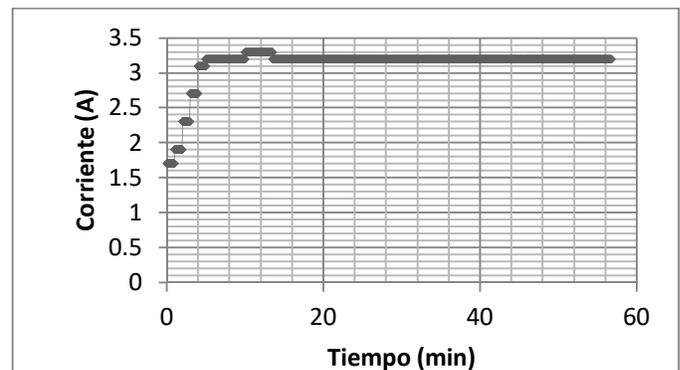
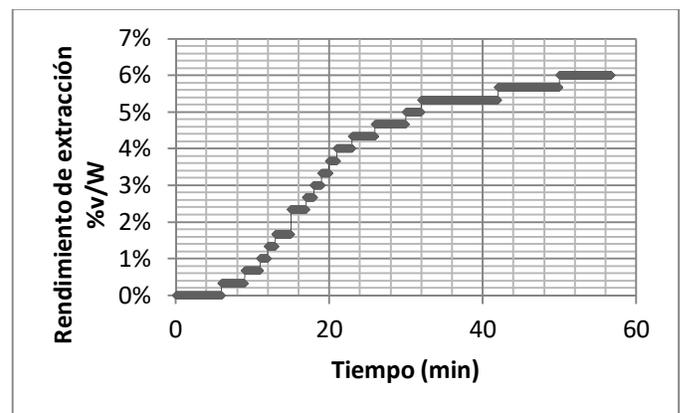
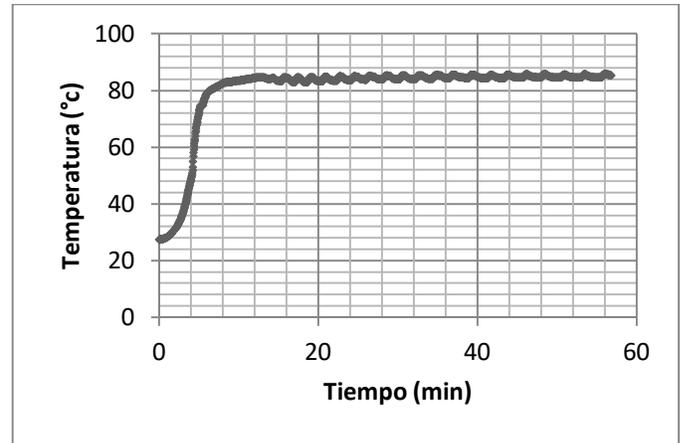


Figura 8. Resultados obtenidos en un experimento de extracción.

Aunque la intuición indica que cámaras cilíndricas con campo eléctrico radial y axial son igualmente viables, las ecuaciones de diseño y los requerimientos (voltaje de la fuente de alimentación y corriente máxima) permitieron descartar la construcción de una cámara de calentamiento con campo eléctrico radial.

La herramienta computacional (Matlab) permitió resolver el sistema de ecuaciones no lineales necesario para el diseño de la cámara de campo eléctrico radial.

La potencia utilizada para diseño difiere de la obtenida en el experimento de validación, esto se debe probablemente a que la conductividad asumida para punto de ebullición resulta mayor que la estimada, sin embargo, esta potencia de extracción es menor a la descrita en los requerimientos de diseño (500 [W]).

El experimento de validación permite verificar que la cámara tiene un adecuado funcionamiento, puesto que el rendimiento de extracción es cercano al máximo reportado en literatura.

Los futuros trabajos pretenden validar la eficiencia energética de la cámara, probar su funcionamiento para diferentes plantas aromáticas y, diseñar una tarjeta de adquisición de datos de bajo costo para la captura de datos y el control de temperatura.

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido apoyado por la Gobernación de Boyacá, mediante la convocatoria 733 de Colciencias. De la misma manera, la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) a través del grupo de investigación GIDESTEC y, bajo el desarrollo del proyecto de investigación PIE14-2016, ha permitido el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] F. Icier, *Chapter 11 - Ohmic Heating of Fluid Foods*. Elsevier Inc., 2012.
- [2] C. Ruan, R. Ye, X. Chen, P. Doona, "Thermal Technologies in food processing-Ohmic Heating," in *Thermal Technologies in food processing*, Woodhead Publishing Ltd, 2001.
- [3] P. Properties, "Pulsed Ohmic Heating—A Novel Technique for Minimization of Electrochemical Reactions During Processing," *Food Eng. Phys. Prop.*, vol. 70, no. 7, pp. 223–229, 2005.
- [4] D. W. Sun, *Emerging Technologies for Food Processing*. Elsevier Science, 2005.
- [5] K. S. Varghese, M. C. Pandey, K. Radhakrishna, and A. S. Bawa, "Technology, applications and modelling of ohmic heating: a review," *J. Food Sci. Technol.*, vol. 51, no. 10, pp. 2304–2317, 2012.
- [6] M. R. Zareifard, H. S. Ramaswamy, M. Trigui, and M. Marcotte, "Ohmic heating behaviour and electrical conductivity of two-phase food systems," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 45–55, 2003.
- [7] F. Marra, M. Zell, J. G. Lyng, D. J. Morgan, and D. A. Cronin, "Analysis of heat transfer during ohmic processing of a solid food," *J. Food Eng.*, vol. 91, no. 1, pp. 56–63, 2009.
- [8] T. Gally, O. Rouaud, V. Jury, and A. Le-Bail, "Bread baking using ohmic heating technology; a comprehensive study based on experiments and modelling," *J. Food Eng.*, vol. 190, pp. 176–184, 2016.
- [9] M. Seidi and M. Niakousari, "Impact of ohmic-assisted hydrodistillation on kinetics data, physicochemical and biological properties of Prangos ferulacea Lindle. essential oil: Comparison with conventional hydrodistillation," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 33, pp. 387–396, 2016.
- [10] M. Sakr and S. Liu, "A comprehensive review on applications of ohmic heating (OH)," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 262–269, 2014.
- [11] S. Salengke and S. K. Sastry, "Experimental investigation of ohmic heating of solid-liquid mixtures under worst-case heating scenarios.," *J. Food Eng.*, vol. 83, no. 3, pp. 324–336, 2007.
- [12] M. S. Damyeh and M. Niakousari, "Ohmic hydrodistillation, an accelerated energy-saver green process in the extraction of Pulicaria undulata essential oil," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 98, pp. 100–107, 2017.
- [13] S. Mohammad, B. Hashemi, N. Nikmaram, S. Esteghlal, A. Mousavi, M. Niakousari, F. J. Barba, S. Roohinejad, and M. Koubaa, "Efficiency of Ohmic assisted hydrodistillation for the extraction of essential oil from oregano (*Origanum vulgare* subsp. *viride*) spices," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 41, pp. 172–178, 2017.
- [14] Z. Muhammad, Z. Mohd Yusoff, M. H. Fazalul Rahiman, and M. N. Taib, "Steam temperature control for steam distillation pot using model predictive control," *2012 IEEE 8th Int. Colloq. Signal Process. its Appl.*, pp. 474–479, 2012.
- [15] J. R. Sarkis, G. D. Mercali, I. C. Tessaro, and L. D. F. Marczak, "Evaluation of key parameters during construction and operation of an ohmic heating apparatus," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 18, pp. 145–154, 2013.
- [16] S. A. Kulshrestha and S. K. Sastry, "Low-frequency dielectric changes in cellular food material from ohmic heating: Effect of end point temperature," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 257–262, 2006.
- [17] R. Mateo and F. Bosch-reig, "Classification of Spanish Unifloral Honeys by Discriminant Analysis of Electrical Conductivity, Color, Water Content, Sugars, and pH," *J. Agric. Food Chem.*, vol. 8561, no. 97, 1998.
- [18] C. S. A and J. A. S. B, "Leaf, tree and soil properties in a Eucalyptus saligna forest exhibiting canopy decline," *Cunninghamia*, vol. 9, pp. 507–520, 2006.
- [19] A. E. Hassan, K. M. Bhiah, and M. T. H. Al-zurfya, "Effect of organic extracts on the growth and flowering of marigold plants (*Calendula officinalis* L.)," *J. Org.*, vol. 1, no. 1, pp. 22–30, 2014.
- [20] "Water conductivity," *Lenntech*. [Online]. Available:

- <https://www.lenntech.com/applications/ultrapure/conductivity/water-conductivity.htm>. [Accessed: 07-Nov-2017].
- [21] M. H. H, C. M. Hasfalina, J. Hishamuddin, and Z. A. Zurina, "Optimization and Kinetics of Essential Oil Extraction from Citronella Grass by Ohmic Heated Hydro Distillation," *Int. J. Chem. Eng. Appl.*, vol. 3, no. 3, 2012.
- [22] A. Gad and S. H. Jayaram, "Effect of electric pulse parameters on releasing metallic particles from stainless steel electrodes during pef processing of milk," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1402–1409, 2014.
- [23] G. Pataro, G. M. J. Barca, R. N. Pereira, A. A. Vicente, J. A. Teixeira, and G. Ferrari, "Quantification of metal release from stainless steel electrodes during conventional and pulsed ohmic heating," *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, vol. 21, pp. 66–73, 2014.
- [24] "The essential oil company." [Online]. Available: <https://www.essentialoil.com/pages/percentage-yield>. [Accessed: 07-Nov-2017].