

# PROPIEDADES DIELECTRICAS DE ACEITES VEGETALES EN CICLOS DE TEMPERATURA

## *DIELECTRIC PROPERTIES OF VEGETABLE OILS AT TEMPERATURE CYCLES*

**Rosario Peñaloza Delgado**

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, México  
*r.penalozadelgado@inaoep.mx*

**Alonso Corona Chávez**

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, México  
*alonso corona@inaoep.mx*

**José Luis Olvera Cervantes**

Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, México  
*jollvera@inaoep.mx*

**María Elena Sosa Morales**

Universidad de Guanajuato, México  
*Mariae.sosam@gmail.com*

**Tejinder Kaur Kataria**

Universidad de Guanajuato, México  
*tejinder@ugto.mx*

**Recepción:** 29/octubre/2020

**Aceptación:** 27/noviembre/2020

### **Resumen**

En este artículo presentamos las propiedades dieléctricas de aceites vegetales durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Para el IoT (internet de las cosas), la investigación precisa de la información dieléctrica es importante para la optimización en tiempo real de procesos de control industriales, en donde los aceites vegetales pueden ser utilizados como enfriadores líquidos, aislantes dieléctricos, así como en sistemas de freído asistido por microondas. En esta investigación, presentamos la permitividad dieléctrica compleja de aceites vegetales (canola, oliva, soya, y coco) a 2.50 GHz, determinada a través de la técnica de perturbación de cavidad durante un ciclo de temperatura. Las mediciones fueron realizadas con una cavidad cilíndrica, operando en el modo TE<sub>111</sub>, con un Q descargado de 4,950. Los resultados aportan información del comportamiento de las de las propiedades

dieléctricas cuando son sometidas a un ciclo de temperatura y reflejaron curvas de histéresis durante un ciclo completo, que no han sido reportadas en trabajos previos, donde la ruta de enfriamiento es diferente a la ruta de calentamiento debido a los peróxidos en los aceites.

**Palabras Clave:** Aceites, calentamiento asistido por microondas, IoT, propiedades dieléctricas.

## **Abstract**

*In this article we present the dielectric properties of vegetable oils during heating and cooling cycles. For the IoT (internet of things), the precise investigation of dielectric information is important for the real-time optimization of industrial control processes, where vegetable oils can be used as liquid coolers, dielectric insulators, as well as in systems microwave assisted frying. In this investigation, we present the complex dielectric permittivity of vegetable oils (canola, olive, soybean, and coconut) at 2.50 GHz, determined through the cavity disturbance technique during a temperature cycle. Measurements were made with a cylindrical cavity, operating in TE111 mode, with a discharged Q of 4.950. The results provide information on the behavior of the dielectric properties when subjected to a temperature cycle and reflected hysteresis curves during a complete cycle, which have not been reported in previous works, where the cooling path is different from the cooling path. heating due to peroxides in oils.*

**Keywords:** Dielectric properties, IoT, microwave assisted heating, oils.

## **1. Introducción**

En la era del IoT (internet de las cosas), la detección de las propiedades dieléctricas de los productos es necesaria para mejorar los procesos industriales teniendo un control de calidad adecuado [Kausik, 2009]. Los aceites de origen vegetal tienen diversas aplicaciones, tales como en líquidos de enfriamiento [Totten, 1999], aislamiento dieléctrico en sistemas de potencia [Amanullah 2005], [Rafiq, 2015], así como en el calentamiento asistido por microondas [Kataria, 2017], [Venkatesh, 2004], [Salema, 2013]. Para estas aplicaciones, el conocimiento previo

de las características del producto es de gran importancia al optimizar los procesos de producción basados en IoT [Li, 2013]. En la industria alimentaria, las propiedades dieléctricas proporcionan información sobre la calidad de ciertos alimentos [Kataria, 2017], [Venkatesh, 2004]. Además, el calentamiento asistido por microondas se está convirtiendo en la norma para la pasteurización, la cocción y la desinfestación debido a sus ventajas sobre el calentamiento convencional [Salema, 2013], [Sensoy, 2013]. Por esta razón, la medición de las propiedades dieléctricas juega un papel importante en las aplicaciones industriales [Alhegazi, 2018]. En particular, los aceites vegetales son importantes en las aplicaciones de alimentos y producción de biodiesel, donde pueden ser sometidos a varios ciclos de calentamiento durante su procesamiento industrial. En la literatura, se han publicado algunos trabajos sobre las propiedades dieléctricas de los aceites. En [Campos, 2014] el aceite de castaña se mide para la producción de biodiesel. En [Faktorová, 2007], se presentan las propiedades dieléctricas de la grasa de cerdo, la mantequilla, el aceite de oliva y el aceite de girasol. Sin embargo, ninguno de estos trabajos informa el estudio del comportamiento dieléctrico durante un ciclo completo de temperatura (calentamiento-enfriamiento) desde la temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de punto de humo. En este trabajo, se presentan las propiedades dieléctricas de los aceites a diferentes ciclos de temperatura utilizando la técnica de perturbación de la cavidad en la frecuencia aprobada de calentamiento de alimentos de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) (2.5 GHz). Es importante tener en cuenta que, según el conocimiento de los autores, no existe un trabajo previo que informe las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales durante un ciclo completo de calentamiento-enfriamiento desde la temperatura ambiente hasta la temperatura del punto de humo y viceversa.

### **Propiedades dieléctricas**

La parte real de la permitividad relativa  $\epsilon_r$ , determina la capacidad de polarización del material bajo la acción de un campo externo. La permitividad relativa es una variable compleja, que se puede escribir como la ecuación 1.

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j\tan\delta) \quad (1)$$

Donde  $\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$  se denomina tangente de pérdida y representa la relación entre la parte imaginaria y real de la permitividad relativa.

La parte imaginaria de la permitividad  $\varepsilon''$ , es una medida de la disipación del medio, es decir, da una idea de la atenuación que sufre la onda que se propaga a través de él. Representa, por lo tanto, las pérdidas o la absorción del poder del material. La pérdida de potencia se produce porque, a medida que el campo se propaga a través del material, la fricción producida por las cargas internas que se mueven cuando se polariza hace que la energía electromagnética se convierta gradualmente en calor

## 2. Métodos

### Técnica de perturbación de cavidad

Las frecuencias resonantes para cavidades cilíndricas resonantes (figura 1) están dadas por la ecuación 2 [Hernandez, 2014].

$$f_1 = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu'\varepsilon'}} \sqrt{\left(\frac{\rho'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2} \quad (2)$$

Donde,  $a$  es el radio,  $d$  es la longitud,  $c$  es la velocidad de la luz  $n$ ,  $m$  y  $l$  son los subíndices de los modos de propagación,  $\mu'$  y  $\varepsilon'$  son la permeabilidad magnética del medio y la permitividad eléctrica del medio, respectivamente, y  $\rho'_{nm}$  es la raíz de la función derivada de Bessel [Hernández, 2014].

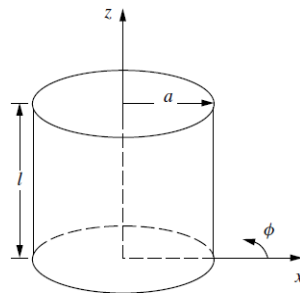


Figura 1 Cavidad cilíndrica.

Para fines de detección, el modo TE<sub>111</sub> se ha utilizado ampliamente ya que concentra el campo eléctrico máximo en el centro, donde se coloca la muestra. Para

este modo, las características de la cavidad utilizada para las mediciones son las siguientes:  $a = 4.9$  cm;  $d = 8.6$  cm con una frecuencia de resonancia de  $f_1 = 2.50$  GHz. Las expresiones definidas de la técnica de perturbación de la cavidad cilíndrica vienen dadas por las ecuaciones 3 y 4 [Hernández, 2014].

$$\frac{f_1 - f_2}{f_2} = A(\varepsilon_r' - 1) \frac{V_s}{V_c} \quad (3)$$

$$\frac{1}{Q_2} - \frac{1}{Q_1} = B\varepsilon_r'' \frac{V_s}{V_c} \quad (4)$$

Donde  $\varepsilon_r'$  es la parte real de la permitividad,  $\varepsilon_r''$  es la parte imaginaria de la permitividad,  $f_1$  y  $f_2$  son frecuencias antes y después de la perturbación,  $A$  y  $B$  son constantes de calibración.  $V_s$  es el volumen de la muestra y  $V_c$  es el volumen de la cavidad.  $Q_2$  y  $Q_1$  son factores de calidad después y antes de la perturbación, respectivamente.

Para determinar  $A$  y  $B$  no hay soluciones analíticas, por lo tanto, estas normalmente se obtienen experimentalmente utilizando muestras estándar de permitividad conocida y resolviendo las ecuaciones 3 y 4.

Para este trabajo utilizamos 4 tipos diferentes de aceites vegetales con diferentes características: aceite de oliva, aceite de soja, aceite de canola y aceite de coco. Las mediciones se realizan con un analizador de red vectorial (VNA) (FieldFox Microwave Analyzer N9918a) y una cavidad cilíndrica acoplada en el modo TE<sub>111</sub> utilizando la técnica de perturbación de la cavidad [Hernández, 2014].

### 3. Resultados

La figura 2 muestra la configuración de medición. Para la medición se utiliza un VNA Fieldfox N9918A con una frecuencia máxima de operación de 26 GHz, conectado a una cavidad cilíndrica de aluminio (figura 3).

El VNA se calibra con la calibración estándar de Open Short Load. El primer paso es calcular las constantes  $A$  y  $B$  usando las ecuaciones 3 y 4. Para ello, se requieren muestras conocidas, en nuestro caso: aceite de oliva y aceite de canola. Las características de estas muestras y constantes de calibración se ilustran en tabla 1.

Los valores promedio de constantes de calibración son:  $A = 1.2773$  y  $B = 11.3694$ .

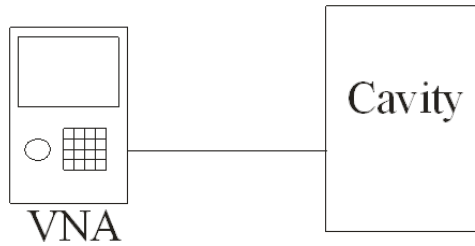


Figura 2 Arreglo experimental.



Figura 3 Fotografía de arreglo experimental.

Tabla 1 Características dieléctricas de muestras estándar y constantes de calibración.

Muestra	$f_2$ (GHz)	$\epsilon'_r, \epsilon''_r$	$Q_2$	$A$	$B$
Sin muestra	2.23(*)		4,950		
Oliva	2.121	2.98, 0.035 (Praveen, Akshit, Anuj, & Kurian, 2019)	76.80	1.297	17.47
Canola	2.119	2.5, 0.1043 (Latif et al., 2015)	76.92	1.745	5.85

El resto de las muestras se someten a un ciclo de calentamiento que se define como  $C1$ . El ciclo de calentamiento  $C1$  se divide en dos etapas. El primero se define como el aumento de la temperatura  $C1$  (T ascendente,  $C1$ ). Es decir; cuando la muestra se ha ido calentando gradualmente hasta el punto de humo. La segunda etapa, se refiere a la temperatura decreciente  $C1$  (T descendiente,  $C2$ ); es decir, cuando la muestra se enfría hasta que alcanza la temperatura ambiente. Es importante tener en cuenta que la temperatura del punto de humo depende del tipo de aceite.

Las frecuencias resonantes y los valores  $Q$  se registran aproximadamente cada 20 C para el ciclo de calentamiento, y aproximadamente cada 10 C para el ciclo de enfriamiento. Los valores  $\epsilon'_r$  y  $\epsilon''_r$  se extraen usando las ecuaciones 3 y 4.

## 4. Discusión

Las figuras 4 y 5 muestran el comportamiento de la constante dieléctrica y el factor de pérdida en función de la temperatura de las muestras de aceite para el primer ciclo de calentamiento, las curvas de color negro representan ( $T$  ascendente,  $C1$ ) y las líneas de color rojo ( $T$  descendente,  $C2$ ). En las figuras 4a y 5a, se refleja la parte real e imaginaria de la permitividad en el aceite de oliva, que varía en un rango de 2.94 a 3.07 y 0.030 a 0.050, respectivamente para el rango de temperatura de 28 a 174 °C. El valor máximo de  $\epsilon_r'$  se observa en el ciclo descendente  $C1$  con un valor de 3.0744 y un mínimo de 2.9286 en el ciclo ascendente  $C1$ . Por otro lado, las figuras 4b y 5b reflejan las partes reales e imaginarias de la permitividad cuando una muestra de aceite de canola se somete a un primer ciclo de calentamiento. Los valores reales e imaginarios varían de 2.99 a 3.12 y 0.030 a 0.060 respectivamente para todo el rango de temperatura de 28 a 178 °C.

El valor máximo de  $\epsilon_r'$  se observa en el ciclo ascendente  $C1$  con un valor de 3.1239 y un mínimo de 2.9930.

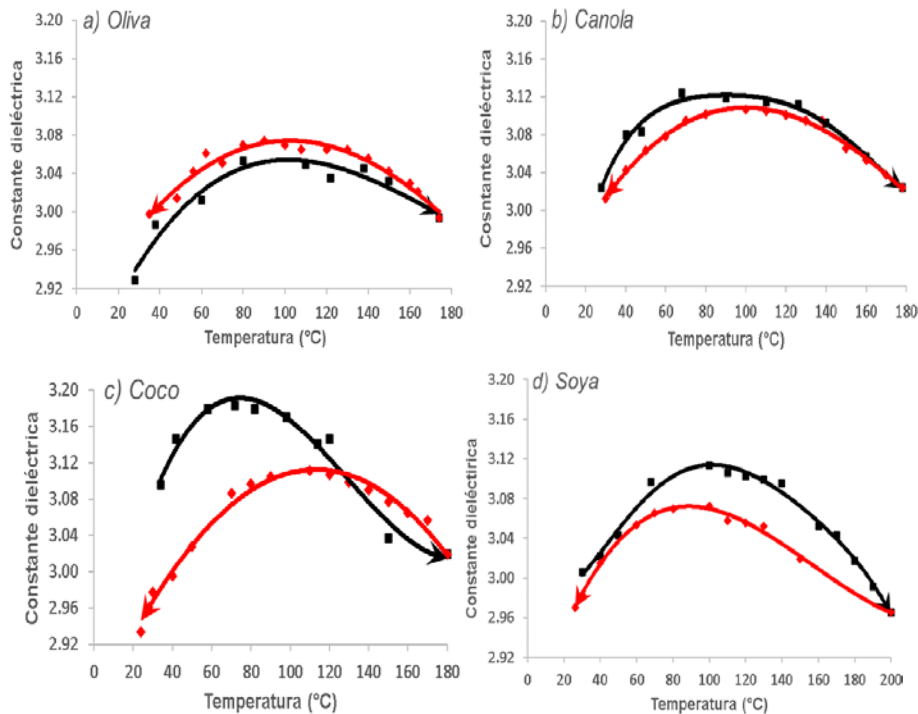


Figura 4 Constante dieléctrica vs temperatura para el primer ciclo de calentamiento.

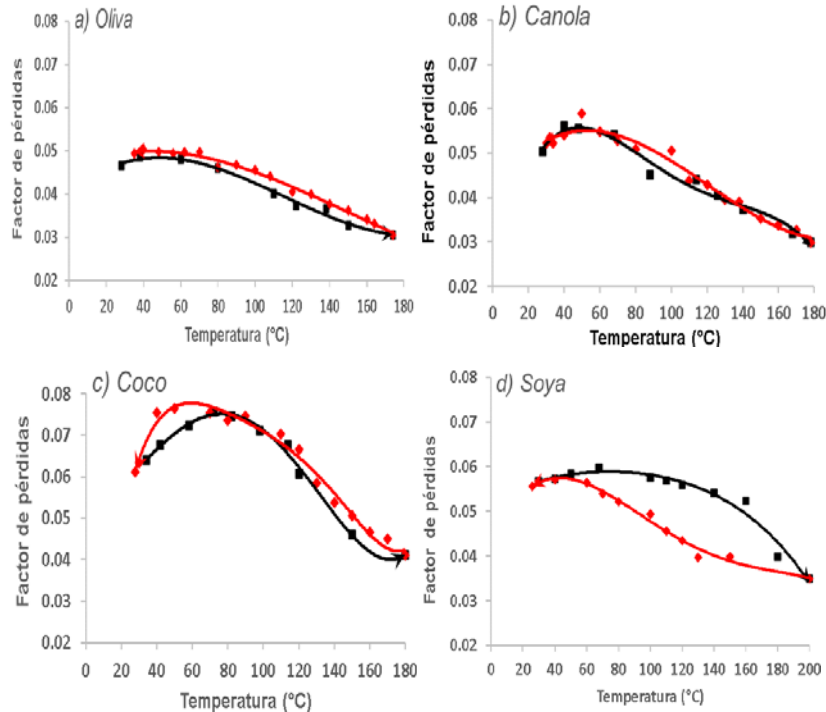


Figura 5 Factor de pérdidas vs temperatura para el primer ciclo de calentamiento

En las figuras 4c y 5c, se ilustran las partes reales e imaginarias de la permitividad en el aceite de coco, cuando la muestra se somete a un primer ciclo de calentamiento. La parte real e imaginaria varía de 2.95 a 3.20 y de 0.040 a 0.080 respectivamente para el rango de temperatura de 24 a 180 °C. El valor máximo de  $\epsilon_r'$  se observa en el ciclo C1 como 3.2039 y un mínimo de 2.9342.

Finalmente, en las figuras 4d y 5d, se muestran los cambios sufridos por las partes reales e imaginarias de la permitividad en una muestra de aceite de soya cuando se somete a un primer ciclo de calentamiento. Estos varían de 2.97 a 3.13 y 0.035 a 0.060 respectivamente para todo el rango de temperatura de 26 a 200 °C. El valor máximo de  $\epsilon_r''$  se observa en el ciclo C1 como 3.1334 y un mínimo de 2.9708.

Por otro lado, en la figura 4 se puede observar un comportamiento de U invertida que es producida por el calentamiento del aceite, donde la permitividad máxima ocurre alrededor de 72 a 100 C dependiendo del tipo de aceite. Estos cambios de temperatura pueden ser debido a los peróxidos, los cuales son especies intermedias. Estas especies intermedias son especies inestables que pueden reaccionar muy rápido frente a condiciones como temperatura y exposición de



tiempo [Hassanein, 2003]. Por esta razón, la relación entre permitividad y temperatura genera una curva de comportamiento similar a la del desarrollo de oxidación de los aceites.

Además, a partir de la pérdida dieléctrica figura 5, se puede observar que existe un comportamiento no lineal en todas las muestras. A la temperatura del punto de humo, el valor de  $\varepsilon_r''$  es más bajo que a temperatura ambiente. Sin embargo, el máximo se produce a una temperatura intermedia. Considerando la importancia de la parte imaginaria en la disipación de potencia de microondas, podemos ver que la diferencia de mínimo a máximo es bastante significativa.

Los valores de  $\varepsilon_r'$  obtenidos en aceite de soya son similares a los valores reportados en [Campos, 2014] y [Komarov, 2005] para 2.45 GHz y 1 GHz respectivamente para un rango de temperatura entre 30 y 70 °C, de estos podemos comprobar que tienen una muy buena aproximación con los medidos en la cavidad. A partir de los valores reportados para el aceite de coco en [Mohamad, 2014] para una frecuencia de 3 GHz, es posible notar una buena aproximación entre los valores reportados y experimentales a 26 °C. Algunos estudios han reportado mediciones de aceite de oliva [Faktorová, 2007] [Alhegazi, 2018]; sin embargo, se obtienen a frecuencias de 10 y 6 GHz respectivamente. De manera similar para el aceite de canola, los valores reportados en [Komarov, 2005] y [Praveen, 2019] se obtienen a temperaturas de 28 y 49 °C a frecuencias de trabajo de 1 y 15 GHz respectivamente. Debido a que las frecuencias de medición de los valores reportados son diferentes, es difícil hacer una comparación exacta con los valores obtenidos experimentalmente.

Es importante mencionar que ninguno de estos trabajos reporta el estudio del comportamiento dieléctrico durante un ciclo completo de temperatura (calentamiento-enfriamiento) desde la temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de punto de humo y en la frecuencia aprobada de calentamiento de alimentos de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) (2.5 GHz).

## **5. Conclusiones**

En este trabajo, las propiedades dieléctricas de los aceites vegetales se presentaron durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento. Esta información es

útil para sistemas de producción basados en IoT para control de calidad y calentamiento asistido por microondas, donde las principales ventajas son: que las métricas podrán ser medidos en tiempo real y de esta forma pueden ser analizados y utilizados para tomar mejores decisiones, los datos pueden ser compartidos, lo cual permite mayor interconexión en los procesos productivos dentro de las industrias. Las muestras se calentaron desde la temperatura ambiente hasta su punto de ahumado y las propiedades dieléctricas se registraron durante el ciclo de temperatura ascendente y descendente. Después de alcanzar el punto de humo, las muestras se dejaron enfriar y también se midieron las propiedades dieléctricas. A partir de aquí se observó que las muestras manifiestan un comportamiento de histéresis donde la ruta de enfriamiento es diferente a la ruta de calentamiento. Esto se debe a que los peróxidos son especies intermedias inestables que reaccionan muy rápidamente a las condiciones de temperatura y tiempo de exposición.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alhegazi A, Zakaria Z, Shairi N. A., Sutikno T., and Alahnomi R. A. Analysis and Investigation of a Novel Microwave Sensor with High Q-Factor for Oil Sensing, *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 1407–1412, 2018.
- [2] Amanullah M, Islam SM, Chami S, Ienco G. Analyses of physical characteristics of vegetable oils as an alternative source to mineral oil-based dielectric fluid. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 2005. *ICDL 2005*, pp. 397-400, Jun 26 2005.
- [3] Campos D. C., Dall'Oglio E. L., De Sousa P. T., Vasconcelos L. G., and Kuhne C. A. Investigation of dielectric properties of the reaction mixture during the acid-catalyzed transesterification of Brazil nut oil for biodiesel production, *Sci. J. Food Eng.*, vol. 117, pp. 957–965, 2014.
- [4] Faktorová D. Complex Permittivity of Biological Materials Measurement at microwave Frequencies, *Meas. Sci. Technol.*, vol. 7, no. 2, pp. 12–15, 2007.
- [5] Hassanein M. M., El-Shami S. M., & Hassan E. M. M., (2003). Changes occurring in vegetable oils composition due to microwave heating.

- International Journal of Fats and Oils, 54, 343–349.  
<https://doi.org/10.3989/gya.2003.v54.i4.219>.
- [6] Hernandez Gomez E. S., Olvera Cervantes J. L., Corona Chavez A., and Sosa Morales M. E., (2014). Development of a low-cost dielectric permittivity sensor for organic and inorganic materials in the microwave frequency range, 2014 IEEE 9th Iberoam. Congr. Sensors, pp. 1–4, 2014.
- [7] Kataria TK, Sosa Morales ME, Olvera Cervantes JL, Corona Chavez A. Dielectric properties of tequila in the microwave frequency range (0.5–20 GHz) using coaxial probe. International journal of food properties. 18;20(sup1): S377-84, 2017.
- [8] Kausik Bal, and Kothari V. K. Measurement of dielectric properties of textile materials and their applications. IJFTR vol.34(2), June 2009.
- [9] Komarov V., Wang S., & Tang J., (2005). Permittivity and measurements. In 424 Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, Kai Chang, pp. 3693–3711.
- [10] Latif S. I., Tapia D. F., Herrera D. R., Nepote M. S., Pistorius S., & Shafai L., (2015). A directional antenna in a matching liquid for microwave radar imaging. International Journal of Antennas and Propagation, 1–8.
- [11] Li Z, Liu G, Liu L, Lai X, Xu G. IoT-based tracking and tracing platform for prepackaged food supply chain. Industrial Management & Data Systems. 2017 Oct 16.M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [12] Praveen kumar, R. K. Akshit Goel, O. Anuj Kumar, and J. Jose Kurian. Dielectric characterization of common edible oils in the higher microwave, Microw. power Electromagn. energy, vol. 53, pp. 48–56, 2019.
- [13] Rafiq M, Lv YZ, Zhou Y, Ma KB, Wang W, Li CR, Wang Q. Use of vegetable oils as transformer oils—a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 52:308-24. 2015.
- [14] Salema AA, Yeow YK, Ishaque K, Ani FN, Afzal MT, Hassan A. Dielectric properties and microwave heating of oil palm biomass and biochar. Industrial Crops and Products. 2013.

- [15] Sensoy I, Sahin S, Sumnu G., (2013). Microwave frying compared with conventional frying via numerical simulation. *Food and bioprocess technology*. 2013 Jun 1;6(6):1414-9.
- [16] Totten GE, Tensi HM, Lainer K., (1999). Performance of vegetable oils as a cooling medium in comparison to a standard mineral oil. *Journal of materials engineering and performance*;8(4):409-16.
- [17] Venkatesh MS, Raghavan GS., (2004) An overview of microwave processing and dielectric properties of agri-food materials. *Biosystems Engineering*. 2004 May 1;88(1):1-8l. S. Jacobs and C. P. Bean. Fine particles, thin films and exchange anisotropy, in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350.