

ESTUDIO DE LA RESISTIVIDAD DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA SUSTANCIA COAGULANTE

RESISTIVITY STUDIES OF A COAGULATING SUBSTANCE DURING COOLING

SERGIO YÁÑEZ PAGANS, JULIANA CARRASCO MEJIA, & INDIRA OCAMPO JUSTINIANO

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

RESUMEN

El experimento consistió en caracterizar el comportamiento de la resistividad en una sustancia coagulante durante el enfriamiento de la misma. Se empleó gelatina como sustancia coagulante y mediante el arreglo de las cuatro puntas de Wenner se estudiaron las dependencias de la resistividad con la temperatura, el voltaje y la corriente eléctrica.

Código(s) PACS: 06.60.-c, 01.50.Pa

Descriptor: Procedimientos de laboratorio — Experimentos y aparatos.

ABSTRACT

This experiment was carried out to characterize the behavior of the resistivity in a coagulating substance during its cooling process. We used jelly as the coagulating substance; by means of a four-point Wenner setting we studied the resistivity dependence on temperature, voltage and electric current.

Subject headings: Laboratory procedures — Laboratory experiments and apparatus.

1. INTRODUCCIÓN

La resistividad eléctrica es una propiedad de los materiales conductores. Su valor no depende de la forma ni de la masa del cuerpo. Sino más bien, su dependencia es únicamente de las propiedades microscópicas de la sustancia de la que está hecha el cuerpo. A esta propiedad se le clasifica como intensiva. Mientras que las cantidades macroscópicas como el voltaje o la corriente son fáciles de medir existen cantidades microscópicas como la resistividad, es por esto que la medición de la misma fue de gran interés durante mucho tiempo.

En el siglo XIX Lord Kelvin inventó uno de los primeros métodos para la determinación de la resistividad de una muestra. Posteriormente, a principios del siglo XX, el método de Kelvin fue perfeccionado por el científico Frank Wenner, quien la utilizó para medir la resistividad de muestras de tierra. Actualmente, este método, también conocido como método de las cuatro puntas, es ampliamente utilizado en el campo de la geofísica para el estudio de suelos y en la industria para controlar el proceso de producción de semiconductores.

El objetivo del experimento es caracterizar el comportamiento de la resistividad de una sustancia de rápida coagulación durante su enfriamiento mediante el uso del arreglo de las cuatro puntas de Wenner, en el que se empleó gelatina común como sustancia coagulante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Dependencia de la resistividad eléctrica con la temperatura

La relación entre la temperatura y resistividad para conductores en general, es lineal en un cierto intervalo de temperatura. Para estas relaciones lineales podemos escribir una aproximación empírica, dada por la ecuación 1:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha\Delta T) \quad (1)$$

Donde ρ es la resistividad, α es el coeficiente de variación de la resistividad con la temperatura, T es la temperatura del conductor, T_0 una temperatura seleccionada de referencia (temperatura ambiente) y ρ_0 es la resistividad a la temperatura T_0 .

2.2. Arreglo de Wenner de los cuatro electrodos

El arreglo de Wenner de los cuatro electrodos (four-electrode Wenner array) se utiliza para estimar la resistividad de una muestra tridimensional grande. (Wenner 1915; Schuetze et al. 2004) El arreglo consiste en cuatro electrodos colineales, igualmente espaciados a una distancia a , los cuales deben ser sumergidos en la muestra, tal como se muestra en la figura 1. La corriente se inyecta mediante los electrodos exteriores (la cual a su vez circula a través de la muestra) y el potencial se mide entre los electrodos interiores.

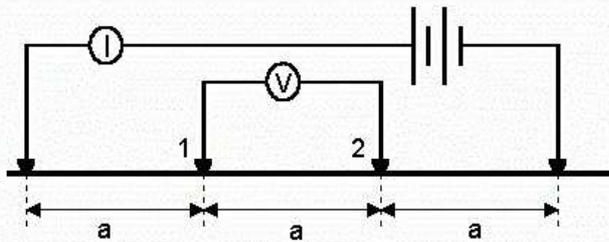


FIG. 1.— Se muestra la representación gráfica del arreglo de Wenner de cuatro electrodos.

Las ventajas del arreglo de Wenner son que la sensibilidad del instrumento no es tan crucial como en geometrías similares y que la resistividad puede calcularse directamente mediante la ecuación 5. Se necesitan pequeñas magnitudes de corriente para producir diferencias de potencial mensurables. Suponiendo que se tiene una muestra homogénea se calcula la resistividad mediante la diferencia de potencial entre los electrodos internos, aplicando la ley de Ohm a los puntos 1 y 2 (figura 1) se obtiene:

$$V_1 = \frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi(2a)} = \frac{I\rho}{4\pi a} \quad (2)$$

$$V_2 = -\frac{I\rho}{2\pi a} - \frac{I\rho}{2\pi(2a)} = -\frac{I\rho}{4\pi a} \quad (3)$$

$$V = V_1 - V_2 = \frac{I\rho}{2\pi a} \quad (4)$$

De esta manera se deduce la ecuación 5, la cual nos permite calcular la resistividad en una sustancia homogénea teniendo los valores del voltaje y la corriente:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (5)$$

2.3. Gelatina

La gelatina es un polímero o proteína natural, está formada por macromoléculas (proteínas) hidrófilas, es decir, que tienen la capacidad de retener agua. Cuando se la disuelve se convierte en lo que se conoce como una sustancia coloidal; esto significa que es una sustancia no homogénea compuesta por dos o más fases: generalmente una continua, líquida, y otra dispersa en menor cantidad en forma de partículas sólidas (proteínas reticuladas).

La heterogeneidad en la fase coloidal de la gelatina se produce debido al proceso de descomposición espínodal, en el cual la separación de fases tiene lugar de manera homogénea en todo el material.

Lo que tenemos son muchas fibras de proteínas o fibras colágenas que se unen entre sí y permanecen suspendidas en el agua. Estas fibras hidrosolubles están en constante ruptura y reformación dando a la gelatina su estructura semi-sólida. Cuando la gelatina es recalentada esta no vuelve a su estado gelificante a la misma temperatura en la que se coaguló inicialmente, esto se debe a que presenta una histéresis térmica, es decir, como si el sistema recordase sus estados estructurales previos.

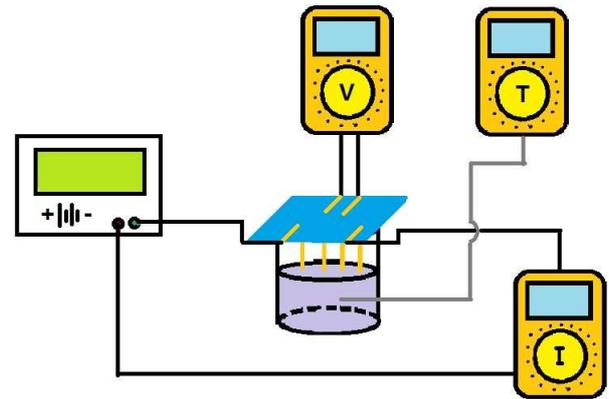


FIG. 2.— Se muestra el esquema del arreglo experimental empleado para la recolección de datos.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Se empleó una fuente eléctrica capaz de generar distintos voltajes, una resistencia de $100k\Omega$, una termocupla para tester, tres testers (para el voltaje, la corriente, y la temperatura respectivamente) una hornilla, un vaso de precipitado, distintos cables (con clavija y pinzas), gelatina sin sabor, sal, cucharilla. Primeramente se prepararon 42g de gelatina sin sabor en 500ml de agua a temperatura ambiente ($20^\circ C$), añadiendo 4g de sal para aumentar la conductividad de la misma. Tras ser disueltos se calentó la mezcla hasta una temperatura de $60^\circ C$. Simultáneamente se armó un sistema como el mostrado en la figura 2. Seguidamente, se conectó la fuente de corriente continua y el amperímetro a los electrodos externos del arreglo de Wenner (sistema inyector de corriente a la sustancia), y se conectó un voltímetro a los electrodos internos del arreglo. A continuación, se sumergieron dichos electrodos en la sustancia (gelatina) y se empleó una termocupla para el monitoreo de la temperatura media de la misma, prosiguiéndose a tomar datos de la corriente, voltaje, y temperatura en intervalos de $2^\circ C$. Se realizó este procedimiento dos veces, las cuales se denominaron serie 1 y serie 2 respectivamente.

4. ANÁLISIS DE DATOS

A partir de los datos obtenidos en el experimento se calcula la resistividad a diferentes temperaturas (diferentes estados de coagulación) mediante el método de Wenner. Se aplicó la ecuación 5 a cada par de datos de voltaje y corriente de ambas series, de esta manera se obtuvo la figura 3, se observa en ésta el comportamiento de la resistividad en función de la temperatura (para las series 1 y 2), el cual a su vez se divide en tres regiones (I, II y III). En las regiones I y III no se aprecian cambios significativos en la resistividad, ya que en estas regiones predominan las fases líquida y sólida respectivamente. Por otro lado en la región II existe un aumento de la resistividad para un mayor grado de coagulación (temperaturas más bajas), nótese que en los intervalos de temperaturas de $28^\circ C$ a $38^\circ C$ (serie 1) y $29^\circ C$ a $40^\circ C$ (serie 2) se observan aumentos bruscos de la resistividad en función a la temper-

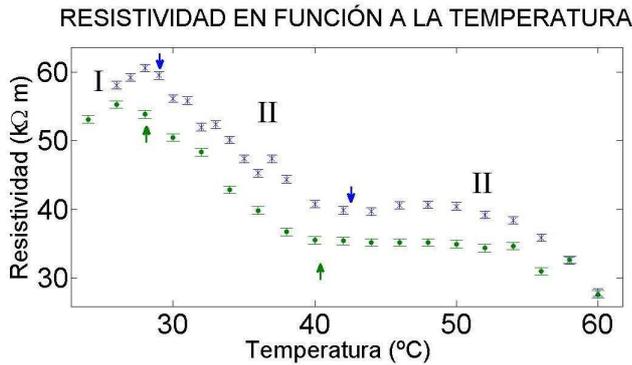


FIG. 3.— Comportamiento de la resistividad en función de la temperatura durante la coagulación de la sustancia para ambas series (indicando por flechas la separación entre las regiones I, II y III para cada serie respectivamente). Se aprecia un aumento abrupto de la resistividad en la región II de tipo lineal, correspondiente al cambio de fase.

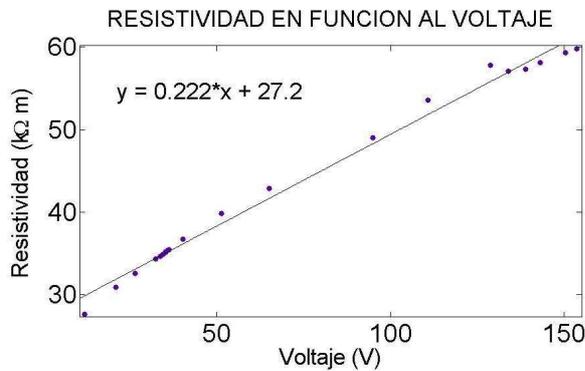


FIG. 4.— Comportamiento de la resistividad en función del voltaje durante la coagulación de la sustancia. Se observa un comportamiento de forma lineal. Implícitamente estos se dan a la temperatura a la cual se produce la transición de fase de líquida a coloidal. Calculando la relación resistividad-temperatura en la región II mediante una regresión lineal, para ambas series, se obtienen las ecuaciones de las rectas 6 (serie 1) y 7 (serie 2), las cuales a su vez se asemejan a la ecuación 1 de la sección 2.2.

$$\rho(T) = m_1 T + b_1 \quad (6)$$

$$\rho(T) = m_2 T + b_2 \quad (7)$$

donde:

$$m_1 = -1.76 \Omega \cdot m / ^\circ C$$

$$m_2 = -1.6 \Omega \cdot m / ^\circ C$$

$$b_1 = 103.3 \Omega \cdot m$$

$$b_2 = 104.8 \Omega \cdot m$$

La resistividad se mide en $[\Omega \cdot m]$ y la temperatura en $[^\circ C]$.

Por otro lado, analizamos el comportamiento entre la resistividad y el voltaje aplicado a los electrodos internos del dispositivo de Wenner, obteniéndose de esta manera la figura 4. Se aprecia un comportamiento de tipo lineal entre ambas magnitudes, el cual se describe mediante la ecuación 5. Debido a la similitud en los comportamientos de las series 1 y 2

se realizó este análisis únicamente para una de las series (serie 1). Realizando un ajuste lineal obtenemos la ecuación 8.

$$\rho(V) = m_v V + b_v \quad (8)$$

donde:

$$m_v = 0.22 m/V$$

$$b_v = 27.2 \Omega \cdot m$$

La resistividad se mide en $[\Omega \cdot m]$ y el voltaje en $[V]$.

5. CONCLUSIONES

Habiendo caracterizado el comportamiento de la resistividad en función a la temperatura, el voltaje y la corriente eléctrica durante el enfriamiento de la gelatina, a partir del arreglo de cuatro puntas de Wenner, se obtuvo que la relación entre la resistividad y el voltaje es de tipo lineal, dicha relación está dada por la ecuación 8, cuya pendiente presenta un error porcentual del 5%, lo cual indica una gran precisión del método de Wenner. Además, debido a la linealidad de la ley de Ohm podemos concluir que la resistividad tiene un comportamiento inversamente proporcional a la corriente.

Por otro lado, la relación entre la resistividad y la temperatura presentó un comportamiento lineal durante el cambio de fase de la sustancia coagulante, el cual se dio en el intervalo de $28^\circ C$ a $38^\circ C$ para la serie 1 y de $29^\circ C$ a $40^\circ C$ para la serie 2. Ambos comportamientos quedan descritos por las ecuaciones 6 y 7, obteniéndose errores porcentuales del 13% y del 15% en las pendientes de las rectas de las series 1 y 2 respectivamente. También es importante mencionar que ambas series de datos presentan aproximadamente las mismas temperaturas de transición de fase. Los errores encontrados indican que la coagulación de la gelatina no se dio de manera homogénea durante el enfriamiento, sino que existió un gradiente de coagulación debido a las menores temperaturas en sus extremos (contacto directo con el aire y contacto con la superficie de apoyo), pues se trata de una sustancia coloidal (Cahn 1961; Kanamaru & Sugiura 1961). En las secciones de datos que corresponden a las temperaturas en las que no existía transición de fase, se pudo observar un comportamiento casi constante por parte de la resistividad; entonces podemos concluir que la resistividad tiene una dependencia lineal con la temperatura solo en presencia de la transición de fase. Finalmente podemos mencionar que el método tiene como ventajas ser bastante preciso y ser de fácil aplicación para la determinación de la resistividad de sustancias coagulantes (Wikipedia 2013).

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Univ. Carlos Pizarroso por su colaboración en el montaje del experimento y en la recolección de datos, al Dr. Flavio Ghezzi por sus sugerencias y orientación a lo largo del experimento, y a los integrantes del Laboratorio de Materia Condensada.

REFERENCIAS

- Cahn J. W. (1961), *Acta Met.* **9**, 795.
Kanamaru K. & Sugiura M. (1961), *Kolloid-Z* **1**, 178.
Schuetze A. P., Lewis W., Brown C. & Geerts W. J. (2004), *Am. J. Phys.* **72**, 149.
Wenner F. (1915), *Bur. Stand. U.S. Bull.* **12**, 469.
Wikipedia 2013
http://en.wikipedia.org/wiki/Fourterminal_sensing