

ELECTRO-ROTACION DE PARTICULAS EN SUSPENSION

V.ZIMMERMAN, C.GROSSE*, M.CARRILLO

INSTITUTO DE FÍSICA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN,
AVDA.INDEPENDENCIA 1800 - (4000) TUCUMÁN, ARGENTINA.

e-mail: grosse%ldc@untmre.edu.ar

Se ha diseñado y construido un equipo para realizar experiencias de electro-rotación de partículas en suspensión (partículas de Latex, de resinas de intercambio iónico, células, etc.) y se han obtenido los primeros espectros.

La técnica de la electro-rotación permite obtener información sobre las propiedades dieléctricas de una partícula, a partir de los espectros que se obtienen midiendo la velocidad de rotación que ésta adquiere al ser sometida a la acción de un campo eléctrico rotativo. La ventaja principal de este método frente a las técnicas dieléctricas convencionales, es que la información obtenida es sobre una única partícula de la suspensión y no del conjunto de ellas, independizándose de esta manera de las ecuaciones de mezcla.

An equipment for electro-rotation measurements on suspended particles (latex, ion exchange resins, cells, etc.) has been designed and built, and some spectra have already been obtained.

The electro-rotation technique makes it possible to deduce the dielectric properties of suspended particles from measurements of their rotation speed under the action of a rotating electric field. The main advantage of this method as compared to traditional dielectric techniques, is that it is based on measurements performed on a single particle, which makes it independent of the use of mixture formulas.

1 Introducción

La técnica de la electro-rotación permite obtener información sobre las propiedades dieléctricas (conductividad y permitividad) de partículas en suspensión como ser partículas de látex o de resinas de intercambio iónico, células, etc. [1, 2, 3, 4, 6].

Las primeras experiencias usando esta técnica fueron desarrolladas hacia 1906 por v. Lang (Wien.Ber. 115 (1906) 211-222), quien trabajó con partículas macroscópicas. Recién hacia 1982 Arnold [2] realizó las primeras mediciones con micropartículas (células). El Laboratorio de Dieléctricos del Instituto de Física de la Universidad Nacional de Tucumán acaba de incorporar un equipo para electro-rotación, diseñado y construido localmente, con el que se han realizado ya las primeras mediciones.

*Investigador CONICET

Las experiencias de electro-rotación consisten en someter una suspensión muy diluida de partículas a la acción de un campo eléctrico rotativo, y observar (empleando un microscopio) el comportamiento de una de ellas. En general, dicho comportamiento consiste en la rotación de la partícula alrededor de su propio eje.

Esta rotación es asincrónica con el campo, y usualmente lenta. Así, por ejemplo, para una frecuencia de campo de 300 kHz, la velocidad angular de la partícula puede ser de unas 2 revoluciones por segundo, valor que crece con el cuadrado de la intensidad del campo aplicado. Por otro lado, la rotación puede ser en el mismo sentido del campo o en sentido contrario.

Los espectros de rotación muestran diferentes formas dependiendo de la estructura de la partícula estudiada. Para células, por ejemplo, presentan en general dos máximos, uno

positivo (rotación en el sentido del campo) para frecuencias mayores que 1 MHz, y uno negativo (rotación en sentido contrario al campo) para frecuencias del orden de las centenas de kHz. Algunas células presentan además rotación positiva para frecuencias menores que 1 kHz [10]. Por otro lado, los espectros de partículas de látex sólo presentan valores positivos, y el máximo correspondiente a altas frecuencias se encuentra alrededor de los 500 kHz [5].

La ubicación de los máximos y mínimos de rotación es independiente de la intensidad del campo y permite determinar los parámetros dieléctricos de la partícula.

La técnica de la electro-rotación está íntimamente ligada con las técnicas clásicas de espectroscopía dieléctrica, sobre las que presenta una serie de ventajas:

- ◇ Permite determinar las propiedades de una única partícula, por lo que es aplicable a sistemas con partículas diferentes.
- ◇ Requiere una cantidad mínima de suspensión (del orden de 1 mm³).
- ◇ Tiene alta sensibilidad en altas frecuencias por lo que es especialmente adecuada para el estudio de propiedades de membranas.

2 Resumen de las Bases Teóricas

Consideramos una partícula esférica de radio R sumergida en un electrolito y bajo la acción de un campo eléctrico periódico $\mathbf{E}(t)$, Fig.1.

El potencial eléctrico en el electrolito es,

$$\varphi_a(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_a} \frac{\boldsymbol{\mu}^*(t) \cdot \mathbf{r}}{r^3} - \mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{r} \quad (1)$$

donde

$$\boldsymbol{\mu}^*(t) = 4\pi\epsilon_a R^3 \mathbf{E}(t) U^* \quad (2)$$

$$U^* = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_a^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_a^*} = \frac{K_p - K_a}{K_p + 2K_a} \quad (3)$$

$$\epsilon^* = \epsilon - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (4)$$

$$K = \sigma + j\omega\epsilon \quad (5)$$

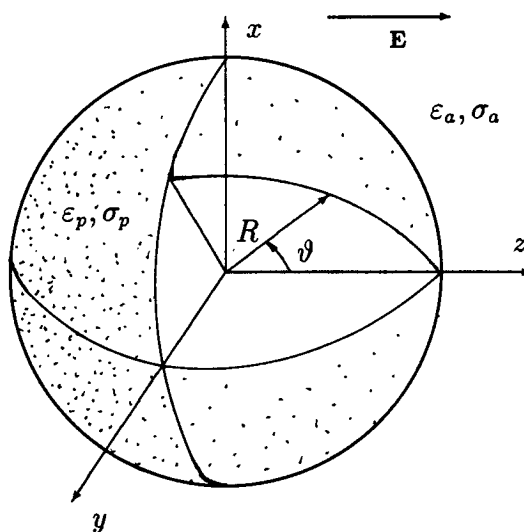


Figura 1: Sistema considerado para explicar la electro-rotación.

$\boldsymbol{\mu}^*(t)$ es el momento dipolar inducido, U^* es el factor de Clausius-Mossotti, que relaciona las conductividades y permitividades de la partícula y del electrolito, K y ϵ^* son la conductividad y permitividad complejas ó generalizadas.

En general, el dipolo inducido se encuentra desfasado temporalmente respecto del campo; y cuando éste es rotativo, el desfasaje temporal se transforma en un desfasaje angular. Debido a dicho desfasaje, aparece una cupla (\mathcal{T}) que actúa sobre la partícula y tiende a orientar el dipolo en la dirección del campo [5],

$$\mathcal{T} = -4\pi\epsilon_a R^3 E_o^2 U'' \quad (6)$$

donde U'' es la parte imaginaria del factor de Clausius-Mossotti.

A la acción de esta cupla se le opone una cupla de origen viscoso [5, 12],

$$\mathcal{T} = 8\pi R^3 \eta \Omega. \quad (7)$$

donde η es el coeficiente de viscosidad y Ω es la velocidad angular de rotación de la partícula. El sistema alcanza un estado estacionario cuando ambas cuplas se hacen iguales. La correspondiente velocidad de rotación de la partícula es

$$\Omega_s = -\frac{\epsilon_a E_o^2}{2\eta} U''. \quad (8)$$

La expresión para U'' depende de las propiedades de la partícula considerada:

Si la partícula se puede modelar como una esfera homogénea de permitividad y conductividad ε_p y σ_p independientes de la frecuencia, la expresión para la velocidad de rotación resulta [5, 11],

$$\Omega_s = -\frac{\varepsilon_a E_o^2}{2\eta} D_\delta \frac{\frac{f}{f_c}}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (9)$$

donde

$$D_\delta = 3 \frac{\sigma_a \varepsilon_p - \sigma_p \varepsilon_a}{(\varepsilon_p + 2\varepsilon_a)(\sigma_p + 2\sigma_a)} \quad (10)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_p + 2\sigma_a}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_a} \quad (11)$$

Las gráficas de Ω_s en función de la frecuencia del campo calculadas a partir de la ecuación (9), presentan un único extremo que típicamente es positivo y se encuentra en frecuencias superiores a los 500 kHz.

Otro modelo importante de partícula es el de una esfera homogénea de permitividad y conductividad ε_i y σ_i , rodeada por una membrana de espesor d_m , y permitividad y conductividad ε_m y σ_m , siendo todas estos valores independientes de la frecuencia.

Para encontrar una expresión que permita relacionar en forma simple los datos experimentales con las propiedades dieléctricas de la partícula, se deben hacer una serie de aproximaciones [1, 5],

◇ espesor de la membrana despreciable frente al radio de la partícula,

$$d_m \ll R$$

◇ conductividad de la membrana despreciable frente a las del electrolito y del medio interno de la partícula,

$$\sigma_m \ll \sigma_a, \sigma_i$$

◇ medio interno y electrolito puramente conductivos.

Las primeras dos aproximaciones están generalmente bien justificadas en el caso de células. La tercera, introducida por Schwan [8],

y ampliamente utilizada en los trabajos de Arnold *et al.* [1, 5, 7, 9], puede no ser del todo correcta en lo que respecta al medio externo.

Con estas aproximaciones la expresión para la velocidad de rotación de la partícula resulta

$$\Omega_s = -\frac{\varepsilon_a E_o^2}{2\eta} D_\beta \frac{\frac{f}{f_c}}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (12)$$

donde

$$D_\beta = \frac{3\sigma_a \sigma_i^2}{[RG_m(\sigma_i + 2\sigma_a) + 2\sigma_i \sigma_a](\sigma_i + 2\sigma_a)}$$

$$f_c = \frac{G_m}{2\pi C_m} + \frac{\sigma_a \sigma_i}{\pi RC_m(\sigma_i + 2\sigma_a)} \quad (14)$$

$$G_m = \frac{\sigma_m}{d_m} \quad (15)$$

$$C_m = \frac{\varepsilon_m}{d_m} \quad (16)$$

G_m y C_m son la conductancia y capacidad de la membrana.

Las gráficas de Ω_s en función de la frecuencia del campo, calculadas a partir de la ecuación (12), presentan un mínimo en la zona de frecuencias del orden de las centenas de kHz.

Estos dos modelos permiten interpretar el máximo de rotación observado en altas frecuencias, y el mínimo observado en radio frecuencias. Sin embargo, no pueden explicar la rotación positiva medida en algunos sistemas en audio frecuencias [5, 10].

Este rango de frecuencias está siendo actualmente estudiado, pero no existe un desarrollo teórico completo que explique cuantitativamente el comportamiento observado. Las teorías existentes basadas en el mecanismo que origina la relajación α , predicen una rotación en sentido opuesto al obtenido experimentalmente.

3 Descripción del Equipo

El equipo consta de un generador de señales (Hameg HM8032), un divisor de fase, una

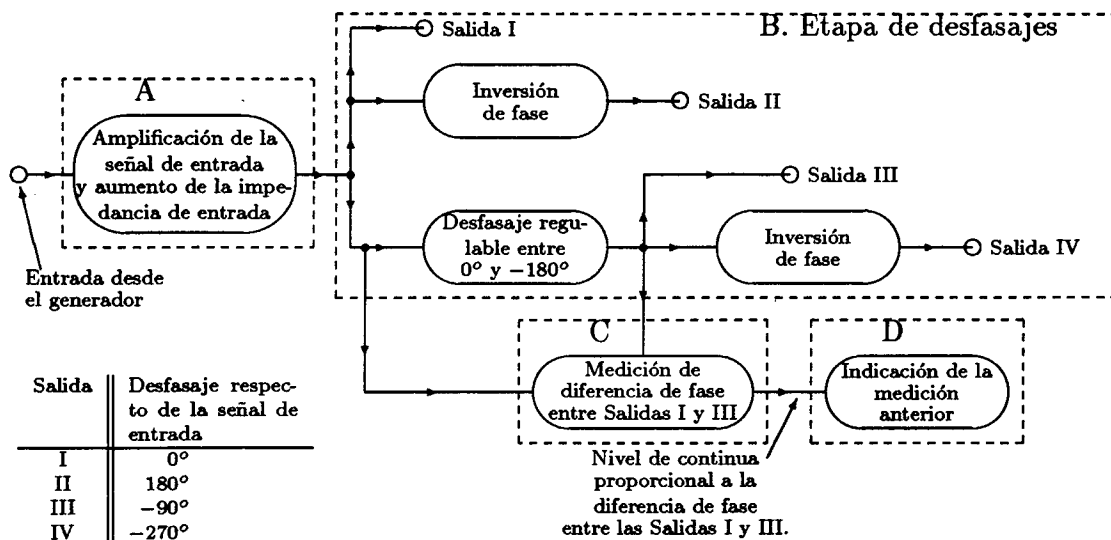


Figura 2: Diagrama de bloques del divisor de fase.

celda de cuatro electrodos y un microscopio binocular (Olympus, modelo CHS).

El divisor de fase recibe la señal de salida del generador y genera, a partir de ella, cuatro señales de igual amplitud y frecuencia que se encuentran desfasadas entre sí un ángulo de 90°. La frecuencia y forma de las señales de salida es igual a la de la señal de entrada. La amplitud de las mismas es de 24 Vpp (como máximo) y es independiente de la frecuencia.

gira con el tiempo.

Los electrodos son de acero inoxidable, y se encuentran adheridos a un portaobjetos de microscopio. Sobre los electrodos se coloca un cubreobjetos para evitar la evaporación de la suspensión durante las mediciones.

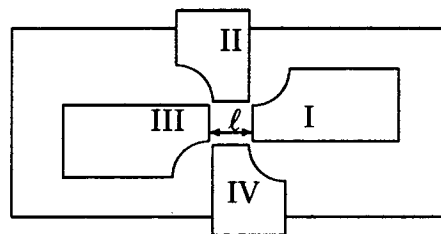


Figura 4: Celda para electro-rotación. $l = 1.2$ mm.

La distancia entre electrodos es de 1.2 mm, y su altura es de 0.15 mm.

4 Mediciones

Las mediciones se realizaron sobre células de levadura en suspensión en agua destilada. En la Fig.5 se presentan los espectros obtenidos. Cada símbolo corresponde a una célula diferente.

Los picos negativos que se observan en los espectros, se pueden interpretar usando el modelo de partícula con membrana. Las frecuencias características correspondientes a dichos picos son diferentes para cada una de las

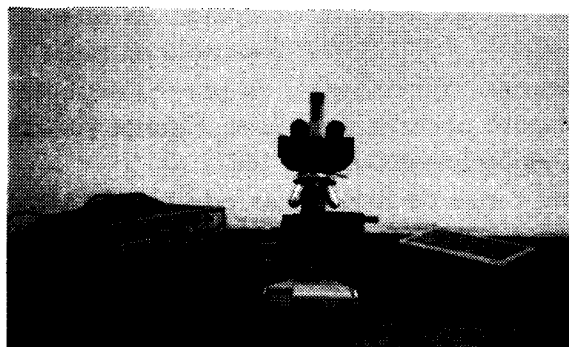


Figura 3: Equipo experimental para electro-rotación.

En la figura 2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al circuito del divisor de fase.

Las señales de salida del divisor de fase alimentan una celda de cuatro electrodos dispuestos como se indica en la figura 4. De esta manera, en el centro de la celda se genera un campo eléctrico de amplitud constante, que

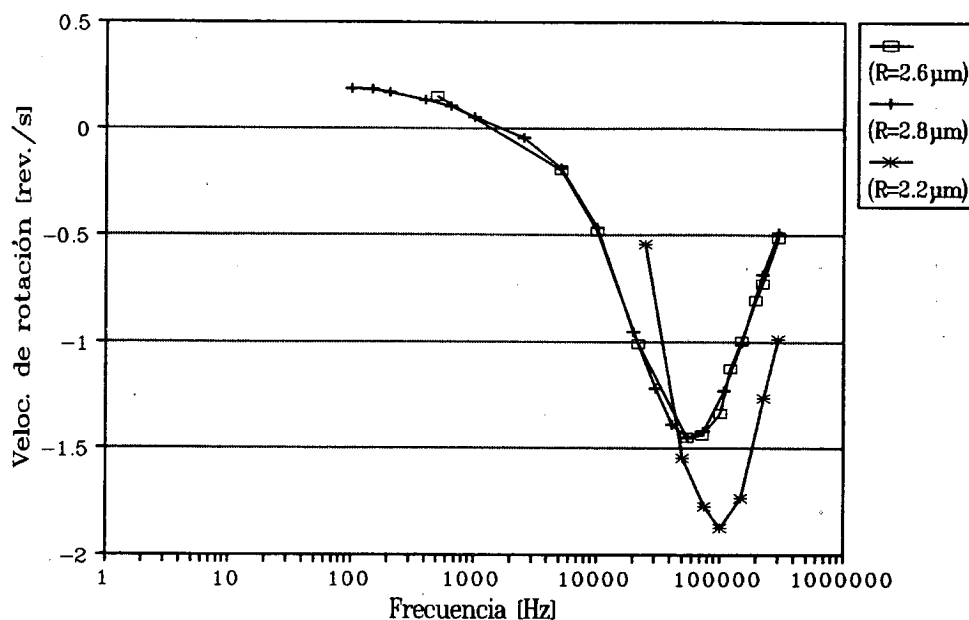


Figura 5: Espectros de rotación obtenidos para células de levadura. Conductividad del electrolito, $\sigma_a = 1.2 \cdot 10^{-3}$ S/m.

células, lo que se debe a que sus radios son diferentes.

En bajas frecuencias, los espectros presentan una zona en que la rotación tiene el mismo sentido que el campo. Como ya se mencionó, no existe actualmente interpretación satisfactoria para este fenómeno.

Referencias

- Schwan, H.P. *Ferroelectrics*, **86** (1988) 205-223.
- Arnold, W.M. y Zimmerman, U. *Naturwissenschaften*, **69** (1982) 297.
- Arnold, W.M. y Zimmerman, U. *Z.Naturforsch.*, **37 c** (1982) 908-915.
- Arnold, W.M. y Zimmerman, U. *Journal of Electrostatics*, **21** (1988) 151-191.
- Arnold, W.M., Schwan, H.P. y Zimmerman, U. *J.Phys.Chem.*, **91** (1987) 5093-5098.
- Arnold, W.M. *Ferroelectrics*, **86** (1988) 225-244.
- Arnold, W.M., Geier, B.M., Wendt, B. y Zimmerman, U. *Biochimica et Biophysica Acta*, **889** (1986) 35-48.
- Schwan, H.P. *Studia Biophysica*, **110**(1-3) (1985) 13-18.
- Arnold, W.M., Wendt, B., Zimmerman, U. y Korenstein, R. *Biochimica et Biophysica Acta*, **813** (1985) 117-131.
- Hu, X., Arnold, W.M. y Zimmerman, U. *Biochimica et Biophysica Acta*, **1021** (1990) 191-200.
- Fuhr, G. y Kuzmin, P.I. *Biophys.J.*, **50** (1986) 789-795.
- Landau, L.D. y Lifshitz, E.M. *Mecánica de Fluidos. Vol.6 del Curso de Física Teórica*. Reverté (Ed.).