

# Internet Electronic Journal\*

# Nanociencia et Moletrónica

Diciembre 2006, Vol. 4, N°1, pp 637-649

## **La dielectroforésis empleada en la manipulación de biopartículas de TMV**

**A. Sánchez, A. Zehe**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.  
Posgrado de la Facultad de Cs. de la Electrónica.  
Apdo. Post. # 1505, 72000 Puebla, Pue., México.  
e-mail: armando\_sac@ece.buap.mx

recibido: 8 Noviembre 2005

revisado: 2 Febrero 2006

publicado: 30 Abril 2006

Citation of the article:

A. Sánchez, A. Zehe. La dielectroforésis empleada en la manipulación de biopartículas de TMV. Internet Electrón. J. Nanocs. Moletrón. 2006, 4(1), 637-649

---

copyright © 2006 BUAP

---

<http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx>

## La dielectroforésis empleada en la manipulación de biopartículas de TMV

A. Sánchez, A. Zehe

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.  
Posgrado de la Facultad de Cs. de la Electrónica.  
Apdo. Post. # 1505, 72000 Puebla, Pue., México.  
e-mail: armando\_sac@ece.buap.mx

recibido: 8 Noviembre 2005

revisado: 2 Febrero 2006

publicado: 30 Abril 2006

---

*Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón. 2006, vol.4 , No1, pags.637-649*

### RESUMEN

En éste artículo se emplearán biopartículas del Virus Mosaico de Tabaco (TMV). El TMV es un virus muy persistente en las plantas. Se ha descubierto que llega a sobrevivir por más de 50 años en plantas secas. Una vez que el virus entra en la planta este se empieza a multiplicar contaminando más células. El Virus Mosaico del Tabaco es uno de los más estudiados actualmente. Esta partícula viral tiene entre 500 y 1000 nm de diámetro, Comparando las propiedades geométricas y de durabilidad del Virus Mosaico del Tabaco (TMV) se puede ver que posee similitud a los nanotubos de carbono además de que puede ser considerado como un objeto microbiológico intrínseco ya que despliega propiedades de autoorganización, las cuales pueden ser ampliamente usadas para la futura creación de nanosistemas los cuales se necesitan particularmente en aplicaciones de tipo bioelectrónico

Las técnicas electrocinéticas a bajas frecuencias permiten el estudio de la agregación, rotación, deformación y orientación, incluso la manipulación de pequeños objetos singulares en su dependencia de la frecuencia desde fracciones de algunos Hz hasta la región de varios MHz. La física detrás de estas técnicas está basada en propiedades de impedancia de partículas o células en suspensión. Los efectos electrocinéticos son consecuencia de la interacción entre un campo incidente eléctrico alterno y el momento dipolar inducido en estos objetos. Las características de los campos eléctricos aplicados determinan esencialmente, cual de los varios efectos electrocinéticos ocurre. Esto se refiere a campos homogéneos o inhomogéneos, tanto como a campos rotativos o translativos, más a la inducción de los momentos dipolares, es decir, de las fuerzas correspondientes.

Debido a que a escala nanométrica no podemos emplear técnicas macroscópicas para la manipulación y control de moléculas o biopartículas de del Virus Mosaico de Tabaco (TMV) es necesario emplear campos eléctricos no uniformes, adquiriendo así las partículas (células, virus, etc) un dipolo eléctrico. Estos dipolos sufren una fuerza que origina el movimiento de las partículas, conocido como Dielectroforésis (DEF). Dicha fuerza origina un movimiento lateral en partículas o biopartículas sin arga induciéndoles una polarización a partir de campos eléctricos no uniformes

En este artículo nosotros hemos desarrollado una estructuración teórica para poder separar TMV de diferentes longitudes utilizando un proceso dielectroforético en un arreglo de microcontactos donde se puede realizar una separación selectiva de tamaños, dando un medio correcto de permitividad, conductividad, frecuencia y amplitud de campo eléctrico aplicado.

**Palabras clave:** TMV, biopartículas, nanosistemas, Fuerza Dielectroforética, separación.

## I INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo tecnológico del que hemos sido testigos durante las últimas décadas, ha llevado a la humanidad a adaptarse rápidamente a nuevos conceptos e innovaciones. Dentro de una sociedad hambrienta de crecimiento, ha sido posible evolucionar desde gigantescas y costosas máquinas de cómputo a ordenadores portátiles, teléfonos móviles, revolucionarios sistemas médicos y un amplio espectro de herramientas electrónicas hoy en día fácilmente adquiribles, producto del desarrollo de dispositivos semiconductores cada vez más rápidos y con mayor capacidad de almacenamiento de datos como es el caso de las memorias digitales. Sin embargo, el aumento de la velocidad de respuesta y el número de transistores por chip han generando nuevos problemas para los diseñadores, quienes se han empeñado durante las últimas décadas en buscar soluciones que corrijan los efectos colaterales no deseados que surgen con la miniaturización [1].

Ante esta perspectiva, muchos científicos han apostado por las nuevas tendencias nanotecnológicas como la litografía basada en el ribosoma y el denominado *self-assembly* (auto ensamble), en el cual los dispositivos se construyen así mismos, con alta densidad y perfecta funcionalidad que los hace competitivos en la práctica. Estos materiales son de naturaleza orgánica, incluyendo desde moléculas de pequeño tamaño desde alrededor de 10 átomos hasta polímeros (macromoléculas), y son capaces de responder a estímulos eléctricos y luminosos de forma similar a los conductores y semiconductores inorgánicos. Los métodos de fabricación actuales presentan dificultades de manipulación en el ámbito molecular. A manera que para desarrollar los dispositivos apropiados para esta manipulación se introduce el concepto de nanotecnología, que involucra a las ciencias química y bioquímica, biología molecular y física y a las tecnologías de la Ingeniería Electrónica y de proteínas, hace uso de microscopios y pruebas de proximidad, imágenes electrónicas y posicionamiento molecular electrónico, química supramolecular y química computacional, que en conjunto buscan desarrollar una tecnología industrial capaz de fabricar con precisión molecular el mayor número de estructuras compatibles con las leyes de la física [1]. Debemos tomar en cuenta que la manipulación de las biopartículas (virus, gérmenes, bacterias, esferas de látex, ADN, etc.) puede realizarse por medio de fuerzas electrocinéticas como la Dielectroforésis o bien la Electrorrotación [2,3].

## II DIELECTROFORÉISIS

Los métodos clásicos de impedancia registran la respuesta dieléctrica de suspensión en un campo eléctrico externo. Los sistemas biológicos son complejos con respecto a su composición y estructura geométrica. La interacción con un campo eléctrico involucra por lo tanto múltiples procesos relacionados con el relajamiento, e inclusive polarizaciones interfaciales con los electrodos [2].

Los métodos electrocinéticos con campos eléctricos alternos a baja frecuencia están actualmente, y en creciente grado, sustituyendo las técnicas comunes de impedancia. La razón principal consiste en la alta resolución de estos métodos referente a los parámetros eléctricos de objetos singulares, basados en sus principios de medición diferentes. Los métodos electrocinéticos determinan o aplican efectos de fuerza, que surgen de la interacción entre un momento dipolar inducido en un objeto y el campo eléctrico externo. El análisis microscópico de movimientos de partículas o células en función de la frecuencia del campo eléctrico permite estudios tanto de translación y rotación, como de deformación, orientación y agregación de partículas o células singulares [4,5].

Los mecanismos responsables para los procesos de relajamiento grandes a baja frecuencia incluyen el conocido efecto MAXWELL-WAGNER y el efecto interfacial de polarización. El efecto anterior ocurre en partículas, que son compuestas de un material aislante, cubiertas con una capa de material conductivo, que resulta en una permitividad compleja efectiva que depende de los volúmenes relativos y sus propiedades dieléctricas. Para su descripción se aplican fórmulas de mixtura, que se basan en el cálculo del potencial interno y externo de partículas esféricas dispersas ó en muestras con geometrías elípticas, e incluso cilíndricas [6]. Establecidos sobre la teoría MAXWELL-WAGNER-SILLARS (MWS) de la polarización interfacial, considerando solamente partículas esféricas, la fórmula de mixtura para la función dieléctrica de la suspensión  $\varepsilon_{sus}^*$  resulta en la ecuación (1).

$$\varepsilon_{sus}^* = \varepsilon_{liq}^* \left[ (2 \varepsilon_{liq}^* + \varepsilon_{sph}^*) - 2 \gamma (\varepsilon_{liq}^* - \varepsilon_{sph}^*) \right] \cdot \left[ (2 \varepsilon_{liq}^* + \varepsilon_{sph}^*) - 2 \gamma (\varepsilon_{liq}^* - \varepsilon_{sph}^*) \right]^{-1} \quad (1)$$

donde:

$\varepsilon_{sus}^*$  es la permitividad dieléctrica compleja de las partículas esféricas suspendidas,

$\varepsilon_{liq}^*$  se refiere al medio de suspensión,

$\gamma$  es la fracción de volumen, que constituyen las partículas dispersadas.

Los métodos basados en suspensiones detectan muchas partículas en un instante y pueden lograr así un significado estadístico dentro de cortos tiempos de medición. Son útiles también para partículas submicrométricas, que no permiten una detección visual. No obstante, si se observa por ejemplo el ensanchamiento de un proceso de dispersión determinado, no será posible asociarlo con las propiedades de cada partícula singular ó con la dispersión de la partícula dentro de la población de partículas suspendidas [4]. Como cualquier respuesta dieléctrica es basada en el mismo principio de polarización interfacial, puede por tanto ser descrito por una teoría unificada. Las propiedades de partículas singulares se presentan más claramente en sus efectos electrocinéticos. La razón para esto consiste en el hecho, que estos efectos son consecuencia de la diferencia de la polarizabilidad entre el medio de suspensión y las partículas, mientras la técnica de impedancia simplemente determina la permitividad dieléctrica integral de la suspensión  $\varepsilon_{sus}^*$  como señala la ecuación (1). Las características de los campos eléctricos aplicados determinan esencialmente, cual de los varios efectos electrocinéticos ocurre. Esto se refiere a campos homogéneos o inhomogéneos, tanto como a campos rotativos o translativos, más que a la inducción de los momentos dipolares, es decir, a momentos de las fuerzas correspondientes. En la figura 1 se presenta la aplicación de campos eléctricos homogéneos sobre una partícula singular, que técnicamente se realiza entre las placas planas de una capacitancia como contactos eléctricos, empleando campos eléctricos alternos.

En (a) se muestra la orientación de una partícula no esférica. En el inciso (b) se muestra la deformación (elongación o compresión); mientras que en (c) podemos ver la atracción entre varias partículas. El campo eléctrico homogéneo se genera con dos contactos planos (capacitancia de capas planas).

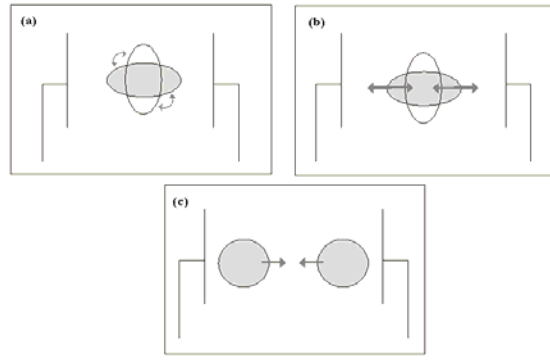


Figura 1: Aplicación de campos eléctricos homogéneos sobre una partícula singular entre dos placas planas.

La técnica de separación dielectroforética está basada en las propiedades intrínsecas de las partículas dieléctricas. Dicha técnica ha sido empleada en la discriminación de células biológicas y partículas de diversa naturaleza.

El promedio en tiempo de la fuerza del campo dieléctrico  $\langle F_{DEP} \rangle$  en un campo homogéneo alternante está dado por la ecuación (2) [3].

$$\langle F_{DEP} \rangle = 1/2 \operatorname{Re} (\bar{m} V) \nabla E \quad (2)$$

donde  $Re$  denota la parte real del producto escalar,  $\bar{m}$  es el momento dipolar inducido de la partícula,  $\nabla E$  es el gradiente del campo eléctrico no uniforme que actúa en la cámara, el cual contiene el medio de suspensión dieléctrico y  $V$  es el volumen de la partícula. El efecto es muy sensible a la fuerza del medio además de que la fuerza del dipolo inducido depende de la polarización de la partícula y el medio. Por definición el momento dipolar inducido  $\bar{m}$  es proporcional al volumen de la partícula  $V$ , mientras que el campo eléctrico externo es definido mediante la relación  $E = E_0 e^{j\omega t}$  con frecuencia angular  $\omega$  y la permitividad del medio dieléctrico alrededor del objeto definida como  $\epsilon_0 \epsilon_m$ .

Para poder realizar la manipulación y separación de las biopartículas por medio de fuerzas dielectroforéticas es necesario fabricar electrodos a través de los cuales se podrá aplicar una diferencia de potencial cambiante con el tiempo con la finalidad de generar campos eléctricos alternos.

Dichos electrodos pueden ser construidos con sustratos de cristal, empleando la técnica de fotolitografía de impresión directa. Una vez cubierto el sustrato con resina, se procede a realizar una deposición del metal que servirá para fabricar el electrodo (titanio, paladio, oro, etc) de tal manera que se siga un procedimiento similar al empleado en la fabricación de circuitos integrados.

En este caso las dimensiones de los electrodos son totalmente controladas, ya que la precisión que garantiza la litografía de impresión directa muestra que se pueden obtener electrodos totalmente geométricos con una escala de resolución de 50 nm. El tener electrodos simétricos permite realizar un completo control del campo eléctrico producido en el momento de llevar a cabo la manipulación de partículas (virus, gérmenes, bacterias, etc). La figura 2 muestra dos tipos de electrodos empleados en la

manipulación dielectroforética. Una característica esencial de los electrodos de tipo polinomial es que permiten generar campos eléctricos de alta intensidad a través de los contactos, mientras que se tiene una intensidad de campo eléctrico mínimo en el centro.

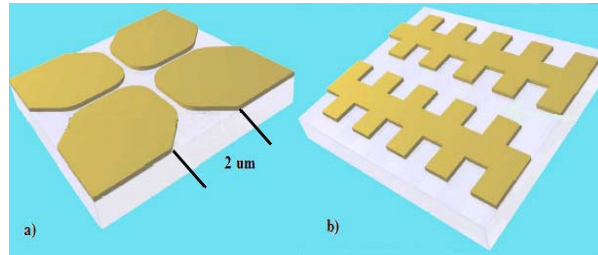


Figura 2: Tipo de electrodos empleados en la manipulación dielectroforética. En (a) se muestra una configuración de tipo polinomial mientras que (b) se muestra una sección de los electrodos de tipo dentado rectangular.

### III FACTOR DE CLAUSIUS-MOSSOTTI

El factor de Clausius-Mossotti es una medida de la polarizabilidad efectiva de la partícula, y depende primordialmente de la forma geométrica del objeto elipsoidal.

Considerando la permitividad  $\varepsilon$  y  $\sigma$  la conductividad eléctrica de algún medio dieléctrico, la permitividad compleja se define según la ecuación (3).

$$\varepsilon^* = \varepsilon - j(\sigma / \varepsilon_0 \omega) \quad (3)$$

siendo  $j$  la unidad imaginaria  $(-1)^{1/2}$ .

El factor Clausius-Mossotti, en la dirección del eje  $x$ ,  $K(\omega)_x$ , esta dada por la ecuación (4)

$$K(\omega)_x = (\varepsilon_p^* - \varepsilon_m^*) / [\varepsilon_m^* + (\varepsilon_p^* - \varepsilon_m^*)] \cdot n_x \quad (4)$$

Las permitividades  $\varepsilon_p^*$  de la partícula, y  $\varepsilon_m^*$  del medio de suspensión son números complejos, mientras  $\varepsilon_0$  es la común constante dieléctrica del vacío ( $\varepsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1$ ,  $c$  es la velocidad de luz,  $\mu_0$  permeabilidad magnética del vacío).  $n_x$  es el factor de depolarización en dirección  $x$  paralelo al campo eléctrico externo. Para el caso de simetría de esferoides que poseen dos ejes iguales, y la tercera puede tomar valores entre cero (disco infinitamente delgado) e infinito (cilindro infinitamente largo; 'aguja'). Tres ejes iguales corresponden a la esfera. Suponiendo que este tercer eje se orienta paralelo al campo eléctrico externo, los factores de depolarización toman valores  $n=1; 1/3; 0$  para el disco delgado, la esfera y el cilindro largo, respectivamente. Para cilindros cortos y discos gruesos, que no pueden ser representados por esferoides, se desarrolló un procedimiento de aproximación [6]. Uno de los ejemplos mas llamativos al respecto lo forman los *rouleaux*, que son agregaciones de eritrocitos en forma de los llamados *coin stacks* [3].

Consecuentemente, el factor de Clausius-Mossotti depende de la frecuencia del campo aplicado, además de las propiedades dieléctricas de la partícula y el medio de suspensión. Cuando solo las dependencias de la frecuencia son objeto de estudio, es suficiente considerar  $K(\omega)$  como la parte

dependiente de la frecuencia del momento del dipolo inducido. Variaciones de este factor dado superan a la fuerza dielectroforética descrita en la ecuación (2), la cual es única para un tipo especial de partícula. Esto concierne no solo a propiedades dieléctricas intrínsecas, pues además las formas geométricas vía los factores de depolarización y el tamaño vía el volumen son contenidos en el momento del dipolo inducido.

La variación de forma y tamaño de las partículas afectan a  $K(\omega)$  y  $V$ , las cuales conducen a la fácil realización de protocolos de separación dielectroforética. El diseño y la geometría de microelectrodos usados para generar y controlar campos eléctricos no uniformes es además un factor considerable. De las expresiones (2) y (4) se siguen dos casos de especial importancia práctica. Por un lado las partículas de forma esférica con  $n_x = n_y = n_z = 1/3$ , llevan a la obtención de la ecuación (5)

$$\langle F_{DEP} \rangle_{esferico} = 2\pi R^3 \epsilon_0 \epsilon_m^* Re \left\{ \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \right\} \nabla |E|^2. \quad (5)$$

Y por otro lado las partículas largas de forma de aguja cilíndrica con  $n_x = 0$ ,  $n_x = n_y = 0.5$  resultan en:

$$\langle F_{DEP} \rangle_{aguja} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot L}{3} \epsilon_0 \epsilon_m^* Re \left\{ \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_m^*} \right\} \nabla |E|^2. \quad (6)$$

donde  $L$  es la longitud, y  $R$  es el radio del cilindro considerando que se debe cumplir la relación  $L \gg R$  [7]. En el caso de un cilindro de longitud  $L$  variable emplearemos la ecuación (7), que fue desarrollada en [3,7].

$$K(\omega) = (\epsilon_p^*(\omega) - \epsilon_m^*(\omega)) / [(\epsilon_m^*(\omega) + (\epsilon_p^*(\omega) - \epsilon_m^*(\omega))) \cdot \alpha(q)]$$

$$\alpha(q) = \left\{ \epsilon_m^* + (\epsilon_p^* - \epsilon_m^*) q^2 \left( 1 + \frac{\sqrt{q^2 + 1}}{2} \cdot \ln \frac{\sqrt{q^2 + 1} - 1}{\sqrt{q^2 + 1} + 1} \right) \right\}^{-1}. \quad (7)$$

El valor de  $\alpha(q)$  se relaciona con el factor de depolarización y depende fuertemente de la relación  $R/L$  del cilindro

La distancia entre los puntos de contacto dentro del campo varia de entre  $10 \mu m$  y  $50 \mu m$  la cual se obtiene empleando técnicas de fotolitografía. La aplicación de un voltaje externo de  $10 V$  genera un campo eléctrico del orden de  $10^6 V/m$ . La fuerza dielectroforética que actúa sobre las partículas es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo y es expresada por la ecuación (8)

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = \epsilon_0 \epsilon_m \cdot V \cdot Re \{ K(\omega) \} \nabla |E_{rms}|^2. \quad (8)$$

La separación de partículas ocurre como resultado de las diferentes magnitudes en las fuerzas dielectroforéticas originando así movimiento en determinadas direcciones para cada una de las poblaciones de partículas.

La magnitud del momento dipolar depende de la polarizabilidad de la partícula, además de sus propiedades dieléctricas y del medio de suspensión. Entonces es necesario tomar en cuenta que la elección adecuada en conductividad y permitividad del medio puede ser de gran ayuda en el momento de realizar la separación de partículas con propiedades dieléctricas similares.

El factor de Clausius Mossotti no solo depende de las propiedades dieléctricas de la partícula y el medio, sino que también depende de la frecuencia del campo aplicado. Las variaciones en este factor muestran un pico en la curva que describe la fuerza dielectroforética para un determinado valor de frecuencia y una determinada forma de la partícula, de tal manera que se cumple lo siguiente para la parte real del factor de Clausius Mossotti.

Una Fuerza dielectroforética positiva (DEP positiva) ocurre cuando  $\text{Re}\{K(\omega)\} > 0$ , la fuerza es dirigida hacia el campo eléctrico ascendente por lo cual las partículas se agrupan en los electrodos.

Una fuerza dielectroforética negativa ocurre cuando  $\text{Re}\{K(\omega)\} < 0$ , de tal manera que la dirección de la fuerza es la dirección del campo eléctrico descendente. Bajo esta condición podemos decir que la partícula es repelida de los electrodos. Una ilustración de la DEP positiva y negativa se muestra en la figura 3.

Es necesario mencionar que una misma partícula puede experimentar un DEP positiva o negativa dependiendo de la frecuencia del campo aplicado.

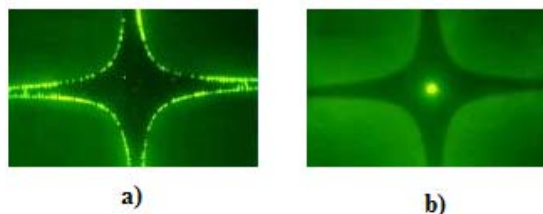


Figura 3: Descripción del tipo de dielectroforésis a) Dielectroforésis positiva b) Dielectroforésis negativa.

#### IV EL VIRUS MOSAICO DE TABACO (TMV) COMO ELEMENTO DE CONSTRUCCIÓN BIOELECTRÓNICA

El estudio de los virus como ciencia es relativamente joven, con avances muy rápidos a partir de los años cincuenta en paralelo con los de la biogenética y biología molecular. Hoy en día la clasificación de los virus se hace atendiendo esencialmente a estos dos aspectos: la naturaleza de su material genético y la simetría y composición de su cápside.

El Virus Mosaico de Tabaco (TMV) es el mejor representante de un virus de simetría helicoidal. Se debe de tener en cuenta que una forma simple de ordenar múltiples subunidades de proteínas idénticas es usando una simetría de organización rotacional, obteniendo así un agrupamiento similar a un disco circular. Una vez que se logran agrupar múltiples discos; estos se pueden apilar uno sobre otro para formar cilindros con virus de las mismas características proteínicas, obteniendo así fácil caracterización biológica en cada cilindro formado, como se muestra en la figura 4.



El Virus Mosaico de Tabaco está compuesto por un 94% de proteínas, además de tener un 6% de ácido ribonucleico (ARN), lo que hace posible que el virus se comporte como un ser vivo sin serlo plenamente. Por medio de la cristalografía de rayos X se mostró [8] que el TMV tiene una cápside en forma de hélice que esta formada de discos apilados. Una hélice se puede definir por dos parámetros llamados amplitud (diámetro) e inclinación (distancia cubierta por cada vuelta completa de la hélice).

En estos sistemas biológicos, el ARN reemplaza la función del ADN (ahora el ARN se encarga del almacenamiento de la información y la iniciación de la transcripción), además de que es completamente posible de que represente evolutivamente un primer estado de la transferencia de información. Parece posible que el primer sistema de síntesis de proteínas incluyera una forma autoduplicadora de ARN.

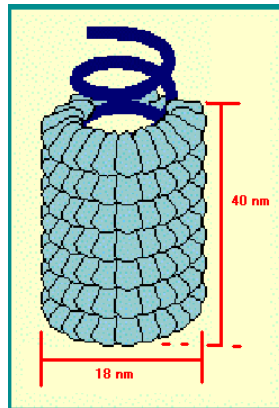


Figura 4: Forma de organización helicoidal del Virus Mosaico de Tabaco

Las partículas del TMV son rígidas, tienen una estructura similar a un pequeño cilindro (véase la figura 5), pero se ha encontrado que algunos virus poseen cierto grado de flexibilidad. Es preciso mencionar que los virus helicoidales largos tienden a ser un poco curvados o torcidos debido a la flexibilidad estructural con que cuentan. La poblaciones de TMV pueden ser manipuladas y caracterizadas mediante la técnica de manipulación por fuerzas dielectroforéticas descrita anteriormente. Haciendo uso eficiente de los arreglos de microelectrodos es posible realizar dicha manipulación usando campos eléctricos de baja o alta intensidad y frecuencia variable.

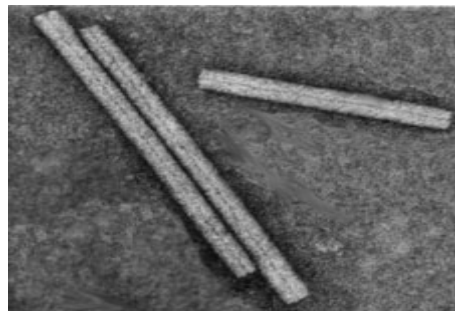


Figura 5: La estructura geométrica del TMV es similar a pequeños cilindros de diferente longitud.

La magnitud y dirección de las fuerzas dielectroforéticas en una partícula depende de las propiedades dieléctricas de tal manera que dada una determinada mezcla heterogénea de partículas estas pueden ser separadas para producir una población con mayor homogeneidad.

Estructuralmente el TMV es un virus que tiene forma circular rígida con un diámetro externo de  $2R = 18 \text{ nm}$  y con una longitud que varía entre  $2L = 40 \text{ nm}$  y  $1000 \text{ nm}$  según las gráficas obtenidas mediante experimentación con un microscopio electrónico. La relación radio-longitud definida como  $e = R/L$  se extiende sobre un poco más de un orden de magnitud, esto entre  $e = 0.018$  y  $0.30$ , lo cual es una propiedad de gran utilidad para la clasificación y almacenamiento de partículas para distintos tamaños empleando la técnica de dielectroforésis.

Tomando las relaciones (4) y (7) es posible realizar una aproximación del TMV a un cilindro sólido homogéneo de longitud  $2L = s \cdot 50 \text{ nm}$ , considerando un valor de  $s = 1, 2, \dots, 10$ . Podemos formar diez posibles poblaciones para el TMV que servirán para ser separadas, organizadas y estudiadas. Todo este proceso se lleva a cabo considerando la permitividad relativa de la partícula  $\epsilon_p = 55$  y una conductividad eléctrica  $\sigma_p = 0.085 \text{ Sm}^{-1}$  [7].

La parte real del factor de Clausius Mossotti proporcional a la fuerza dielectroforética que experimentan las biopartículas de TMV se muestra en la figura 6.

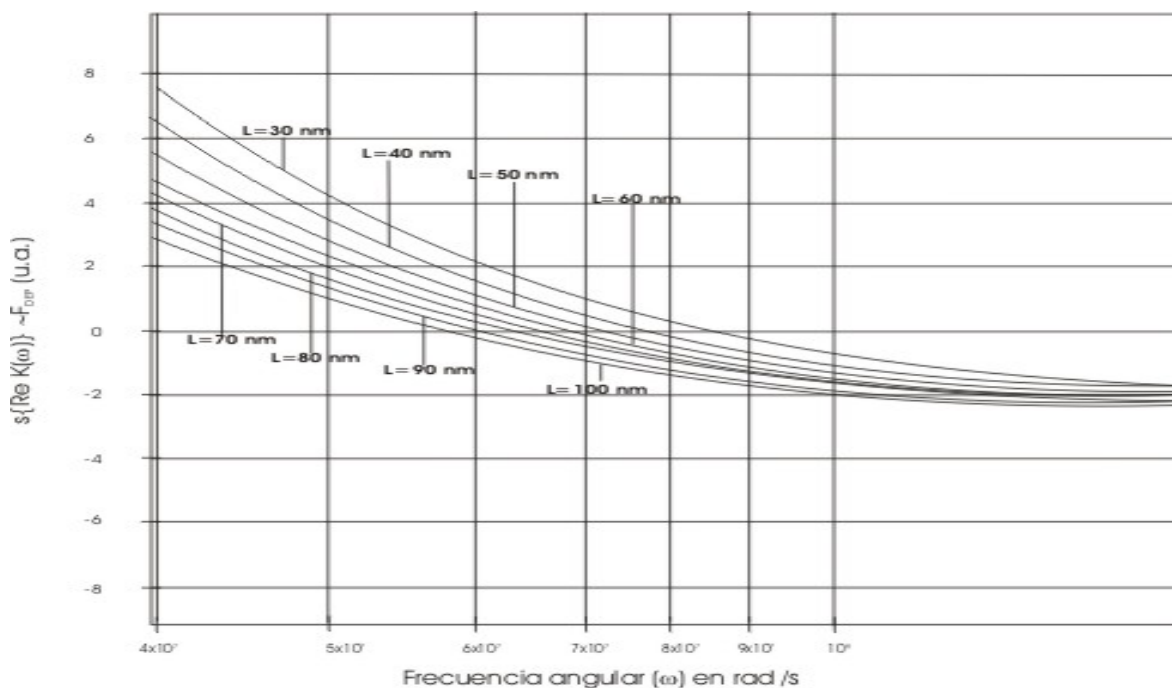


Figura 6: Parte real del factor de Clausius Mossotti proporcional a la fuerza dielectroforética sobre virus TMV de diferente longitud, utilizado para  $\sigma_m = 0.005 \text{ S/m}$

La fuerza dielectroforética es proporcional al Factor de Clausius Mossotti. Dentro de la simulación del comportamiento se hace un barrido de frecuencia angular ( $\omega$ ) (frecuencia angular del campo eléctrico aplicado) desde  $\omega = 1 \times 10^7 \text{ rad/s}$  hasta  $\omega = 1 \times 10^9 \text{ rad/s}$ , considerando que la longitud del TMV es finita y varía entre  $L = 30 \text{ nm}$  y  $L = 100 \text{ nm}$  y tiene un radio fijo de  $9 \text{ nm}$ .

En la misma figura 6 se nota la familia de curvas para distintas longitudes del TMV (30-100 nm) conforme variamos el valor de la frecuencia  $\omega$ . En esta simulación se han empleado los siguientes valores iniciales para los distintos parámetros  $\epsilon_0$ ,  $\sigma_p$  (conductividad de la partícula),  $\sigma_m$  (conductividad del medio),  $\epsilon_m$  (permitividad del medio),  $\epsilon_p$  (permitividad de la partícula),  $L$ ,  $R$ . (véase la tabla 1).

Parámetro	$\epsilon_0$	$\sigma_p$	$\sigma_m$	$\epsilon_m$	$\epsilon_p$	L	R
Valor	$8.85 \times 10^{-12}$ F/m	0.085 S/m	0.01 S/m a 0.1 S/m	78.5	55	30 nm a 100 nm	9 nm

Tabla 1. Parámetros empleados durante la simulación de la parte real del Factor de Clausius Mossotti.

## V CONCLUSIONES

Podemos concluir de la figura 6 que el valor del factor de Clausius Mossotti cambia de signo al pasar por el eje cero conforme hacemos un barrido de la frecuencia angular del campo eléctrico de tal manera que la fuerza dielectroforética también cambia en su valor absoluto. Dicho valor depende considerablemente de la conductividad del medio  $\sigma_m$ . Tan pronto que  $\sigma_m$  llega a ser igual o mayor que la conductividad de la partícula, no existe una ventana de frecuencia de transición  $\omega$  [9]. Ya que como se puede observar de la figura 6 el valor de la fuerza dielectroforética transita de un valor positivo a un valor negativo. Pero es exactamente esta propiedad la que permite una separación en espacio de cada una de las partículas cortas de las partículas largas ya que mientras algunas partículas de TMV de una longitud determinada experimentan una fuerza dielectroforética positiva para una determinada frecuencia angular del campo aplicado, pueden llegar a experimentar una fuerza dielectroforética negativa para otro valor de la frecuencia del campo eléctrico aplicado.

## VI AGRADECIMIENTOS

Uno de los autores, A. Sánchez, agradece a la Dra. A. Ramírez, catedrática de la FCE, por el apoyo otorgado en la elaboración de este artículo.

## VII BIBLIOGRAFÍA

- [1] Zehe, A. Moletrónica. [www.moletronica.buap.mx](http://www.moletronica.buap.mx)
- [2] Gimsa, JP., Eppmann and B Pruger, "Introducing phase analysis light scattering for dielectric characterization: measurement of traveling-wave pumping". Biophysical Journal, Vol. 73, pp. 309-3316. (1997)
- [3] Ramírez, A., Zehe, A., Starostenko, O. "Dielectrophoretic field-fractionation of rouleaux formed of human erythrocytes: A feasibility study". Rev. Mex. Ing. Biomédica. Vol. 24, pp. 11-19. (2003)
- [4] Pastushenko, V. Ph., Kuzmin and Yu A Chizmadshhev. "Dielectrophoresis and electrorotation of cells: unified theory for spherically symmetric cells with arbitrary structure of membrane", Biol. Mem. Vol. 5, pp 65-78. (1998)
- [5] Sánchez, A , Ramírez, A, Zehe, A. "El Potencial del Virus Mosaico del Tabaco (TMV) como Bionanosistema en la Electrónica Molecular [www.revista-nanociencia.ece.buap.mx](http://www.revista-nanociencia.ece.buap.mx). pp. 100-111, (2003)
- [6] Zehe, A., Ramírez, A. "The depolarization field in polarizable objects of general shape". Rev. Mex. de Física. Vol. 48, (5) pp. 427-431. (2002)

- [7] Morgan, H., Highes M.P., Green, N.G. “Separation of Submicron Bioparticles by Dielectrophoresis”, *Biophys. J.* 77. pp 516. (1999)
- [8] [www.euroensors.cz/fulltexts/medoro.pdf](http://www.euroensors.cz/fulltexts/medoro.pdf) (2003)
- [9] Sánchez A. Tesis de maestría “La conformación de sistemas nanoelectrónicos a escala molecular”, pp 85-95. FCE, BUAP (2005)