

SENSOR CAPACITIVO COMO DISPOSITIVO DE MEDIDA DEL ESTADO DE ORDEN DE OBJETOS DISCRETOS

*FRANKLIN PEÑA POLO*¹, *YANITZA TROSEL*¹, *IVAN SÁNCHEZ*², *WERNER BRAMER-ESCAMILLA*³

¹ Laboratorio de Física de Fluidos y Plasmas, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas

² Laboratorio de Física Estadística de Sistemas Desordenados, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. e-mail: ijsanche@ivic.gov.ve

³ Laboratorio de Física de la Materia Condensada, Centro de Física, Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas. e-mail: wbramer@gmail.com

Recibido: noviembre 2012

Recibido en forma final revisado: noviembre 2013

RESUMEN

Se describe la implementación de un sistema capacitivo para la medición del orden estructural que conforman un conjunto de objetos bidimensionales, todos de igual forma. El dispositivo de medición se diseñó y construyó usando para ello un circuito de medición capacitiva CA. Se construyó un sistema compuesto de discos al cual se le puede variar su orden estructural entre un arreglo cúbico y uno hexagonal. Se realizaron medidas de la capacitancia del sistema usando electrodos de un tamaño comparable al diámetro de los discos. Los experimentos comparados con los resultados teóricos mostraron una discrepancia del 0,23%.

Palabras clave: Sensor capacitivo, Fracción de ocupación, Transición de ordenamiento 2D.

CAPACITIVE SENSOR TO MEASURE THE ORDER STATE OF DISCRETE OBJECTS

ABSTRACT

This article describes the development of an electrical capacitance system to measure the structural order of an array of equally sized quasi-two dimensional objects. A measurement device was designed and built based on an AC capacitive measurement circuit. A system of discs was built such that the structural order could be varied between a cubic and a hexagonal packing. Measurements of the capacitance of the system were taken using electrodes of size comparable to the diameter of the discs. Experiments and theoretical predictions show a deviation of 0.23%.

Keywords: Capacitive sensor, Packing fraction, Ordering transition.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de técnicas para monitorizar el ordenamiento estructural de sistemas discretos, es cada día más relevante dadas las crecientes necesidades industriales (Smith & Stamp, 2000; Park et al. 2010) y científicas. En la industria es vital contar con sistemas que sean capaces de agrupar, ordenar y empacar a alta velocidad grupos de objetos de igual forma en las líneas de producción. Para incrementar la efectividad de estos procesos, deben existir sensores de ordenamiento que ayuden a dichos procesos. En el ámbito científico el interés en el ordenamiento estructural es muy amplio, por ejemplo por su relevancia en las transiciones de fase (Schick, 1981; Russel, 1990), el estudio de materiales amorfos (Hufnagel, 2004), la relación entre orden y funcionalidad en sistemas biológicos (Weiner & Wagner, 1998) y el ordenamiento como consecuencia de

alguna forma de autorregulación como el fenómeno de la disyunción columnar (Goehring & Morris, 2005).

A nivel industrial, la evaluación de ordenamiento muchas veces se realiza a través de técnicas avanzadas de reconocimiento de patrones y análisis de imágenes (Morrow et al. 1991; Nechval, 1994; Markus et al. 1987). La implementación de un sistema de reconocimiento necesita de la obtención de la imagen y su posterior procesamiento computarizado. Esto se podría traducir en elevados costos sobre todo para pequeñas industrias (un sistema con capacidad de análisis en tiempo real puede estar entre los 5000 USD y los 10000 USD o más, dependiendo de la complejidad de la aplicación). Aunque algunos sistemas de inspección automatizada por análisis de imágenes cuentan con la capacidad de hacer reconocimiento en tiempo real, siempre es útil poder contar con alternativas más sencillas

y económicas.

A nivel molecular, el ordenamiento estructural suele ser evaluado utilizando la función de correlación de pares (Waseda, 1981) o el parámetro de orden orientacional Q_6 (Steinhardt et al. 1983), los cuales suelen ser usados también en sistemas macroscópicos. El ordenamiento cristalino en sistemas de muchos componentes, está asociado con la periodicidad estructural y en eso se basan algunos algoritmos para detectarlo. Sin embargo, para casos sencillos, de pocos componentes, en los cuales la evaluación se hace a la escala del tamaño del componente, se puede establecer una relación directa entre el orden estructural y la fracción de ocupación (entendida como el volumen ocupado por los componentes entre el volumen total de la zona estudiada). Algunos casos se ilustran en la Figura 1.

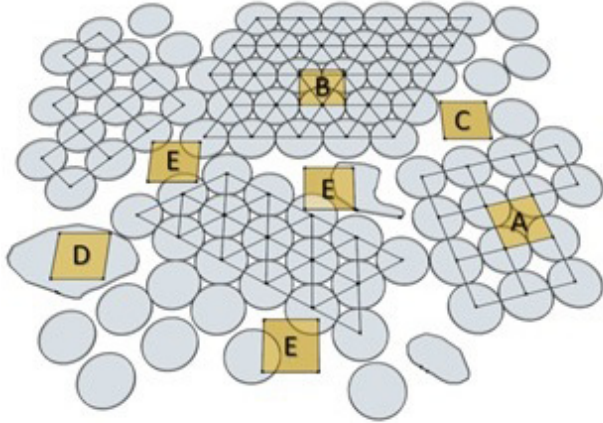


Figura 1. Ilustración de algunas configuraciones estructurales que pueden observarse en un conjunto de discos al evaluar una zona cuadrada como la indicada por los recuadros amarillos: A) arreglo cuadrado, B) arreglo hexagonal, C) ausencia de material, D) ocupación completa, E) arreglo no trivial

En casos sencillos como los de la Figura 1, monitorizar el ordenamiento puede resolverse monitoreando la fracción de ocupación. Una de las estrategias más utilizadas en el campo del manejo de sólidos y polvos es la medición de concentración de sólidos usando técnicas capacitivas (Wang et al. 2009; Mohamad et al. 2011). En este trabajo presentamos un ejemplo de determinación de transición entre dos estados con diferente configuración estructural (ambos ordenados) para un arreglo de discos, a partir de medidas capacitivas de la fracción de ocupación usando un dispositivo de medición a la escala del diámetro de un disco. El cambio estructural entre estados se ilustra en la Figura 2. Para un caso sencillo como éste, se puede obtener una expresión analítica que describe la variación de la fracción

de ocupación entre el estado de menor ocupación (arreglo cuadrado) al de mayor ocupación (arreglo hexagonal). El cambio en capacitancia será proporcional al cambio en fracción de ocupación. El ángulo θ definido por los centros de tres discos, es el único grado de libertad necesario para describir la transición. Varía desde $\theta=0^\circ$ para el arreglo cuadrado hasta $\theta=30^\circ$ para el arreglo hexagonal.

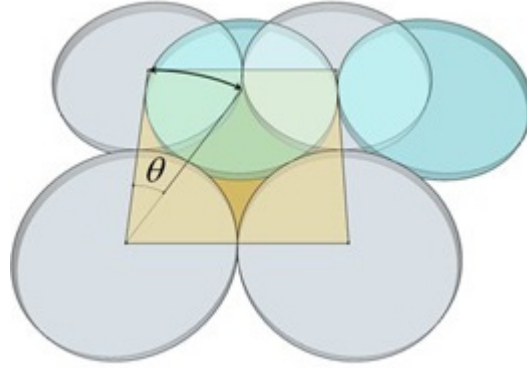


Figura 2. Esquema del cambio entre un arreglo de discos en arreglo cuadrado a uno en arreglo hexagonal. La zona cuadrada indica la posición de los electrodos de lado $b = 6$ cm de medición utilizados para medir variaciones de capacitancia asociadas con el cambio en la fracción de ocupación entre los estados

Dos cantidades son importantes para determinar la capacitancia: la intersección entre el área cuadrada de los electrodos y los discos A_c y la intersección entre el área cuadrada de los electrodos y el espacio intersticial entre discos A_i . Ambos pueden expresarse analíticamente en términos del ángulo θ , del radio r de los discos y del lado b del electrodo cuadrado según:

$$A_c = \frac{1}{2}r^2[\pi - 2\sin^{-1}(-2 + 2\cos(\theta))] - \frac{1}{2}r^2\sin[2\sin^{-1}(-2 + 2\cos(\theta))] + r^2\frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$A_i = b^2 - \frac{1}{2}\pi r^2 + r^2\sin^{-1}(-2 + 2\cos(\theta)) + \frac{1}{2}r^2\sin[2\sin^{-1}(-2 + 2\cos(\theta))] - r^2\frac{\pi}{2} \quad (2)$$

La capacitancia total (C_T) para el caso sencillo que aquí presentamos nos queda:

$$C_T = \epsilon_0 \left(\frac{\kappa_1 A_c + \kappa_2 A_i}{l} \right) \quad (3)$$

donde: ϵ_0 es la permitividad del vacío, κ_1 y κ_2 son las permitividades relativas de los discos de acrílico ($\sim 3,4$) y del espacio intersticial entre discos (aire ~ 1) respectivamente, y l es la distancia entre las placas del condensador. La

variación máxima de la capacitancia (ΔC_T) entre el arreglo cuadrado y el arreglo hexagonal, en forma general, viene dado por:

$$\Delta C_T = \frac{\epsilon_0}{t} (\Delta A_c \Delta \kappa) \quad (4)$$

donde: $\Delta \kappa$ es la diferencia entre las permitividades de los discos y del espacio intersticial ($\kappa_1 - \kappa_2$).

Como era de esperar, la variación de la capacitancia no depende únicamente de la variación de la fracción de ocupación, sino también de la diferencia entre la permitividad de los materiales que componen a los discos, así como del espacio intersticial. En general, el incremento en ΔC_T , y, por ende, la sensibilidad del sensor, depende de la escogencia adecuada de los materiales que conforman tanto los discos como del espacio intersticial; no obstante, como se verá más adelante (en la función de transferencia del circuito) la respuesta del circuito de medida puede aumentarse incrementándose el voltaje de excitación.

Por último, en un caso más general que el que se presenta aquí, como por ejemplo uno en el cual existan discos con diferencia de tamaños y alturas así como de variación de materiales (diferentes valores de permitividad), la complejidad del problema se incrementa muy por encima de lo que se ha mostrado anteriormente. Existe, no obstante, una forma de obtener resultados que permitan seguir usando este sistema para realizar la medida. La forma de poder distinguir el grado de orden y a su vez el tipo de materiales involucrados es la siguiente: se realizan curvas de calibración con las diferentes configuraciones de tamaño y materiales con los que se vaya a trabajar. Si dichas curvas no se cruzan entre sí el sistema podrá distinguir unívocamente tanto los materiales involucrados así como el factor de ocupación que posee. Si por el contrario las curvas de calibración se cruzan en uno o más puntos, sólo podrá ser distinguible el sistema en las zonas donde no se crucen las curvas.

METODOLOGÍA

El sistema de capacitancia eléctrica construido se compone de un sensor capacitivo, una unidad de medición de capacitancia (UMC), una interface para la adquisición de datos por computadora de modelo USB-6009 de la National Instruments (DAQ Multifunción de 14 Bits, 48 kS/s) y un programa de control y adquisición. El sensor capacitivo consta de dos placas de cobre, llamadas electrodos, las cuales están dispuestas paralelamente y separadas una distancia de $\sim 5\text{mm}$ entre sí, esta distancia puede ser

variada según se requiera. La UMC se basa en un circuito de medición de capacitancia (Figura 3(a)). La función de transferencia del circuito está dada por:

$$V_o = \frac{j\omega C_x R_f}{j\omega C_f R_f + 1} V_i \quad (5)$$

donde: ω es la frecuencia angular de excitación que se obtiene de un generador de funciones, C_f y R_f son la capacitancia y resistencia de retroalimentación respectivamente (Yang, 1996). La función de transferencia (ecuación 5) se simplifica si se toma un valor de R_f que satisfaga $|j\omega C_x R_f| \gg 1$ (en el caso específico de nuestro montaje $R_f = 22\text{ M}\Omega$) quedando como:

$$V_o = -\frac{C_x}{C_f} V_i \quad (6)$$

Los sistemas de medición capacitivos que se rigen por el circuito y las funciones de transferencia mencionados anteriormente, son llamados circuitos de medida de capacitancia AC.

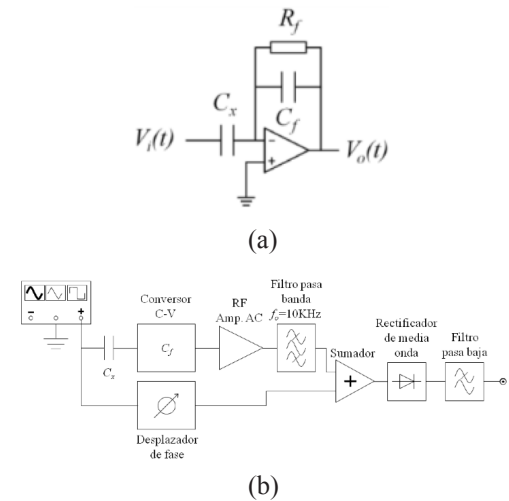


Figura 3. (a) Diagrama del conversor capacitancia-voltaje, cuya función de transferencia está dada por la ecuación 3. (b) Esquema del sistema de medición. Su salida es un voltaje continuo proporcional a C_x .

La Figura 3(b) muestra el esquema completo del sistema de medición. La señal de entrada y la de referencia es proporcionada por un generador de funciones. La señal de excitación se aplica al sensor C_x , el voltaje V_o del conversor $C-V$ es amplificado para luego ser filtrado con un filtro activo pasa banda de segundo orden centrado en 10kHz. Las dos últimas etapas comprenden lo que es la fase sensitiva de demodulación (FSD) de la señal medida. La señal de referencia del generador de señal es retrasada por un desplazador de fase para el ajuste de fase, luego es

sumada con la señal proveniente del sensor y, por último, pasa por un detector de envolvente constituido por un diodo activo de media onda y un filtro pasa bajo. Los valores de voltaje medidos son almacenados en un computador empleando una tarjeta de adquisición multifuncional de 14 Bits, 48 kS/s, la cual es controlada por medio de un software desarrollado en lenguaje G.

MECANISMO PARA LA GENERACIÓN DE TRANSICIONES ENTRE ARREGLOS CUADRADOS Y HEXAGONALES

Con el propósito de generar variaciones entre los arreglos cuadrados y hexagonales, se diseñó y construyó un mecanismo que realiza en forma automática la transición de un conjunto de discos de un arreglo cuadrado a uno hexagonal (Figura 4(b)). Este mecanismo está motorizado a través de un servo motor (tipo ROB-09064) el cual es controlado usando la plataforma de prototipos electrónicos de fuente abierta Arduino (Arduino, 2006).

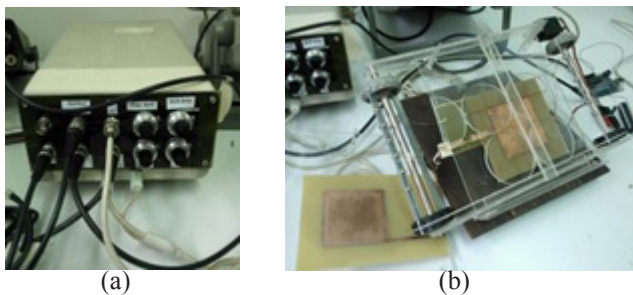


Figura 4. (a) Panel frontal de la unidad de medición de capacitancia desarrollada para este trabajo. (b) Vista del dispositivo utilizado para controlar la transición de un arreglo cuadrado a uno hexagonal de un conjunto de discos de acrílico. Uno de los electrodos de forma cuadrada se encuentra en su posición de medición, con sus vértices coincidiendo con los centros de cuatro de los discos en ordenamiento cuadrado

Los discos circulares utilizados fueron hechos de plexiglás con 60 mm de diámetro y una altura de 4 mm. El sensor capacitivo fue construido a partir de dos placas de baquelita, las cuales fueron grabadas usando cloruro férrico. Los electrodos de cobre de las placas de baquelita se realizaron de forma cuadrada con dimensión de 60x60 mm².

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para los casos:

- 1) Transición del arreglo cuadrado (A) al arreglo hexagonal (B).

- 2) Ausencia de material (C) entre los electrodos del sensor.
- 3) Sensor completamente lleno de material (D).

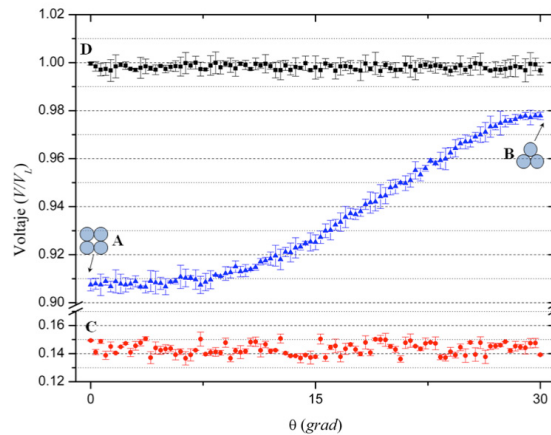


Figura 5. Gráfica de voltaje normalizado (V/V_{\max}) respecto al valor de voltaje máximo para el caso completamente lleno de material (V_{\max}) contra el ángulo θ . Los cuadros negros indican el valor de voltaje correspondiente al caso del sensor completamente lleno (D). Los triángulos azules muestran los la transición entre el arreglo cuadrado (A) y el arreglo hexagonal (B). Los círculos rojos indican el valor de voltaje correspondiente al el caso del sensor con ausencia de material (C)

Los resultados del caso (1) muestran que el dispositivo posee suficiente sensibilidad para poder distinguir entre los arreglos cuadrados y hexagonales.

La Figura 6 muestra la comparación entre las medidas realizadas de la transición desde el arreglo cuadrado al hexagonal y el cálculo numérico de las ecuaciones (1), (2) y (3). El valor de capacitancia total calculado numéricamente se obtiene a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3) pesada con la permitividad del PMMA y del aire, respectivamente. Los experimentos reproducen el comportamiento teórico esperado con una desviación no mayor al 0,23% del valor teórico.

CONCLUSIONES

Se ha presentado un sistema de medición capaz de monitorizar la transición entre dos estados ordenados de un conjunto de discos, utilizando técnicas capacitivas. Los resultados obtenidos con el dispositivo construido confirman su alta sensibilidad para discernir entre dos tipos de ordenamiento en dos dimensiones, siempre que se tenga una relación directa entre el ordenamiento y la fracción de ocupación. Los resultados experimentales

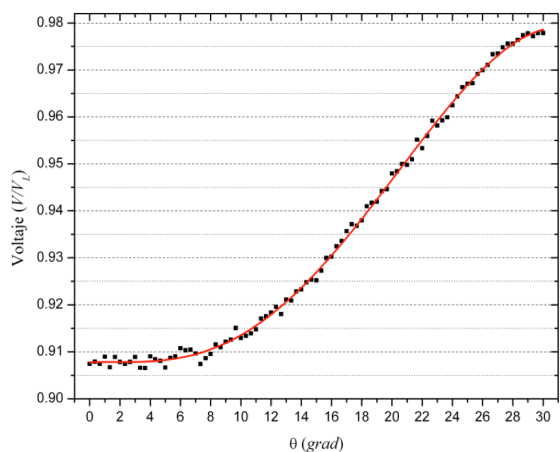


Figura 6. Gráfica de voltaje normalizado (V) respecto al valor de voltaje máximo para el caso completamente lleno de material (V_L) contra el ángulo θ . La línea roja continua corresponde a la solución teórica obtenida a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3). Los cuadros negros representan la serie de datos

concuerdan fielmente con la curva teórica con una exactitud de al menos 0,23%. Su simplicidad, bajo costo y robustez mecánica, en comparación con otros sistemas basados, por ejemplo, en procesamiento de imágenes, lo convierten en una alternativa en el momento de diseñar un sistema de inspección automatizada para ordenamiento de objetos discretos.

REFERENCIAS

- ARDUINO. (2006). Open-source electronics prototyping platform. <http://arduino.cc/>.
- GOEHRING, L. & MORRIS, S.W. (2005). Order and disorder in columnar joints. *Europhysics Letters*, Vol 69, p 739.
- HUFNAGEL, T.C. (2004). Amorphous materials: Finding order in disorder. *Nature Materials*, Vol 3, p 666.
- MARKUS, M., MÜLLER, S. C., PLESSER, T., HESS, B. (1987). On the recognition of order and disorder. *Biological Cybernetics*, Vol 57, p 187.
- MOHAMAD, E.J. , MARWAH, O.M.F., RAHIM, R.A., RAHIMAN, M.H.F., MUJI, S.Z.M. (2011). Electronic design for portable electrical capacitance sensor: A multiphase flow measurement. 4th International Conference on Mechatronics (ICOM).
- MORROW, C., HEINEMANN, P., SOMMER, H., CRASSWELLER, R., COLE, R., TAO, Y., VARGHESE, Z., DECK, S. (1991). Automated inspection of fruits and vegetables. *HortScience*, Vol 26, p 712.
- NECHVAL, N.A. (1994). Combining sensor information from automated visual inspection for quickest detection of disorders. *Proc. SPIE 2355 Sensor Fusion VII*, Vol 2355, p 248.
- PARK, C., CHOI, S., WON, S. (2010). Vision-based inspection for periodic defects in steel wire rod production. *Optical Engineering*, Vol 49, p 017202-017202-10.
- RUSSEL, W.B. (1990). On the dynamics of the disorder-order transition. *Phase Transitions*, Vol 21, p 127.
- SCHICK, M. (1981). The classification of order-disorder transitions on surfaces. *Progress in Surface Science*, Vol 11, p 245.
- SMITHH, M. L. & STAMP, R. J. (2000). Automated inspection of textured ceramic tiles. *Computers in Industry*, Vol 43, p 73.
- STEINHARDT, P.J., NELSON, D. R. & RONCHETTI, M. (1983). Numerical Evidence for bee ordering at the surface of a critical fcc nucleus. *Phys. Rev. B*. 28, 784.
- WANG, H., YANG, W.Q., PROCTOR, I., TAYLOR, J. (2009). Online monitoring and flow regime identification of fluidised bed drying and granulation processes. *International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, Shenzhen, China.
- WASEDA, Y. (1981). The structure of non-crystalline materials, liquids and amorphous solids. New York: McGraw-Hill.
- WEINER, S. & WAGNER, H.D. (1998). The material bone: structure-mechanical function relations. *Annual Review of Materials Science*, Vol 28, p 271.
- YANG, W.Q. (1996). Hardware design of electrical capacitance tomography systems. *Meas. Sci. Technol.* Vol 7, p 225.