

Diseño y Simulación de un Prototipo Experimental Para Agrupar Partículas Usando Caracterización de la Trayectoria

Carlos Juárez Toledo

Producción Industrial, Universidad Autónoma del Estado de México, Tianguistenco, México

cjuarez@uaemex.mx

Irma Martínez Carrillo

Producción Industrial, Universidad Autónoma del Estado de México, Tianguistenco, México

imartinezc@uaemex.mx

Irma Hernández Casco

Producción Industrial, Universidad Autónoma del Estado de México, Tianguistenco, México

ihernandezc@uaemex.mx

Resumen

Los implementos de medición en cualquier área de la ciencia infieren un alto costo que muchas veces no son costeables como equipo didáctico dentro de los planes de estudio en la educación de nivel superior, sin embargo, el conocer y saber hacer uso de los implementos de medición competentes al campo de desempeño provee de competencias necesarias a los estudiantes que será reflejado seguramente en su actividad dentro del campo laboral.

Es por ello que en este trabajo se diseña y desarrolla un prototipo experimental para el agrupamiento de partículas usando la teoría de caracterización de trayectoria, con la finalidad de utilizarlo como herramienta para reafirmar los conocimientos teóricos y llevar a los estudiantes a un aprendizaje significativo e inducirlos a la investigación científica. Para el procesamiento de los resultados se utilizaron los conceptos de separación

gravimétrica de partículas como parte de la materia de Mecánica de Fluidos y herramienta de programación de Matlab.

Palabras Claves: agrupamiento de partículas, caracterización de trayectoria, separación gravimétrica.

1. Introducción

El comportamiento dinámico de las partículas en movimiento puede ser afectado por las acciones de control o de efectos no lineales. Como resultado, los grupos se encuentran evolucionando en el tiempo provocando cambios bruscos en la topología del sistema.

La clasificación de las partículas en grupos significativos de agrupamiento usando el Análisis de Distribución de Tamaño de Partículas (PSDA) puede ser utilizado en numerosas aplicaciones de procesos industriales [1] y [2]. El uso de esta teoría es importante ya que permite comprender las propiedades físicas y químicas de un material o de un sistema, lo que repercute directamente en sus propiedades y comportamiento eléctrico, mecánico, químico, etc.

Comúnmente en los procesos industriales se necesita controlar estrechamente la forma en la que se agrupan las partículas para garantizar la homogeneidad del material terminado, como es durante la fabricación de medicamentos, tóner de la impresora, cosméticos, aleaciones metálicas, etc. [3].

En los últimos años, una gran cantidad de técnicas de agrupamiento basados en el análisis del comportamiento de la trayectoria se han desarrollado aplicándolos concretamente a los modelos de energía a gran escala PSDA.

El primero de los trabajos sobre la identificación PSDA se basó en el análisis granulométrico; la prueba consistió en la medición volumétrica para evaluar la distribución del tamaño de partícula de un material granular, garantizándose la homogeneidad del material agrupado según su trayectoria.

En la actualidad, es posible modificar las variables de proceso, inclusive en diferentes secciones de los dispositivos industriales, con el fin de modificar los parámetros de agrupación de las partículas, de forma tal que proporcionen un máximo rendimiento (químico, físico o eléctrico), una mejor distribución de propiedades mecánicas, o una mejor separación de acuerdo a los requisitos del proceso.

En este trabajo se propone un método de agrupación jerárquica en línea basado en técnicas de reconocimiento de patrones para la agrupación automática de trayectorias de un sistema en movimiento representando las trayectorias de las partículas.

Para la evaluación de la teoría planteada en el artículo se utilizó un modelo computacional el cual consiste en suspender partículas dentro de un canal de agua con un fluido laminar, tomando en cuenta el modelo de la trayectoria de movimiento Newtoniano.

Cabe destacar que el prototipo físico funcionando se encuentra en el proceso final de construcción y, en un futuro, se pretende llevar a cabo la comparación del modelo matemático presentado en el actual trabajo contra el modelo físico de laboratorio.

[A] Agrupación usando la definición de movimiento de trayectorias

Una manera práctica de identificar los grupos es suponiendo que existen un conjunto $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_q\}$ de q objetos o trayectorias con m características medibles o calculadas descritas en la forma $Ch = \{ch_1, ch_2, \dots, ch_m\}$.

En este contexto podemos asociar las m características representadas por sus parámetros dinámicos como podrían ser la velocidad, posición, aceleración o alguna combinación de ellas. En la tabla 1 describimos los q objetos con las m características medibles.

	Q_1	Q_2	...	Q_r	...	Q_q
ch_1	X_{11}	X_{21}	...	X_{r1}	...	X_{q1}

$\overset{\wedge}{ch}_k$	\hat{X}_{1k}	\hat{X}_{2k}	\dots	\hat{X}_{rk}	\dots	\hat{X}_{qk}
$\overset{\wedge}{ch}_m$	\hat{X}_{1m}	\hat{X}_{2m}	\dots	\hat{X}_{rm}	\dots	\hat{X}_{qm}

Tabla 1 Representación de los Q objetos asociando las m características

Tomando ahora $\hat{X}_r(t)$ como un vector que describe el movimiento del objeto seleccionado correspondiente a la particular Q la información puede ser planteada de la siguiente manera en una matriz de $n \times q$ [4].

$$U = [\hat{X}_1 \quad \hat{X}_2 \quad \dots \quad \hat{X}_r \quad \dots \quad \hat{X}_q] = \begin{bmatrix} \hat{X}_1(t_1) & \hat{X}_2(t_1) & \dots & \hat{X}_r(t_1) & \dots & \hat{X}_q(t_1) \\ \hat{X}_1(t_2) & \hat{X}_2(t_2) & \dots & \hat{X}_r(t_2) & \dots & \hat{X}_q(t_2) \\ M & M & O & M & O & M \\ \hat{X}_1(t_n) & \hat{X}_2(t_n) & \dots & \hat{X}_r(t_n) & \dots & \hat{X}_q(t_n) \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

donde t_n es el tiempo discreto.

La idea principal del artículo es que en cada instante del tiempo se realice un agrupamiento de los objetos con mayor similitud en su comportamiento dinámico, tomando en cuenta las características medibles $\overset{\wedge}{ch}$.

Para ser de interés general y de utilidad práctica, el proceso debe llevarse a cabo sin ningún tipo de conocimiento previo sobre el número y el contenido de los grupos que se obtienen. Además la agrupación obtenida también debe ser dinámica, en el sentido de que los grupos deben evolucionar a través del tiempo para que coincida con los cambios en el sistema [5].

[B] Medidas de similitud

Suponga que $\hat{X}_u(t)$ y $\hat{X}_v(t)$ representan la evolución en el tiempo de dos trayectorias de dos partículas de (1), con los siguientes componentes

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_u(t) &= [X_u(t_1), X_u(t_2), \dots, X_u(t_l), \dots, X_u(t_n)]^T \\ \mathbf{X}_v(t) &= [X_v(t_1), X_v(t_2), \dots, X_v(t_l), \dots, X_v(t_n)]^T \end{aligned} \quad (2)$$

La distancia euclidiana entre estas muestras ($\mathbf{x}_u(t_l)$ y $\mathbf{x}_v(t_l)$) en un tiempo determinado t es

$$d_{u,v} = \|\mathbf{X}_u(t_l), \mathbf{X}_v(t_l)\| = \sqrt{\sum_{k=1}^m (X_{uk}(t_l) - X_{vk}(t_l))^2} \geq 0 \quad (3)$$

La teoría PSDA se basa en el análisis de los vectores de distancia entre trayectorias [6] y [7]. La siguiente figura ilustra las combinaciones posibles de la matriz (1) por medio de una representación de todos contra todos [8], [9] y [10].

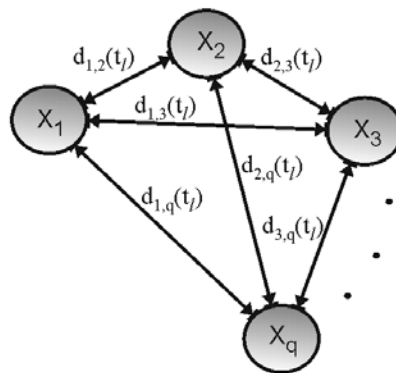


Fig. 1. Representación de todos contra todos en un tiempo t_l .

Una medida de similitud puede ser planteada de la siguiente manera [11], [12] y [13]: dos trayectorias $\mathbf{x}_u, \mathbf{x}_v$ son similares si se encuentran dentro de una región acotada por un término de distancia épsilon, es decir, $d_{u,v} \leq \varepsilon$ (ver Fig. 2). En la Fig. 2 se muestran todos los posibles casos de similitud.

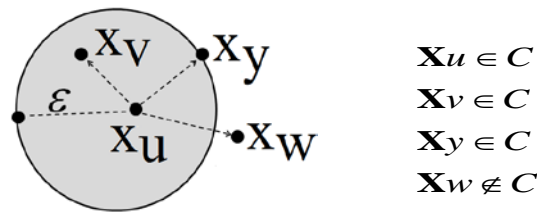


Fig. 2. Casos posibles para la clasificación de las medidas de similitud.

[C] Modelo de una partícula en un canal de agua con fluido laminar

Para el modelado de la partícula en el canal recto con agua y flujo laminar es necesario separar el problema en dos partes. La primera consiste en determinar el comportamiento dinámico del flujo laminar usando el conjunto de ecuaciones para líquidos descritas en [1]. Mientras que el segundo comportamiento corresponde a la dinámica de la partícula en la cual se utilizaron las ecuaciones de movimiento de Newton [2].

El objetivo del estudio es evaluar la cinética de la posición, velocidad y aceleración de un conjunto de partículas en una corriente con bajo fluido junto con la interacción de la fuerza gravitatoria. Calculando la posición final de la partícula y, aquellas cuyo punto final sea congruente con una epsilon determinada serán propuestas en un solo clúster.

La ecuación de movimiento de un líquido Newtoniano es descrita por [2]:

$$\Gamma = \mu \frac{du}{dy} \tag{4}$$

donde Γ es el esfuerzo de corte ejercido por el fluido, μ la viscosidad del fluido y du/dy es la velocidad perpendicular a la dirección de corte.

El movimiento de la partícula se modela considerando que se localiza la posición $x(t)$, la velocidad $v(t)$ y la aceleración $a(t)$ en la segunda ecuación de movimiento de Newton [1] definida por:

$$F = m \frac{dv}{dt} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 d(u,v) &= 1 \text{ if } \|\mathbf{X}_u, \mathbf{X}_v\| \leq \varepsilon \\
 d(u,v) &= 0 \text{ if } \|\mathbf{X}_u, \mathbf{X}_v\| > \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Será considerado dentro del cluster marcado con un uno lógico si la distancia entre las dos partículas es menor de épsilon y cero lógico en caso contrario.

3. En caso de ser resultado cero lógico es necesario crear un nuevo clúster, como se muestra en la Fig. 3, como puede observarse, la partícula c tiene una distancia lógica igual a cero con las partículas a y b por lo cual es necesario crear un nuevo grupo.

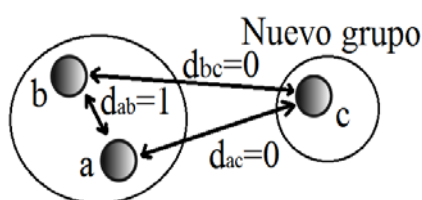


Fig. 3. Creación de un nuevo grupo.

4. Cuando existan más de un grupo se tomará la mínima distancia aquella que resulte menor de elemento a elemento de todos los objetos de un grupo, como se muestra en la Fig. 4 la fuerte relación existente entre el objeto X_i y el objeto X_j .

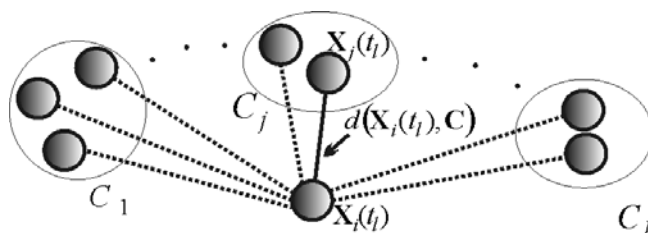


Fig. 4. Representación de la mínima distancia entre un objeto X_i y una serie de grupos.

5. Finalmente, las combinaciones entre las partículas y los clúster se pueden mostrar en una representación por medio de un dendrograma.

En el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. 5 se puede observar:

- Al inicio del programa se evalúan todos los índices de distancia entre las partículas.
- A continuación se evalúa la matriz triangular superior.
- Se forman las medidas de similaridad pasando a un sistema binario las distancias de los objetos u y v .
- Si la medida de similiaridad es verdadera (uno lógico) se agruparan los objetos dentro de un solo cluster.
- En caso contrario es decir la medidade similaridad sea falsa se propone un nuevo cluster con el objeto v como objeto inicial.

fueron adaptadas respectivamente con una entrada y una salida de fluido con dimensiones de 1 in, además, a lo largo del tubo se instalaron tres orificios de salida ubicados a 1.6, 1.8 y 2.0 metros de la entrada que actuaron como captadores de partículas separadas por gravimetría.

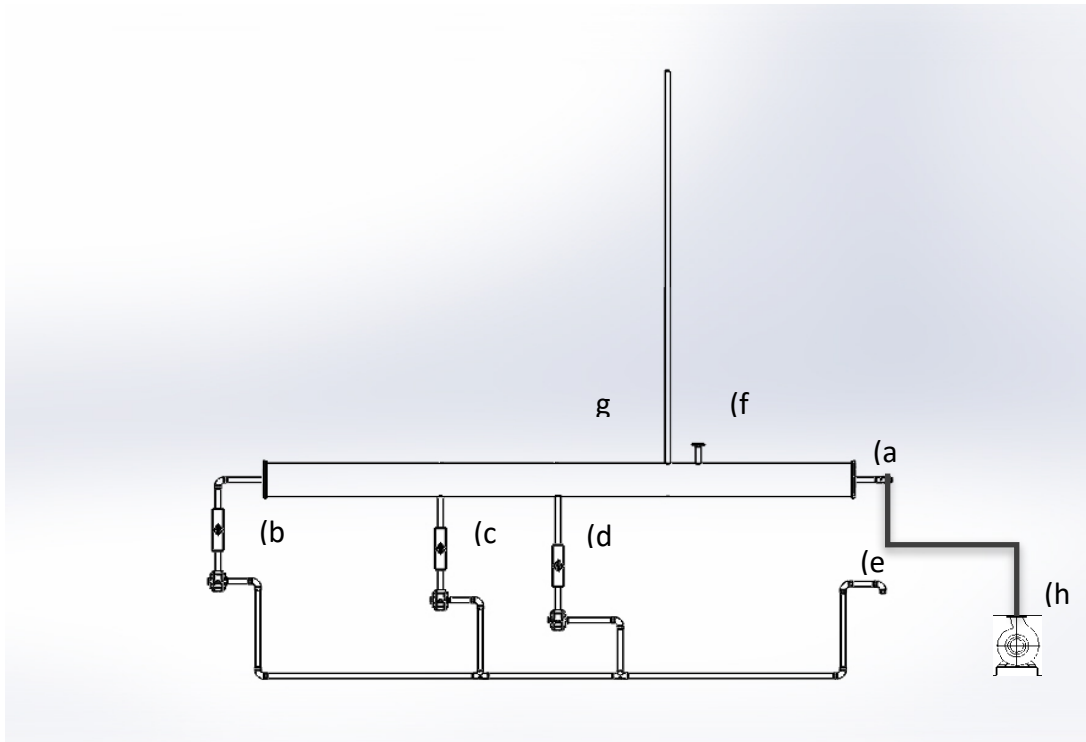


Fig. 6. Prototipo para el modelado de separación de partículas por el método de Clusters.
a) Entrada de fluido, b) c) d) Salidas con filtro para colección de diferentes partículas, e) Retorno, f) Apertura para alimentación de partículas, g) Piezómetro, h) Entrada de líquido con conexión a una bomba.

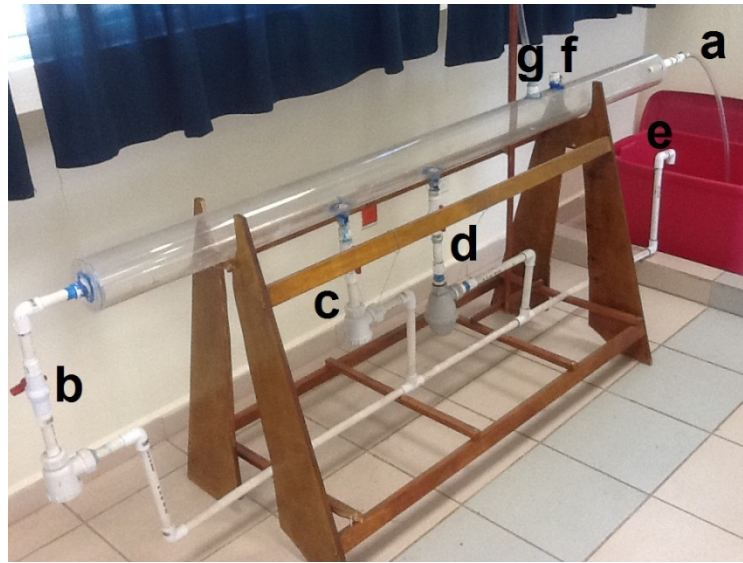


Fig. 7. Prototipo experimental para el modelado de conceptos de mecánica de fluidos.

El prototipo construido permite simular procesos industriales que pueden ser complementados con programas de simulación como el presentado en este trabajo, además de que fue diseñado para demostrar experimentalmente diferentes conceptos de la unidad de aprendizaje de *Mecánica de Fluidos*, entre los conceptos que pueden demostrarse mediante la realización de diferentes prácticas, se encuentran los siguientes:

- i. Tipos de flujo: laminar, turbulento, unidimensional, bidimensional, tridimensional, natural, forzado, viscoso, no viscoso, estacionario, transitorio, etc.
- ii. Fuerza sobre superficies: Permite calcular la fuerza requerida en las tapas para poder soportar fluidos con diferentes densidades.
- lii. Ecuación de continuidad: Los flujos en las diferentes salidas, así como en la entrada pueden ajustarse de manera que se pueda determinar alguna de las propiedades de alguna rama utilizando la ecuación de continuidad.
- iv. Cálculo de potencia y eficiencia de bombas: se puede calcular la eficiencia de diferentes bombas comerciales así como la potencia requerida para satisfacer diferentes demandas de flujo.

- v. Pérdidas de carga: Se pueden calcular las pérdidas de carga asociadas a el diseño del dispositivo, incluyendo material, diámetros de tubería, velocidades, etc.

3. Resultados

Para ejemplificar la técnica de agrupación jerárquica se utilizaron nueve partículas en movimiento, dentro de un canal rectangular con un flujo laminar. Las partículas y flujo laminar se modelan explícitamente utilizando el conjunto de fluidos newtonianos, formulación (4-8). La Fig. 6 muestra el canal y nueve partículas antes de ser arrojadas en el fluido laminar.

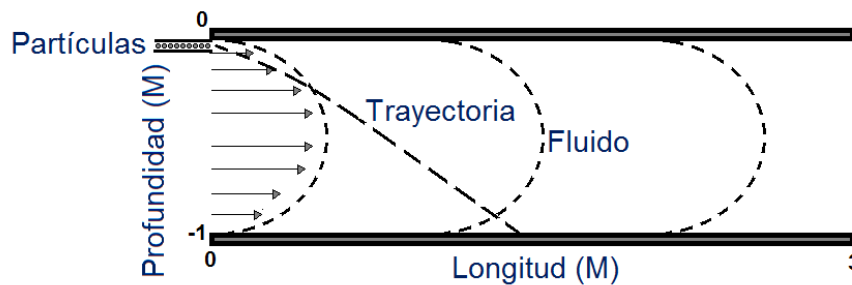


Fig. 6. Flujo laminar en 2d del canal rectangular.

Nueve esferas con similar tamaño fueron seleccionadas en la prueba. La tabla 2 muestra las propiedades de cada una de ellas.

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8	m_9
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Radio (mm)	15.52	15.52	15.51	15.51	16.50	15.50	15.51	15.52	15.51
Densidad (kg/m³)	1360	1100	1215	1366	1222	1220	1358	1221	1115

Tabla 2. Propiedades de las partículas.

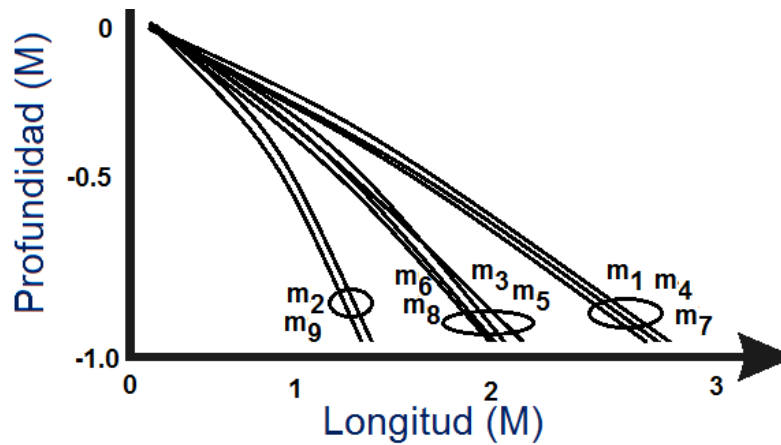


Fig. 7. Trayectoria de las nueve partículas.

La Fig. 7 muestra el comportamiento de las nueve partículas dentro del fluido laminar. Una inspección visual de las trayectorias indica claramente la formación de tres grupos. Tal como fue corroborado por el estudio de agrupación jerárquica mostrado en la Fig. 8.

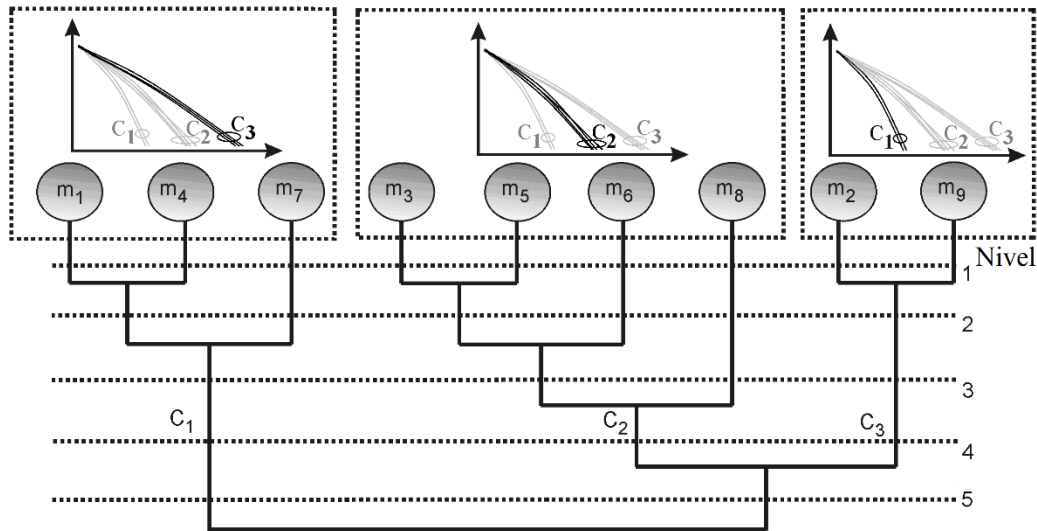


Fig. 8. Dendrograma mostrando tres grupos plenamente identificados.

Las simulaciones presentadas en esta sección fueron comparadas con las observaciones realizadas en el prototipo experimental construido. Para ello se introdujeron esferas de diferentes densidades pero del mismo tamaño a través de la alimentación, utilizando un flujo laminar y estacionario. Las partículas se separaron en las tres salidas del prototipo con mayor cantidad de partículas de alta densidad en la primer salida. Una mezcla de ambas en la segunda salida y partículas de baja densidad en la última salida. De acuerdo a lo mostrado en la simulación, la mayor cantidad de partículas con una combinación de radio y densidad grande se separan en las zonas más próximas a la entrada mientras que las partículas de menor relación radio-densidad se separan en las zonas más alejadas de la entrada.

4. Conclusiones

La agrupación de las trayectorias de objetos es un problema complejo. En este trabajo, se propone un método de agrupamiento jerárquico basado en técnicas de reconocimiento de patrones para el análisis automatizado de las trayectorias de movimiento del sistema.

La representación de agrupamiento jerárquico tiene varias ventajas sobre otras técnicas más heurísticas permitiendo una detección robusta y con velocidades de procesamiento elevadas. Aunque las observaciones realizadas en el prototipo experimental permiten corroborar de manera cualitativa los resultados obtenidos mediante la simulación, es necesario realizar pruebas más detalladas con características idénticas a las utilizadas en la simulación ó viceversa con el fin de obtener datos estadísticos que permitan conocer de manera exacta la aproximación del modelo con la parte experimental, ésta será la dirección inmediata del trabajo.

6. Referencias

- [1] J. Dinesh, "Modeling and simulation of a single particle in Laminar Flow Regime of a Newtonian Liquid", Excerpt from the Proceedings of the COMSOL conference 2009 Bangalore.
- [2] Patankar, N. A., Singh, P., Joseph, D.D. Glowinski, R., and Pan, "A new formulation of the distributed Lagrange multiplier/fictitious domain method for particulate flows" *International Journal of multiphase Flow*, Vol. 26 (9),2000, pp.1509-1524.
- [3] Jain K. Anil and Dubes C. R. "Algorithms for clustering data", Prentice Hall , ISBN 022278-X, pp. 53-66, New Jersey1988.
- [4] J. J. E. Slotine and W. Wang, "A study of synchronization and group cooperation using partial contraction theory", Springer-Verlag, 2003.
- [5] R. Podmore, "Identification of coherent generators for dynamic equivalents," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-97, No. 4, pp. 1344–1354, July/August 1978.
- [6] C. Juarez T., A.R. Messina, D. Ruiz-Vega, "Analysis and control of the inter-area mode phenomenon using selective one-machine infinite bus dynamic

equivalents”, *Electric Power Systems Research*, vol. 76, Issue 4, January 2006, Pages 180-193.

- [7] C. Juarez and A.M. Stankovic, “Contraction analysis of power system dynamics using time-varying OMIB equivalents”, in *North American Power Symposium*, Sep. 30 – Oct. 2, 2007.
- [8] T. Schreiber and A. Schmitz, “Classification of time series data with nonlinear similarity measures”, *Physical Review Letters*, vol. 79 (8), 1997, pp. 1475-1478.
- [9] Anderberg M. R. “Cluster analysis for applications”, Academic Press, Inc., New York 1973.
- [10] J. Alon, S. Sclaroff, and G. Kollios, “Discovering clusters in motion time-series data”, Boston University Computer Science Tech. Report No. 2003-008, to appear in *Proc. IEEE CVPR*, Jun. 2003.
- [11] C. Piciarelli and G.L. Foresti “On-line trajectory clustering for anomalous events detection”, *Pattern Recognition Letters*, vol. 27, Issue 15, pp. 1835-1842, Nov. 2006
- [12] Sneath, P. “The application of computers to taxonomy”, *Journal of General Microbiology*, 1957.
- [13] Clifford, H and W. Stephenson, “An introduction to Numerical Taxonomy, New York: Academic Prees. 1975.

7. Autores

Dr. Carlos Juárez Toledo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y 2008 respectivamente, desarrollo una estancia doctoral en el departamento de Eléctrica y Computación de NU, Boston, Massachussets en 2005 y una estancia posdoctoral en la

Facultad de Ingeniería Eléctrica en la UNAM en 2008-2009. Actualmente es profesor de tiempo completo en la UAEMex.

Dra. Irma Martínez Carrillo obtuvo su título de Maestría y Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV, Unidad Guadalajara, 2003 y 2008 respectivamente, Ganadora de los certámenes nacionales de tesis en el área de Informática y Control a nivel Maestría y Doctorado en 2005 y 2009. Actualmente es profesora de tiempo completo en la UAEMex.

Irma Hernández Casco obtuvo su título de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Metalúrgica y Cerámica en el CINVESTAV unidad Saltillo. Ganadora del premio Tecnos 2005, Monterrey. Actualmente es profesora de tiempo completo en la UAEMex.