

## SINCRONIZACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA DE SENSORES BASADA EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS LUCIÉRNAGAS

Payán-Ramírez, Oscar Francisco<sup>1</sup>; González-Landaeta<sup>1</sup>, Rafael Eliecer; Díaz-Roman<sup>1</sup>, José; Sifuentes-de la Hoya<sup>1</sup>, Ernesto; Mederos-Madrado<sup>1</sup>, Boris Jesús; Cota-Ruiz<sup>1</sup>, Juan de Dios

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez  
Av. Del Charro 450 Norte, C.P. 32310, Juárez, Chihuahua, Tel. (656) 6884801,

Correo: [al160560@alumnos.uacj.mx](mailto:al160560@alumnos.uacj.mx), [rafael.gonzalez@uacj.mx](mailto:rafael.gonzalez@uacj.mx), [david.roman@uacj.mx](mailto:david.roman@uacj.mx),  
[esifuent@uacj.mx](mailto:esifuent@uacj.mx), [Boris.mederos@uacj.mx](mailto:Boris.mederos@uacj.mx), [jcota@uacj.mx](mailto:jcota@uacj.mx)

**Resumen**— En la actualidad existe un amplio campo de aplicación de redes de sensores, el cual va desde agricultura de precisión, monitoreo de tráfico, detección de incendios forestales, domótica hasta la vigilancia en campo de batalla, por mencionar algunas. Para este tipo de aplicaciones las redes de sensores no solamente necesitan de dispositivos de alta tecnología en su sistema de sensado y actuación, sino además requieren de estrategias complejas que le permitan a sus elementos interactuar entre sí. Uno de los puntos clave para una interacción exitosa es la sincronización. Como ya es sabido la naturaleza ha sido una formidable fuente de inspiración para encontrar solución a un sin número de problemas, y el fenómeno de la sincronización no es la excepción. Tal vez considerado como el fenómeno más destacado de sincronización; se encuentra el caso de como un grupo de luciérnagas macho sincronizan sus señales luminosas con propósitos de apareamiento. En esta investigación se presenta una estrategia de sincronización para redes inalámbricas de sensores, la cual emula el modelo natural de sincronización luminosa de las luciérnagas. Resultados simulados muestran como un grupo de osciladores inicialmente desfasados convergen en un tiempo en común implementando esta estrategia.

**Índice de Términos**—modelo bioinspirado, osciladores acoplados por pulsos, sincronización, WSN.

### I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la interacción con sensores es una actividad de lo más común. Básicamente se encuentran por todos lados que ya hasta se puede considerar que forman parte de la rutina diaria. Desde teléfonos celulares, electrodomésticos hasta dispositivos para aplicaciones más específicas como detectores de CO<sub>2</sub>, son solo algunos ejemplos de la inmensa variedad de dispositivos que hacen uso de sensores.

Aunque los sensores se han desarrollado desde ya hace tiempo, el concepto de red de sensores WSN (Wireless Sensors Network por sus siglas en inglés) es relativamente reciente. El origen de las investigaciones de redes de sensores fue inspirada por aplicaciones militares y podría acreditarse al programa de desarrollo de redes distribuidas de sensores (DSN por sus siglas en inglés) de la agencia de investigación de proyectos avanzados de defensa de los Estados Unidos (DARPA) alrededor de los años 80's [1]. La visión de DSNs a grandes rasgos consistía en nodos sensores de bajo costo distribuidos espacialmente, los cuales colaborarían

mutuamente entre ellos de una manera autónoma. Aun cuando los investigadores tenían la visión de red de sensores clara en sus mentes, había un factor que impedía su óptimo desarrollo: la tecnología en esa época aun no era lo suficientemente sofisticada.

Posteriormente, alrededor del año 1998 podría considerarse que surgió una nueva era en el campo de desarrollo de las redes de sensores. Los avances de la tecnología de esa época en las áreas de computación, comunicación y electrónica contribuyeron a que la investigación nuevamente tomara rumbo hacia la visión original [1]. Esta nueva era se ha enfocado principalmente en el desarrollo de redes de sensores inalámbricos para ambientes altamente dinámicos. En la actualidad existe un amplio campo de aplicación de redes de sensores, el cual va desde agricultura de precisión, monitoreo de tráfico, detección de incendios forestales, domótica hasta la vigilancia en campo de batalla, por mencionar algunas.

Las redes de sensores no solamente necesitan de dispositivos de alta tecnología en su sistema de sensado y actuación, sino además requieren de estrategias complejas que le permitan a sus elementos interactuar entre sí. Uno de los puntos clave para una interacción exitosa es la sincronización. Por ejemplo, sea el caso de una red de sensores que se esparce a lo largo de una zona forestal, y cuyo objetivo es detectar e inmediatamente alertar el inicio de un incendio. En esta aplicación la sincronización entre nodos es de suma importancia para realizar operaciones como comunicación cooperativa, calendarización de periodos de tiempo en que los nodos permanecen en bajo consumo de energía, muestreo de datos en periodos fijos de tiempo, técnicas para estimar la localización de nodos, entre otras. Sin embargo, no bastaría con sincronizar el tiempo de los nodos solo una vez, debido a la imperfección de los mecanismos de reloj y a otros parámetros que afectan su funcionamiento como temperatura, humedad y nivel de voltaje. De lo anterior, resulta evidente que una red de sensores necesita una estrategia que le brinde la capacidad de mantener alineados a los nodos de la red en tiempo.

En el presente trabajo se muestra una estrategia para sincronizar los relojes internos de nodos independientes que constituyen una red inalámbrica de sensores. La estrategia se basa en un modelo matemático, el cual emula la manera en que un grupo de luciérnagas sincronizan sus señales

luminosas.

Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera. La sección II describe investigaciones relacionadas con la sincronización en redes. En la sección III se presenta el modelo de sincronización de las luciérnagas. Posteriormente la sección IV muestra los resultados obtenidos y finalmente en la sección V las conclusiones.

## II. PROTOCOLOS DE SINCRONIZACIÓN

La sincronización es una profunda tendencia hacia el orden, es uno de los fenómenos más dominantes en la naturaleza, presenta un gran rango de ejemplos, que se extiende desde los átomos a los animales, de las personas a los planetas [2], como cuando dos corazones laten al mismo tiempo, cuando el público adopta colectivamente un ritmo durante un concierto o cuando las chicharras emiten sonidos que parecen convertirse en uno solo, entre muchos otros.

La incógnita que plantea la sincronización en redes es cómo lograr que los relojes internos de cada nodo se alineen en fase a pesar de factores externos e internos que pudieran producir un desfase. Con el transcurso de los años se han propuesto diferentes estrategias para resolver esta incógnita, sin embargo, aún no existe una solución definitiva. Elson et al., proponen en [3] el protocolo de sincronización RBS (Reference Broadcast Synchronization). El enfoque de este método es del tipo receptor-receptor. A grandes rasgos, un nodo transmisor emite una serie de paquetes a nodos adyacentes. A continuación, los nodos adyacentes registran el tiempo de recepción de cada paquete e intercambian esta información entre receptores. Así pues, cada nodo calcula el desfase de los tiempos registrados por cada receptor y finalmente ajusta su reloj al valor obtenido.

Por otro lado en [4] Ganeriwat et al., presenta el protocolo de sincronización TPSN (Timing-sync Protocol for Sensors Network). Este protocolo se compone de dos fases. Primeramente la fase de descubrimiento de niveles y posteriormente la de sincronización. La fase de descubrimiento de niveles trata de identificar los nodos en la red y clasificarlos en cierto nivel o capa en función de su distancia a un nodo de referencia. Mientras la fase de sincronización es del tipo emisor-receptor y se basa en la comunicación bidireccional entre dos nodos. Es decir, un nodo emisor transmite a otro nodo un mensaje con una marca de tiempo  $T_1$  en el que fue enviado, el nodo receptor lo recibe y registra el tiempo de recibido  $T_2$ , luego el nodo receptor lo envía de vuelta al emisor en un tiempo  $T_3$ , por último el nodo emisor lo recibe y registra en un tiempo  $T_4$ . Así pues, con esta información el nodo emisor es capaz de calcular el promedio de desfases de tiempo ( $T_1-T_2$ ,  $T_3-T_4$ ) y ajustar su reloj. Entonces, la sincronización entera de la red se realiza aplicando la comunicación bidireccional para sincronizar cada nodo del nivel 1 con el nodo de referencia en el nivel 0, luego los del nivel 2 con los del nivel 1 así sucesivamente hasta sincronizar el último nivel.

A su vez Sinan et al., explica en [5] el protocolo de

sincronización FTSP (Flooding Time Synchronization Protocol). FTSP es similar al protocolo TPSN, es decir, es del tipo emisor-receptor y los nodos se sincronizan a un nodo raíz. Sin embargo, FTSP no utiliza comunicación bidireccional para sincronizar los nodos y su lógica le permite adaptarse a cambios dinámicos en la topología de la red. En términos generales, un nodo raíz transmite un mensaje que contiene la marca de tiempo en el que fue enviado, entonces los nodos alrededor de él lo reciben y registran el tiempo de llegada. Posteriormente, cada nodo calcula el desfase en relación a los tiempos registrados utilizando una regresión lineal y finalmente ajustan su reloj. La regresión lineal permite a cada nodo estimar los valores de reloj futuros sin la necesidad de comunicarse frecuentemente con el nodo raíz. Es importante mencionar, que el nodo raíz es dinámico y se selecciona periódicamente, lo que le brinda a la red la capacidad de sobreponerse a fallas de nodos y cambios dinámicos en su topología.

## III. MODELO DE SINCRONIZACIÓN DE LAS LUCIÉRNAGAS

El termino oscilador se puede comprender como cualquier sistema que posee un comportamiento periódico, tal es el caso de un péndulo con su movimiento oscilatorio, las luciérnagas con el parpadeo de sus señales luminosas, o un nodo de una red con su frecuencia de operación regida por su reloj interno. Por otro lado, el concepto de “osciladores acoplados por pulsos” fue introducido alrededor del año 1665 por el físico matemático Christian Huygens, quien descubrió que dos relojes de péndulos colocados en la pared de su cuarto habían sincronizado sus movimientos de forma misteriosa [6]. Notó que si los detenía y los volvía a poner en marcha, los péndulos iniciaban su balanceo de forma desfasada, pero al cabo de un tiempo volvían a sincronizarse perfectamente. Huygens decidió diseñar un experimento para comprobar su teoría: cambió uno de los relojes a otra pared, espero a ver si se sincronizaban. Al cabo del tiempo los relojes seguían marchando cada uno a su propio ritmo, concluyó que su teoría era correcta pues era el acoplamiento de los relojes a través de la pared lo que generaba la sincronización entre ellos. Tomando como base este antecedente, en el año 1975, Charlie Peskin propuso un modelo de sincronización de un sistema de osciladores acoplados a pulsos para describir el comportamiento de las células que componen el marcapasos natural del corazón [7]. Peskin modeló el sistema como una red de  $N$  osciladores (células) acoplados por pulsos (señales eléctricas) en donde cada uno está caracterizado por un estado  $x$  que se encuentra comprendido en el rango  $[0,1]$  y varía con el tiempo tal que satisface:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = S_0 - \gamma x_i(t), \quad 0 \leq x_i(t) \leq 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

Donde  $S_0$  representa el estado máximo (región de disparo) y  $\gamma x_i(t)$  el factor de carga. La interacción del sistema queda explicada de la siguiente manera: cuando un oscilador con el

transcurso del tiempo  $x_i(t)$  alcanza el estado  $I$  se realizan dos acciones, primeramente el oscilador  $i$  emite un pulso e inmediatamente restablece su estado a  $0$ . A su vez, los otros osciladores al percibir el pulso emitido ajustan su estado por una cantidad  $\varepsilon$ , la cual los hace aproximarse o alcanzar el estado de disparo (equivalente a  $I$ ).

$$x_i(t) = 1 \Rightarrow x_j(t^+) = \min(1, x_j(t) + \varepsilon) \quad \forall j \neq i \quad (2)$$

Posteriormente, R. Mirollo y S. Strogatz extendieron el trabajo de Peskin. En 1990 publicaron un artículo en el cual demostraron la sincronización para un sistema de  $N$  osciladores con comportamientos no lineales [7]. Es decir, Mirollo-Strogatz asumieron que el estado  $x$  de un oscilador cambia en relación a la expresión:

$$x = f(\phi) = C(1 - e^{-\gamma T \phi}) \quad (3)$$

Donde  $C = 1/(1 - e^{-\gamma})$ , periodo  $T = \gamma^{-1} \ln[S_o/(S_o - \gamma)]$  y  $\phi$  representa la variable de fase cuyo valor está en función del tiempo y se encuentra en el rango  $[0,1]$  de tal manera que cuando  $\phi = 0$  el estado del oscilador es  $x = f(0) = 0$  y cuando  $\phi = 1$  el estado del oscilador es  $x = f(1) = 1$  (Figura 1).

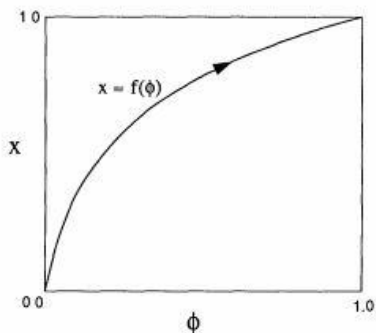


Fig. 1. Modelo de sincronización no lineal Mirollo-Strogatz.

La interacción de sistemas de osciladores a través del modelo Mirollo-Strogatz permitió la explicación de la sincronización en sistemas tales como luciérnagas, células cardíacas y neuronas, entre otros. Son justamente los pulsos que posibilitan el acoplamiento en ensambles de los osciladores [8].

#### IV. RESULTADOS

El comportamiento del modelo de sincronización se simuló en Matlab 2016 primeramente considerando el escenario mostrado en la Figura 2 compuesto por dos osciladores A y B, los cuales en condiciones iniciales se encuentran desfasados, un valor de ajuste  $\varepsilon = 0.02$ ,  $S_o = 10$  y  $\gamma = 9.9$ .

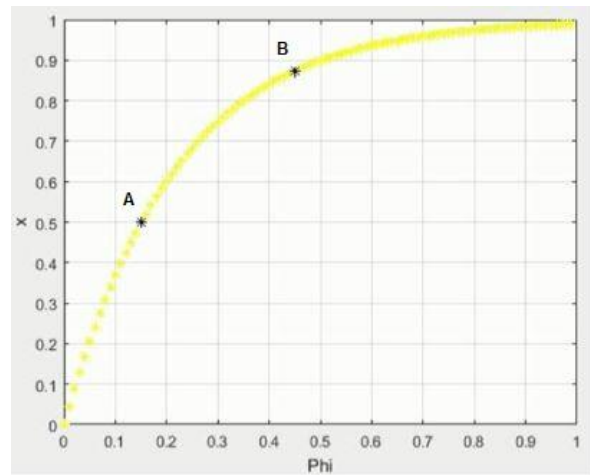


Fig. 2. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de dos osciladores inicialmente desfasados.

Al transcurrir el tiempo, el oscilador B alcanza primero el estado  $x = f(1) = 1$  (Figura 3).

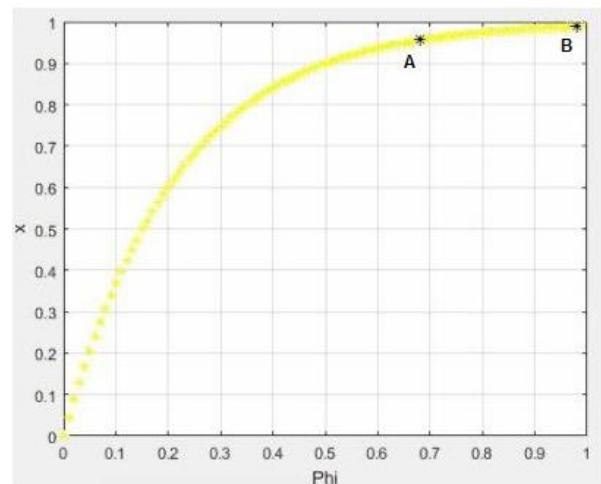


Fig. 3. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de dos osciladores. Instante en el cual el oscilador B alcanza el punto de disparo.

Entonces, considerando la interacción del sistema explicada por el modelo de Peskin, en el preciso momento en que el oscilador B alcanza el estado  $I$  emite un pulso e inmediatamente restablece su estado  $0$ , mientras que el oscilador A al percibir el pulso emitido ajusta su estado por una cantidad  $\varepsilon$  la cual lo hace aproximarse más rápidamente a su estado de disparo (Figura 4).

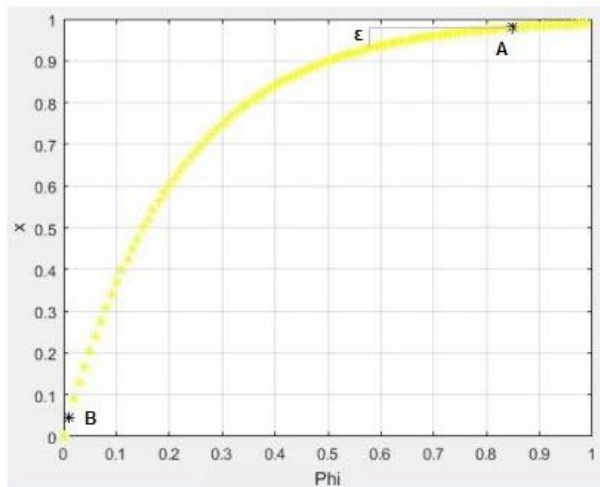


Fig. 4. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de dos osciladores. Instante en el cual el oscilador A ajusta su desfase.

Posteriormente es el turno del oscilador A de alcanzar el disparo y provocar que el oscilador B ajuste su desfase (Figura 5) para acercarse a su punto de disparo. El comportamiento de la función exponencial cóncava hacia abajo que siguen los nodos durante su sincronización los atrae a la zona de disparo más rápidamente cuando más cerca se encuentran de la zona de disparo y de una manera más suave en el caso contrario.

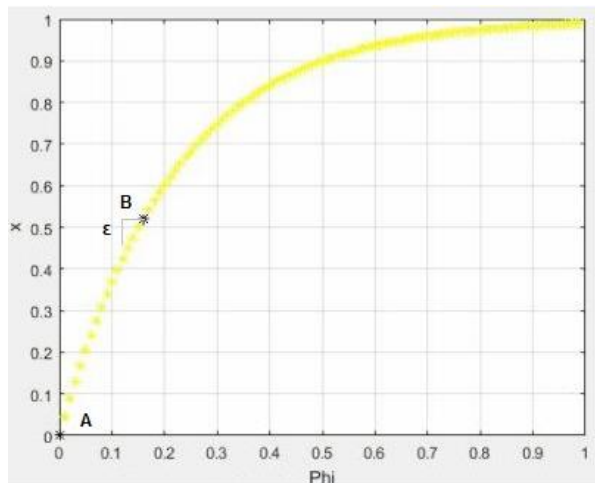


Fig. 5. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de dos osciladores. Instante en el cual el oscilador B ajusta su desfase.

El proceso de sincronización continua así sucesivamente hasta que ambos osciladores converjan en un tiempo en común (Figura 6).

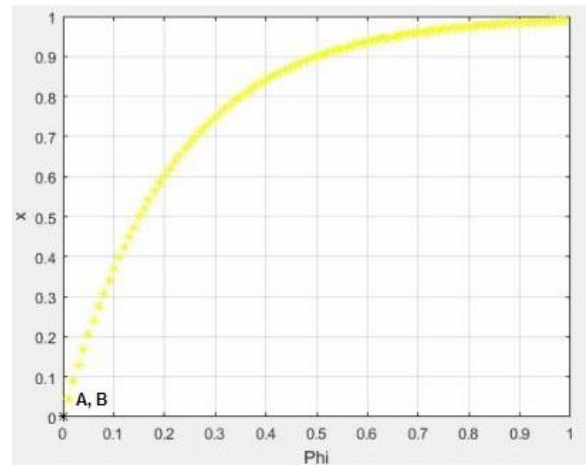
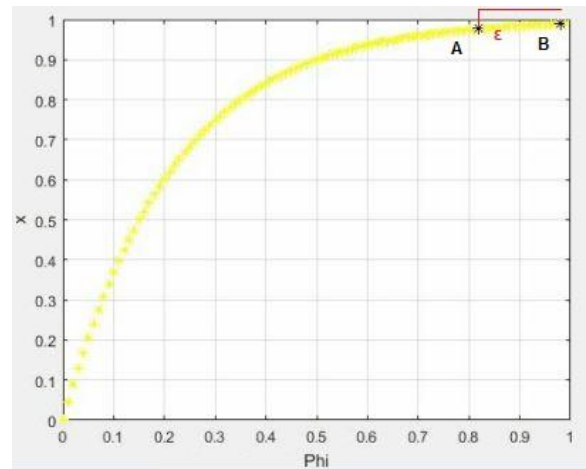


Fig. 6. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de dos osciladores. Instante en el cual los osciladores convergen en un tiempo común.

Ahora simulando un escenario compuesto por tres osciladores A, B y C inicialmente desfasados tal como se muestra en la Figura 7, un valor de ajuste  $\varepsilon = 0.02$ ,  $S_0 = 10$  y  $\gamma = 9.9$ .

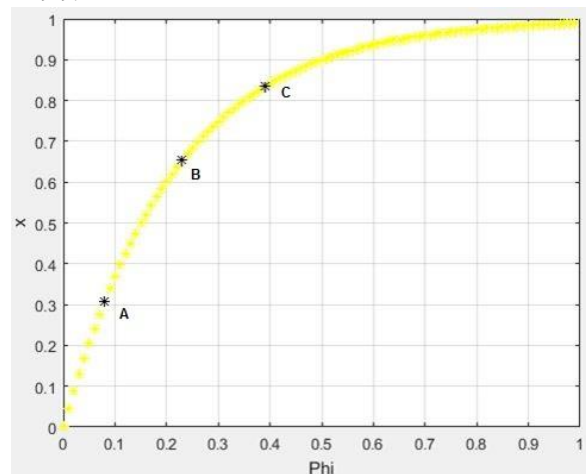


Fig. 7. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de tres osciladores inicialmente desfasados.

Al transcurrir el tiempo, el oscilador C alcanza el estado  $1$  emite un pulso y restablece su estado a  $0$ . Al percibir el pulso, el oscilador A ajusta su estado por una cantidad  $\varepsilon$  y el oscilador B es atraído al punto de disparo (Figura 8).

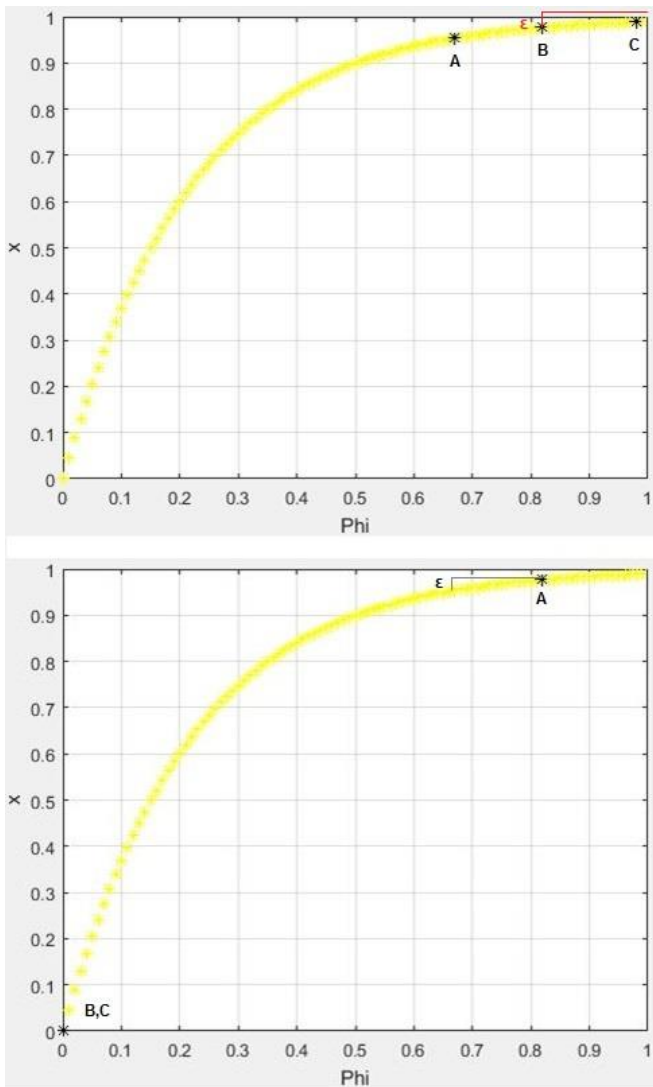


Fig. 8. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de tres osciladores. alcanza el punto de disparo.

A continuación, el oscilador A alcanza el punto de disparo y los osciladores B y C ajustan su desfase para acercarse más al dicho punto (Figura 9).

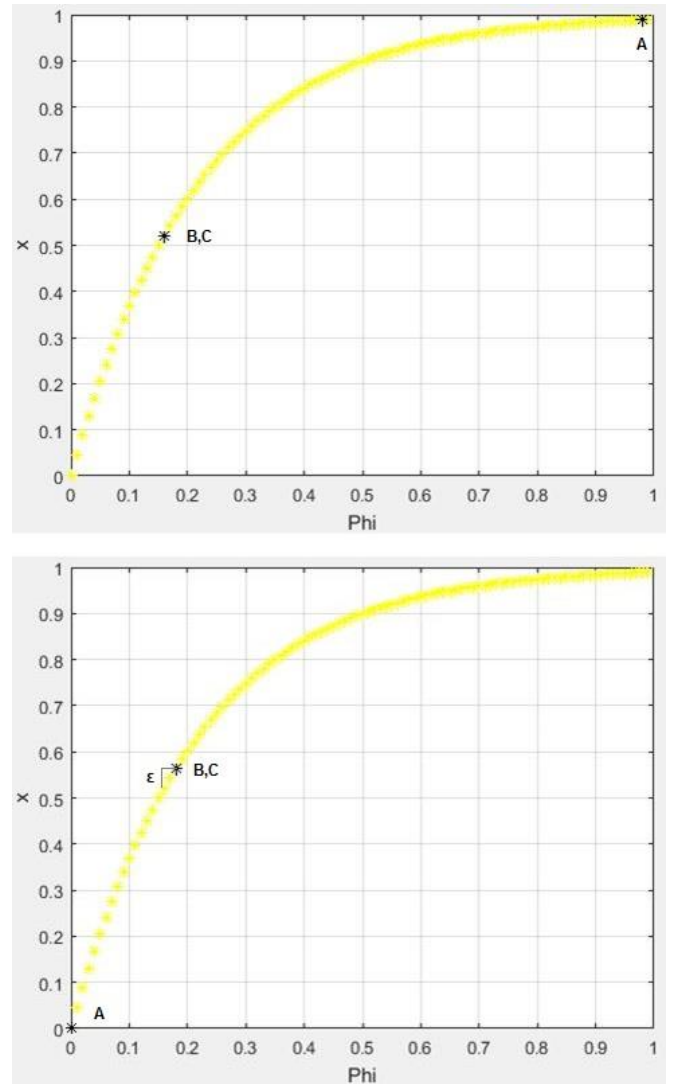


Fig. 9. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de tres osciladores. Instante en el cual el oscilador A alcanza el punto de disparo.



El proceso de sincronización finaliza cuando los osciladores B y C llegan al punto de disparo provocando que A también reestablezca su estado a 0, y así todos los osciladores converjan en un tiempo en común (Figura 10).

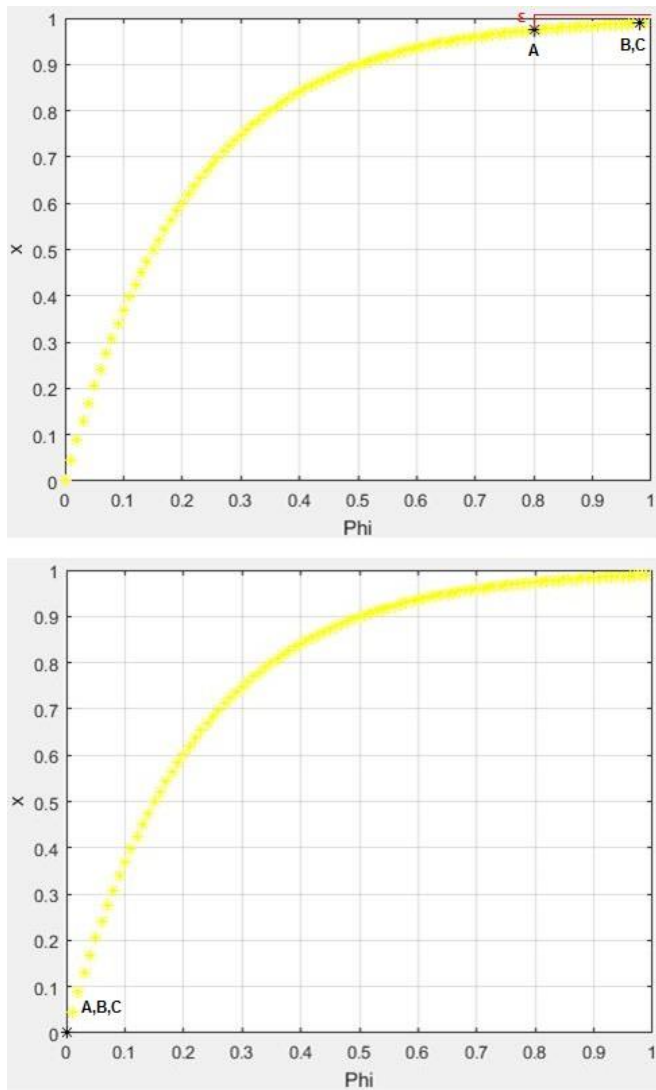


Fig. 10. Simulación del modelo de sincronización de un sistema de tres osciladores. Instante en el cual los osciladores convergen en un tiempo común.

## V. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se presentó una estrategia de sincronización bioinspirada en la manera en que las luciérnagas sincronizan sus señales luminosas. Este modelo de sincronización le brinda la capacidad a los nodos de la red (osciladores) de alinearse en tiempo de manera independiente, es decir, la red es descentralizada sin un nodo raíz que proporcione un tiempo de referencia. Además, en lo que respecta a sincronización, esta estrategia permite la adaptación a cambios dinámicos por la pérdida o adición de nodos de la red. Por ejemplo, si se añade un nodo en cualquier momento la estrategia de sincronización sería capaz de acoplarlo con la frecuencia de nodos vecinos con el transcurso del tiempo,

hasta que todo el grupo converja al mismo ritmo. Por otro lado, cabe destacar que el conjunto de parámetros  $S_0$  y  $\gamma$  del modelo de sincronización determinan la curvatura de la función exponencial. Una función exponencial cóncava hacia abajo con una curvatura suave, es decir con mayor pendiente al inicio y menor conforme se acerca al punto de disparo, permite atraer a los nodos a la zona de disparo más rápidamente cuando más cerca se encuentran a esta y de una manera más suave en el caso contrario. En el futuro se planea implementar físicamente el modelo de sincronización en una red de sensores haciendo uso de pulsos por radiofrecuencia como medio de sincronización así como considerando los tiempos de procesamiento de datos.

## REFERENCIAS

- [1] C.-Y. a. K. S. P. CHONG, «Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges,» *Proceedings of the IEEE* 91(8), pp. 1247-1256, 2003.
- [2] A. Pimentel, «Sincronización y fenómenos colectivos,» 2008.
- [3] L. G. a. D. E. J. Elson, «Fine-Grained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts,» *Proc. of the 5th Symposium on Operating System Design and Implementation*, vol. 36, n° SI, pp. 147-163, 2002.
- [4] R. K. a. M. B. S. S. Ganerwal, «Timing-sync Protocol for Sensor Networks,» de *In Proc. of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, Los Angeles, 2003.
- [5] K. S. Y. a. A. Kantarci, «Time Synchronization Based on Slow-Flooding in Wireless Sensor Networks,» *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 25, n° 1, pp. 244-253, 2014.
- [6] T. Ward, *Design and experimental results of synchronizing metronomes, inspired by Christiaan Huygens*, North Brabant: Eindhoven, 2006.
- [7] R. E. M. a. S. H. Strogatz, «Synchronization of pulse-coupled biological oscillators,» de *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1990.
- [8] J.-L. G. a. J.-L. D. G. M. Ramírez Ávila, «Revista Boliviana de física (RBF),» vol. 13, p. 13, 2007



Oscar Payán received the Engineer in Mechatronics degree from Autonomous University of Ciudad Juárez in 2014. Currently studying the master degree in Electrical Engineering at the UACJ. His current research interests include: embedded systems, smart sensors and wireless sensor networks.



Rafael González received the Engineer in Electronics degree in 1997 from the Rafael Belloso Chacín University, Maracaibo, Venezuela, and the Ph.D. in Biomedical Engineering degree in 2008 from the Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain. He has been Associated Professor at the Francisco de Miranda University, Coro, Venezuela, since 1999, teaching courses in analog electronic and biomedical sensors. Currently he is working at the

Department of Computer and Electrical Engineering, UACJ (Universidad Autónoma de Ciudad Juárez), Mexico. His current research areas include biomedical sensors and analog signal processing, noise and interference in electronic circuits and noninvasive physiological measurement.



José Díaz was born in Venezuela in 1976. He got an Electronic Engineer degree at the Polytechnic Institute of the National Armed Forces (Maracay, Venezuela) in 1997. He received his Ph.D degree in 2008 from Simón Bolívar University (Caracas, Venezuela). Between 1998 and 2016 he was part of the Electromedicine - Biomedical Engineering Program of the National Experimental University Francisco de Miranda in Coro, Venezuela. He is currently Professor attached to the Department of Computer and Electrical Engineering of the Autonomous University of Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico. His interest in teaching and research includes: Electronic and biomedical instrumentation, analog and digital signal processing, and machine learning.

Ernesto Sifuentes was born in Durango, Mexico, in 1976. He received the B.S. degree from Technological Institute of Durango (ITD), Mexico, in 2000, the M.S. degree from Technological Institute of Chihuahua (ITCH), Mexico, in 2002, and the Ph.D. degree from Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, Spain, in 2009, all in electronic engineering. Since August 2002, he has been a titular professor at the Department of Computer and Electrical Engineering, UACJ (Autonomous University of Ciudad Juárez), Mexico. His current research interests include sensor interface circuits, virtual instrumentation, embedded



systems, autonomous sensors, and wireless sensor networks.



Boris Jesús Mederos Madrazo received the B.Sc from the Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Santa Clara, Cuba, the M.Sc. and Ph.D. degree in Mathematics from the Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), Rio de Janeiro, Brazil. From 2005 to 2006, he was a post-doc at the Computer Science Department of the University of California at Davis (UC Davis). Dr. Mederos is currently with the Department of Física y Matemáticas at the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. His current teaching and research interests include pattern recognition, machine learning, medical image processing, image restoration, and surface reconstruction.



Juan Cota received his Ph.D. in Electrical and Computer Engineering at the University of Texas at El Paso (UTEP), in 2011. Currently, he works as a full research professor at the Autonomous University of Ciudad Juárez (UACJ) Mexico, since 2003. He has national and international publications on the fields of electrical engineering, and he is holder of a national patent. His current research interests include Wireless Sensor Networks, Smart Sensors, Numerical Optimization, and Control.