



(TÍTULO DEL PROYECTO)

“Estudio de sincronización cooperativa en redes de sensores”

Memoria del Proyecto Fin de Carrera  
De Ingeniería técnica de  
telecomunicaciones especialidad sistemas  
electrónicos.

realizado por

Diego Gálvez Casado.....

i dirigido por

José A. López Salcedo.....

Bellaterra,.....de.....de 200...





El sotasignat, . ..... [José A. López Salcedo](#) .....

Professor/a de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de la UAB,

**CERTIFICA:**

Que el treball a què correspon aquesta memòria ha estat realitzat sota la seva direcció per en [Diego Gálvez Casado](#).

I per tal que consti firma la present.

Signat: .....

Bellaterra, ...[03](#)...de...[Febrer](#).....de [2008](#)...



## Prólogo

---

En este proyecto se realiza el estudio de cómo en redes de sensores inalámbricos (WSN), pueden dichos sensores sincronizarse entre ellos, llegando a consenso y cooperar de forma que a partir de los parámetros obtenidos y leídos de un sensor, se pueda obtener información de la que toda la red de sensores es participe.

Motivado por una época en que la tecnología de los sensores está en evolución constante. En la actualidad cada vez hay mas adelantos técnicos sobre ellos, cada vez son más pequeños, más potentes, y más eficaces. Y cada vez son más numerosas las utilidades y aplicaciones que se les puede dar a los sensores inalámbricos y a redes formadas por ellos.

---

# INDICE DEL CONTENIDO

---

<b>1</b>	<b>-.</b>	<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>9</b>
		<i>1.1. Objetivos y motivación del proyecto.....</i>	<i>9</i>
		<i>1.2. Introducción a las redes de sensores</i>	
		<i>(Wireless Sensor Networks, WSN) .....</i>	<i>12</i>
		<i>1.3. Símil biológico de redes WSN .....</i>	<i>16</i>
<b>2</b>	<b>-.</b>	<b>AUTOSINCRONIZACIÓN DE DOS SENSORES</b>	
		<b>ACOPLADOS.....</b>	<b>17</b>
		<i>2.1 Modelo de la señal.</i>	<i>17</i>
		<i>2.2 Condiciones de convergencia (Consenso)</i>	<i>19</i>
		<i>2.2.1. Calculo del factor K</i>	<i>19</i>
		<i>2.3 Simulación con ausencia de ruido</i>	<i>22</i>
		<i>2.4 Simulaciones en condiciones con ruido</i>	<i>30</i>
<b>3</b>	<b>-.</b>	<b>AUTOSINCRONIZACION PARA REDES DE</b>	
		<b>SENSEORES .....</b>	<b>35</b>
		<i>3.1 Modelo de señal.</i>	<i>35</i>
		<i>3.2 Condiciones de convergencia.</i>	<i>40</i>
		<i>3.3 Simulación con ausencia de ruido</i>	<i>43</i>
		<i>3.4 Simulaciones en condiciones con ruido</i>	<i>51</i>
		<i>3.5 Variación del valor de la frecuencia de consenso</i>	<i>54</i>

<b>4 -. APLICACIÓN PRÁCTICA: SISTEMA DE LOCALIZACIÓN COOPERATIVA .....</b>	<b>59</b>
<b>4.1    <i>Aplicación de la teoría al modelo de señal.</i></b>	<b>59</b>
<b>4.2    <i>Simulaciones de consenso y localización.</i></b>	<b>65</b>
<b>4.2.1    <i>Localización con ausencia de ruido.</i></b>	<b>65</b>
<b>4.2.2    <i>Localización con presencia de ruido.</i></b>	<b>67</b>
<b>5 -. RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>71</b>
<b>6 -. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>7 -. APENDICE A: PRINCIPALES SIGLAS UTILIZADAS .....</b>	<b>75</b>
<b>8 -. APENDICE B: CONTENIDO DEL CD .....</b>	<b>47</b>



### **1.1 *Objetivos y motivación del proyecto***

Si nos imaginamos dos osciladores independientes oscilando a frecuencias parecidas pero no iguales, al pensar en la diferencia de las frecuencias a muchos de nosotros se nos plasma en la mente la imagen de dos senoides con periodos diferentes, algo parecido a la figura (1).

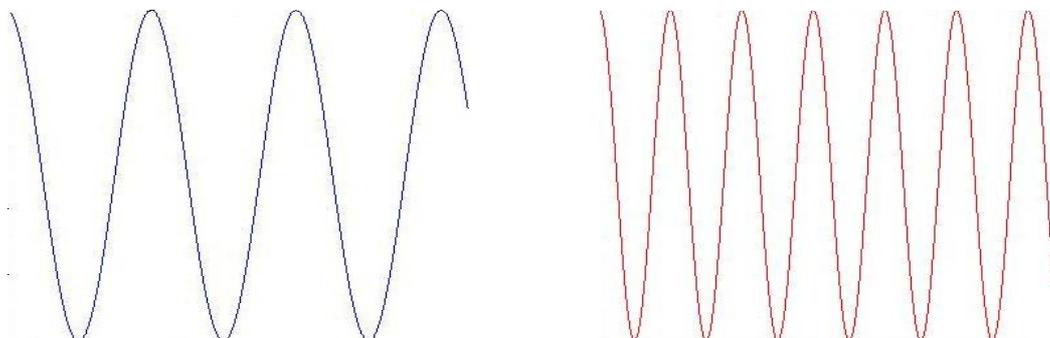


Figura 1: Dibujo de dos senoides con la misma amplitud y frecuencias diferentes.

Si pensamos en como hacer que estas dos frecuencias diferentes converjan a una frecuencia intermedia, o que incluso que una de ellas converja y quede en consenso con la otra, se nos hace algo más difícil de imaginar, pero puede ser de gran utilidad.

La base de este proyecto es el análisis del proceso de consenso entre frecuencias y las aplicaciones que de esto pueden derivar.

Mediante las redes de sensores inalámbricos (Wireless Sensor Networks, WSN), se estudiará en particular los casos de:

- Redes de dos sensores.
- Redes de N sensores
- Aplicación practica sobre redes WSN para el caso de localización

El proyecto parte del estudio de la sincronización de dos frecuencias. Y como es posible hacer que dos osciladores converjan en una misma frecuencia.

A partir de la teoría de convergencia utilizada para dos osciladores, se aplicará teniendo en cuenta los parámetros necesarios para obtener la sincronización de N osciladores.

La razón de este estudio, es para obtener los parámetros necesarios para que una red de N sensores converja y actúe de forma cooperativa.

Una vez se haya realizado el estudio de la convergencia de los osciladores, con los razonamientos obtenidos, se realizará una aplicación que utilizando la teoría de consenso cooperativo entre sensores de una red, pueda localizar un evento concreto para el cual los sensores estén adaptados a detectar.

Para el estudio de la convergencia de los osciladores, diferentes ingenieros han realizado y deducido modelos en función de las características del consenso al que han llegado [1].

Así C.S. Peskin [2], establece su modelo de consenso refiriéndose a pulsos acoplados, que es el modelo de las células del corazón, asumiéndose que la frecuencia a la que oscilan estas es idéntica.

Para el caso de osciladores con diferentes frecuencias de oscilación, Winfree [3] estudia el caso para el acoplamiento de las fases de estos osciladores.

Kuramoto [4] propone una solución con un modelo no lineal para analizar el acoplamiento de fases entre osciladores.

Uno de los primeros intentos en enlazar los modelos de osciladores biológicos y el diseño de redes de sensores inalámbricos (wireless sensor networks) (WSN), lo realizó Hong and Scaglione [5]. El consideró el modelo de Peskin y designó los sensores como osciladores acoplados. Pero se encontró con el inconveniente de que la información al estar introducida (codificada) como cambios temporales de la señal, esta información al enviarse por el aire tenía un alto porcentaje de modificación y con ello fallida, debido a que los retardos motivados por la propagación en el aire creaban un escenario de ambigüedades muy problemáticas. Recientemente estudios realizados por Barbarossa [6,7], proponiendo el modelo de Kuramoto para diseñar redes de sensores inalámbricos (WSN), realizándose el acoplamiento de fase de los osciladores, y viéndose unas propiedades de sincronización bastante interesantes. Sobre este estudio de Barbarossa, esta basado el trabajo que se presenta en este informe, sobre la sincronización de sensores por medio de el acoplamiento de fases. Y son sus modelos, formulas y razonamientos los que pondremos en práctica en algunos casos en mayor y otros en menor medida, para conseguir los objetivos marcados.

## **1.2 Introducción a las redes de sensores (*Wireless Sensor Networks, WSN*)**

Cada vez son más numerosas las aplicaciones que se les da a los sensores. Hasta hace unos años y aun en la actualidad, las tecnologías de redes han cambiado la manera en que las personas y empresas coordinan sus actividades e intercambian información.

Y es posible que en el periodo que estamos viviendo en la actualidad, se pueda ver un avance en las tecnologías de redes para observar y controlar el mundo físico que nos rodea.

Cada vez están evolucionando más los dispositivos, sensores y micro sensores, junto con las comunicaciones inalámbricas de baja potencia, que permiten la ubicación de redes de sensores con densidades de distribución relativamente altas, que se utilizan para múltiples aplicaciones, desde aplicaciones biológicas hasta monitorizaciones medioambientales de zonas extensas ya sea en bosques, en el mar o incluso en la atmósfera.

Que son las redes WSN?

De redes WSN hay muchas configuraciones en función del servicio para el cual se hayan diseñado. Pero de una forma genérica se podría decir que son redes de sensores, micro sensores o incluso nano sensores autónomos, que pueden estar diseñados para comunicarse entre sí, recoger y/o distribuir datos, incluso auto-configurarse. Estas redes nos pueden permitir integrar funciones que antes eran independientes unas de otras, y que ahora por medio de WSN, logran mayor eficiencia.

Hasta ahora y desde hace tiempo las redes cableadas se encargaban de medir niveles de temperatura, líquido, humedad etc. Pero cada vez más, estos sensores cableados se están sustituyendo por sensores WSN, pues sus características los hacen más versátiles, incluso se les aplica el concepto de inteligencia, porque pueden poner en marcha una acción en concreto según la información que estén obteniendo o acumulando, con la ventaja de que no están limitados por una conexión cableada, si no que incluso se pueden ir moviendo.

Cada vez más están aumentando tecnológicamente las características y posibilidades de los chips, microchips, comunicaciones inalámbricas, routers, equipamientos de red y no hablemos del desarrollo de nuevas aplicaciones, software y programas informáticos que están logrando que poco a poco se vayan eliminando los cables en las redes de comunicaciones, y también en las redes de sensores, produciendo un aumento en las prestaciones y posibilidades en aplicaciones tecnológicas.

Las aplicaciones para las cuales pueden ser útiles las WSN, son muy numerosas, y están abiertas a la imaginación y creatividad de la gente que innova. Pero las utilidades más típicas, están basadas en procesos de supervisión, seguimiento y control.

- Control y supervisión del medio ambiente.
- Detección acústica.
- Detección sísmica.
- Detección y control de actividad nuclear.
- Vigilancia militar.
- Seguimiento de inventario.

- Seguimiento de personas y/o objetos.
- Supervisión médica.
- Control de procesos operativos.
- Control tráfico en ciudades y carreteras.
- Domótica.

Estos sensores WSN tienen unas características que los hacen atractivos para un gran número de aplicaciones.

- Son de reducidas dimensiones y bajo coste.
- Tienen un consumo reducido de energía y memoria.
- Pueden llegar a soportar condiciones ambientales extremas.
- Soportan los fallos del enlace inalámbrico de la red a la que estén conectados.
- Sincronización de nodos estructura de red distribuida.
- Funcionamiento si atenderlo y con poco o nulo mantenimiento.

Para según que aplicaciones, la utilización de un sensor inalámbrico hace que su desarrollo sea muy complejo, con algoritmos complejos de implementar.

Pero generalmente los nodos de sensores son bastante más sencillos de implementar, su tamaño es bastante variado, pues puede variar desde el tamaño de una cajetilla de tabaco, al tamaño de un grano de polvo, también reciben el nombre de mota. Su estructura interna básica suele estar formada por:

- Unidad central con consumo de energía y memoria limitada.
- Sensores donde se incluye el circuito acondicionador específico según el suceso a medir.
- Un dispositivo de comunicación (Transmisor-receptor, o alternativamente un dispositivo óptico).
- Una fuente de energía, que normalmente está formada por una batería.

En la figura 2 pueden verse varios ejemplos de sensores WSN. Del tamaño de una cajetilla de cerillas, denominadas motas.

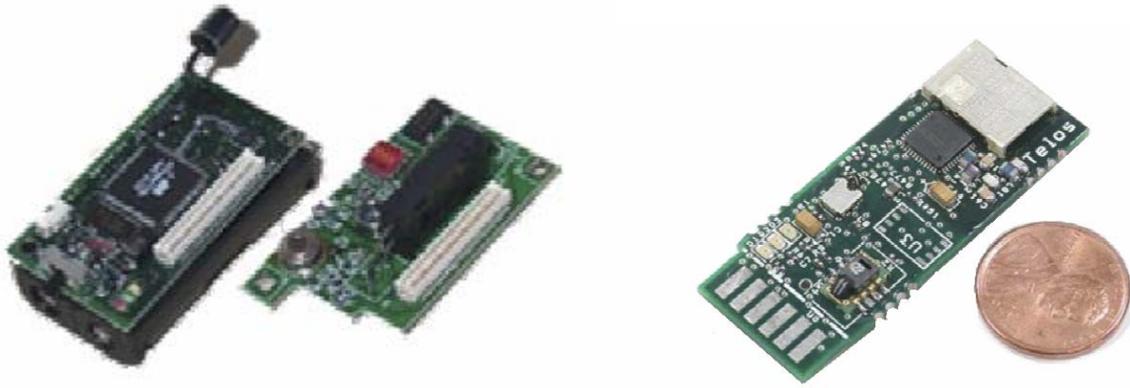


Figura 2: Sensores del tamaño de una caja de cerillas, y de una moneda de

Existen numerosas tecnologías de comunicaciones entre los sensores inalámbricos y las unidades de control o nodos. Entre ellas se encuentra: Wi-fi, Bluetooth, ZigBee...) En la figura 3 se puede ver un esquema de una red WSN con sensores del tipo ZigBee.

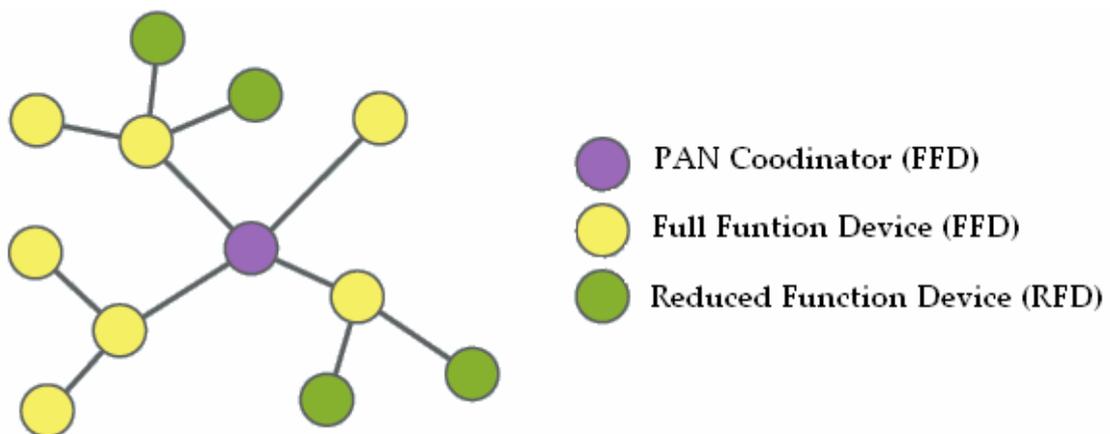


Figura 3: Esquema de una tipología de WSN, con tecnología ZigBee.

### **1.3 *Símil biológico de redes WSN.***

La sincronización aparece de manera espontánea en muchos sistemas biológicos. Estos sistemas biológicos han llamado la atención de muchos científicos, como es el caso de las luciérnagas macho de Malasia. Estas luciérnagas son las responsables de uno de los fenómenos más bonitos de la naturaleza.

Como es sabido en algunas especies de luciérnagas el macho es capaz de emitir destellos luminosos. En el caso de las luciérnagas macho, se podría entender que cada luciérnaga tiene como un oscilador, y cada una de estas va emitiendo destellos ajustando su frecuencia a la respuesta de los destellos de cada miembro de la colonia de luciérnagas. El efecto final, es el destello sincronizado y rítmico de toda la colonia de luciérnagas macho emite para llamar la atención de las luciérnagas hembra. Es un efecto hipnótico-auditivo algo parecido como lo que sucede en nuestros campos al sincronizar cientos de grillos y/o chicharras sus pitidos.

Se ha de tener en cuenta que la sincronización se realiza, indiferentemente de cual de las luciérnagas haya sido la primera en comenzar a emitir luz, pues cualquiera de las cientos o miles de luciérnagas puede ser la detonante del primer destello de

luz, a la que las demás luciérnagas se sincronizarán, haciendo esta primera luciérnaga como señal de reloj al que acoplarse y consensuarse.

## **CAPITULO 2. AUTOSINCRONIZACIÓN DE DOS SENSORES** **ACOPLADOS**

### ***2.1 Modelo de la señal.***

Para el caso de solo dos osciladores, el problema a resolver para que lleguen al consenso es bastante más sencillo que para múltiples osciladores.

Aun así hay varios casos para los cuales el consenso entre ellos se puede realizar con mayor o menor precisión.

Por una banda el consenso obtenido a partir de la frecuencia de oscilación de cada uno de ellos, por diferente que sea dentro de unos márgenes es realizable. Por otro lado hay la probabilidad de dar mas peso a un determinado sensor, originando esto que la frecuencia de consenso tienda hacia la frecuencia del oscilador (sensor) con mayor peso, en función del grado de diferencia de peso que se le de a un sensor respecto a otro.

También se ha de tener en consideración unas condiciones de estabilidad, las cuales si no se cumplen el sistema de dos osciladores nunca llegará al consenso.

El modelo en particular que utilizaremos para dos sensores, parte de la ecuación principal de consenso para N sensores (1).

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot F[\theta_j(t) - \theta_i(t)] \quad \text{para } i=1, \dots, N, \quad (1)$$

Donde:

El término  $\dot{\theta}_i(t)$  es la fase instantánea del sensor "i", que obtenemos a partir del proceso de consenso.

- La  $\omega_i$  es la frecuencia del sensor que esta convergiendo.
- El factor  $K$  es el factor que se ha de calcular para que se realice el consenso, y va relacionado con la distancia entre las frecuencias que han de converger.
- El coeficiente  $c_i$  es el coeficiente a partir del cual la frecuencia del sensor que observa se corregirá más o menos en función de la potencia de señal recibida.
- El termino  $a_{ij}$  término cuyo valor será uno y nos dará la información de los sensores que han consensuado.
- La función  $F[\theta_j(t) - \theta_i(t)]$  es una función no lineal, generalmente será un  $\sin()$ , de la diferencia de fases entre las señales de un sensor y otro.

La ecuación (1), lo que hace es añadir a la frecuencia instantánea del sensor que observa una fase en función de la diferencia que tenga con los de más sensores de la red que se ha de consensuar. Esto lo realiza con todos y cada unos de los sensores. En el caso de dos sensores el proceso tendrá menos complejidad.

El factor que marca cuanto se ha de corregir la fase instantánea de la frecuencia del sensor, es la función no lineal, esta nos da la diferencia entre el

sensor que observa i todos los que pertenecen a la red. En el caso de 2 sensores, solo se irá haciendo la corrección con la fase de la frecuencia del otro sensor. La complejidad del problema para el caso de dos sensores se reduce considerablemente.

## **2.2 Condiciones de convergencia (consenso)**

Aspectos clave relacionados con la convergencia de WSN en las que los sensores son osciladores a una frecuencia determinada:

Para conseguir que un sistema WSN llegue a la convergencia, se ha de conseguir que todos los sensores alcance una fase común, lo cual implica que la frecuencia ha de modificarse adecuadamente para conseguir fases iguales.

Esta convergencia de WSN se consigue procesando las observaciones de los sensores del entorno y ponderándolas por un factor de ganancia dependiente del escenario de trabajo, el cual se convierte en el factor clave para asegurar que los sensores convergen o no.

Este factor ponderador que marca la ganancia que se ha de aplicar, para que la convergencia se produzca con éxito es el factor K.

### **2.2.1. Calculo de factor K.**

Para ver de donde sale y como afecta el factor K a la convergencia, tenemos que partir de la explicación del apartado 2.2 de lo que implica convergencia.

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t)} \approx e^{j\omega^* t} \cdot e^{j\alpha} \quad (3)$$

Si a lado y lado de la equivalencia le sumamos una fase como en (4)

$$\left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t)} \right] \cdot e^{-j\theta_i(t)} \approx \left[ e^{j\omega^* t} e^{j\alpha} \right] e^{-j\theta_i(t)} \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t) - j\theta_i(t)} \approx e^{j(\omega^* t - \theta(t) + \alpha)} \quad (5)$$

Si tomamos la parte imaginaria:

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(j\theta_j(t) - j\theta_i(t)) \approx \sin(\omega^* t - \theta(t) + \alpha) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(j\theta_j(t) - j\theta_i(t)) \approx -\sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha) \quad (7)$$

Si nos fijamos en la ecuación (7) la parte enmarcada, es precisamente lo que se aplica en la ecuación (1), de manera que cuando hay consenso se puede decir que:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + K \cdot \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot F[\theta_j(t) - \theta_i(t)] = \omega_i + K \cdot [-\sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha)] \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i - K \cdot [\sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha)] \quad (9)$$

Por otra banda, también sabemos que cuando hay consenso, la evolución de la fase instantánea en el tiempo de todos las frecuencias de los osciladores que intervienen, es igual a la frecuencia de consenso.

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega^* \quad (10)$$

De manera que so lo aplicamos a la ecuación (9),

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i - K[\sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha)] = \omega^* \quad (11)$$

$$\omega_i - \omega^* = K \cdot \sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha) \quad (12)$$

$$K = \frac{\omega_i - \omega^*}{\sin(\theta(t) - \omega^* t - \alpha)} \quad (13)$$

Desconsiderando el valor del sin() que es menor o igual que 1, llegamos a la ecuación (14)

$$K > |\omega_i - \omega^*| \quad (14)$$

Al desconsiderar el valor del sin(), perdemos precisión en el cálculo, pero se puede asumir. Y el modulo de la resta de frecuencias, se realiza porque no importa el signo que tengan, sino la distancia que haya de una a otra.

Si esta K no cumpliera esta condición el consenso no sería posible, y no se llegaría a una frecuencia única de emisión por parte de los sensores, ya que cada uno de ellos iría realizando correcciones de su frecuencia de una manera no proporcional a la diferencia de su frecuencia respecto al del otro sensor.

### **2.3 *Simulaciones en ausencia de ruido.***

A continuación se muestra una serie de gráficas, fruto de las simulaciones bajo condiciones de ausencia de ruido. En estas gráficas se explican los resultados y conclusiones obtenidos en el apartado 2.1 y 2.2, viéndose de manera gráfica las condiciones de consenso para el caso de dos sensores con frecuencias y fases diferentes, y casos en los que el consenso no se realiza por no cumplirse estas mismas condiciones.

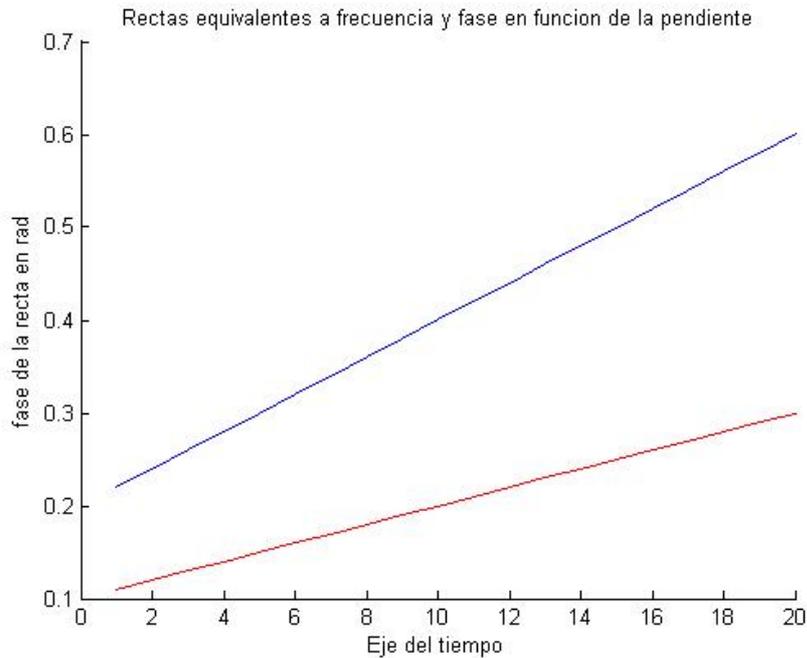


Figura 4: Representación de la evolución de las fases instantáneas de los sensores que se han de consensuar con fases iniciales diferentes.

En la figura 4 se puede apreciar la representación de las dos rectas que representan las fases instantáneas de los dos osciladores de los sensores que se han de consensuar, siendo la pendiente de cada una de las rectas la frecuencia de cada sensor y el punto de inicio de las rectas la fase inicial. Como la variación de la fase en el tiempo es constante, las líneas que dibujan esta evolución son rectas. Estas irán creciendo por que las fase se van sumando, de manera que si obtenemos el número de radianes que recorre en un segundo (rad/s), obtendremos la frecuencia en rad/s. Cada periodo que realice irá sumando radianes (vueltas). La frecuencia se obtiene a partir de la pendiente de la recta. (cómo varia la fase de un periodo de tiempo a otro).

A partir de la ecuación de la recta:

$$\varpi_n = \omega_n(t) + \theta_n \quad (15)$$

En este caso partiendo de la ecuación de la recta tenemos:

Recta 1 = frecuencia sensor 1 =  $\omega_1 = 0.01$  rad/s

fase inicial =  $\theta_1 = 0.1$

Recta 2 = frecuencia sensor 2 =  $\omega_2 = 0.02$  rad/s

fase inicial =  $\theta_2 = 0.2$

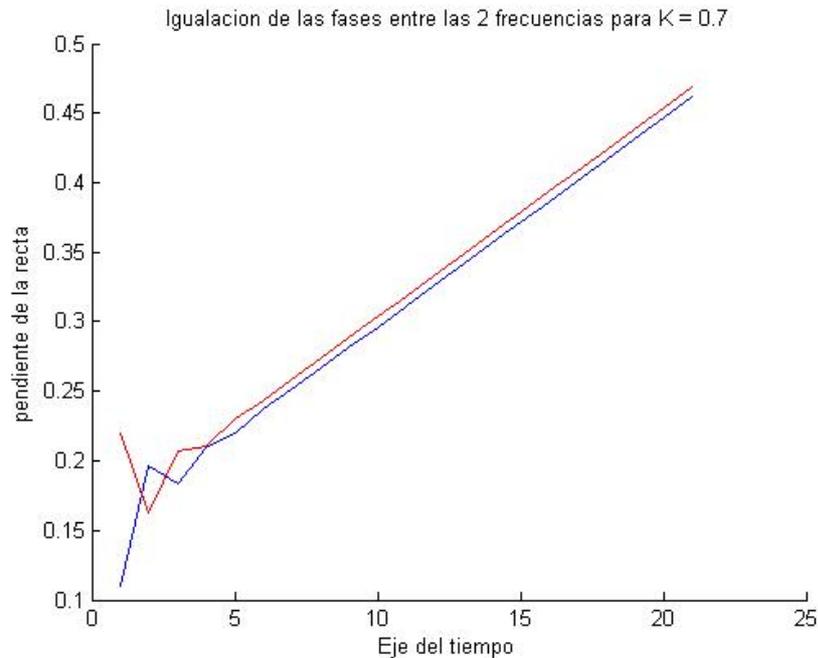


Figura 5: Consenso de los dos osciladores de los sensores que inicialmente tenían frecuencias y fases diferentes.

En la Figura 5 se puede ver como las dos rectas iniciales con frecuencias diferentes llegan a consenso corrigiendo mutuamente su frecuencia y convergiendo en una única frecuencia para los dos sensores.

El valor de K sobre el que se ha realizado la simulación es de 0.7.

Teniendo en cuenta que se ha de cumplir:

$$K > |\omega_2 - \omega_1| \quad \text{vemos que,} \quad |\omega_2 - \omega_1| = |0.02 - 0.01| = 0.01 \quad (16)$$

por lo tanto al ser  $0.7 > 0.01$  y cumplirse la condición, el consenso entre las dos frecuencia se realiza sin problemas, y en un tiempo considerablemente rápido.

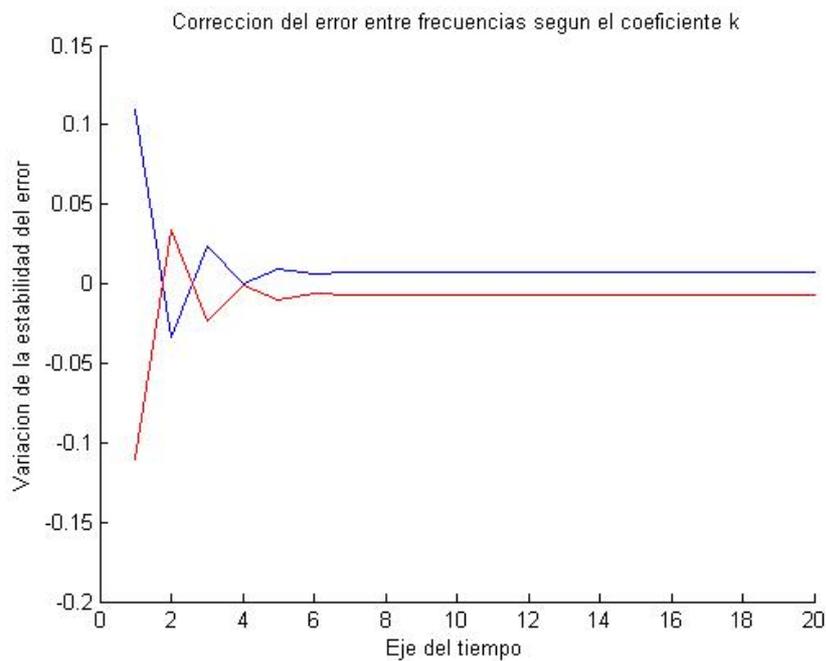


Figura 6: representación de la estabilización del error entre las frecuencias de los dos osciladores a medida que estos dos llegan a consenso.

En la figura 6, se observa como a medida que los dos osciladores van llegando a consenso el error entre su frecuencia instantánea (fase), se va haciendo constante, hasta que al final una vez consensuado el error entre fases es constante durante todo el tiempo. Esto implica una estabilización de la misma frecuencia en los dos osciladores de cada sensor.

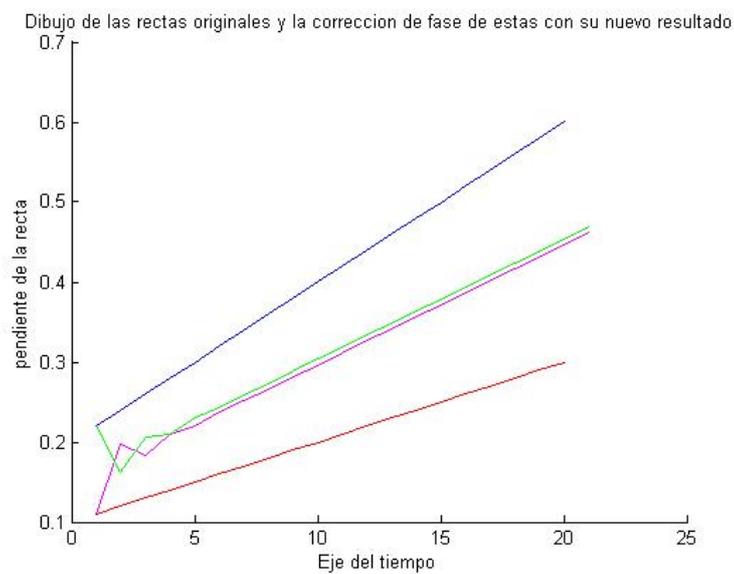


Figura 7 : Vista simultánea de las frecuencias iniciales de los dos sensores, y su variación en el tiempo a medida que llegan a consenso.

En las siguientes figuras se puede observar como la variación del valor de K afecta tanto al tiempo de convergencia como al hecho de que esta se produzca o no.

En las figuras 8 y 9, se realiza la simulación de la convergencia para una  $K = 0.1$ .

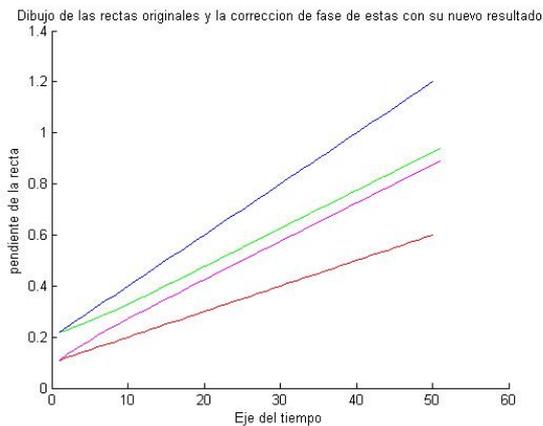


Figura 8: Convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $K = 0.1$

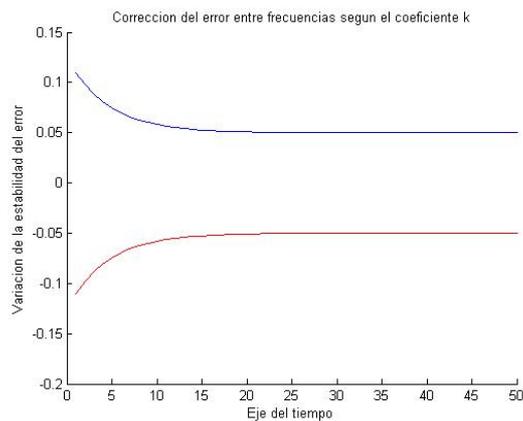


Figura 9: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.1$

Es interesante observar como aunque la convergencia se realiza satisfactoriamente, el tiempo que transcurre hasta que se llega a la estabilidad es bastante superior que en el caso anterior de las figuras 5 y 6, en las que se reflejaba la simulación para una  $K = 0.7$  y el tiempo que se puede observar de estabilización esta entre los valores de 6 y 8 segundos, mientras que para la  $K = 0.1$ , se puede ver en la gráfica que la estabilidad se produce entre los 18 y 20 segundos aproximadamente.

Para la convergencia de las frecuencias con una  $K = 0.1$  también se observa como el tiempo de estabilidad del error es mucho mayor, aunque la convergencia se produce debido a que se sigue cumpliendo la condición  $K > |\omega_2 - \omega_1|$

En las figuras 7 y 8 se puede apreciar la diferencia en el tiempo que tarda las frecuencias en converger respecto las figuras 5, 6 y 2, 3, con un valor de K aun algo mas pequeño, y por lo tanto mas cercano al límite de la condición  $K > |\omega_2 - \omega_1|$ , pero aun cumpliéndola. El tiempo que tarda el error en ser constante es de unos 45 seg.

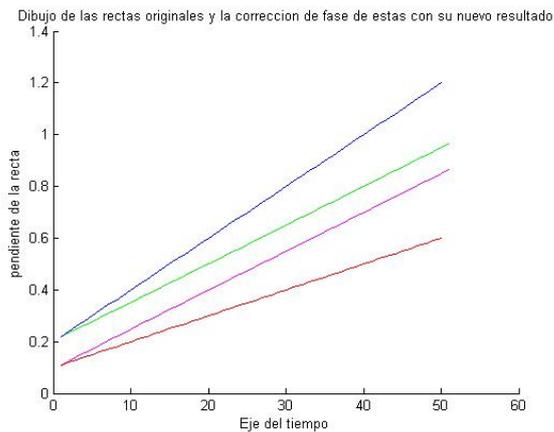


Figura 10: Convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 0.05$

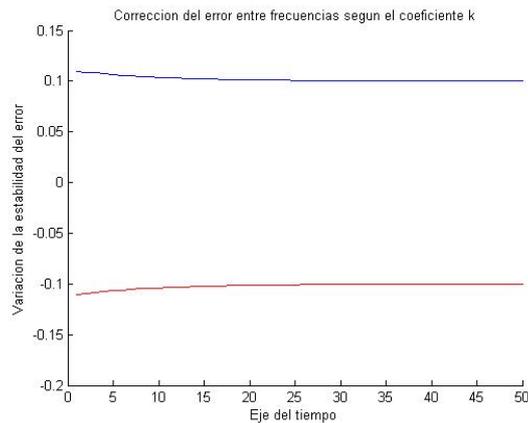


Figura 11: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.05$

Para el caso de las figuras 12 y 13 con una  $k$  que no cumple la condición de convergencia, se ve como esta no se lleva a cabo, y las pendientes de las rectas, equivalentes a la frecuencia de cada uno de los osciladores, no llegan a ser iguales y por lo tanto se puede concretar que los osciladores de los dos sensores no llegan a converger.

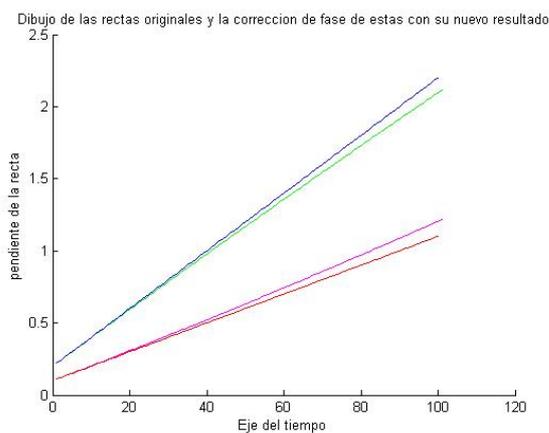


Figura 12: Intento de convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 0.002$

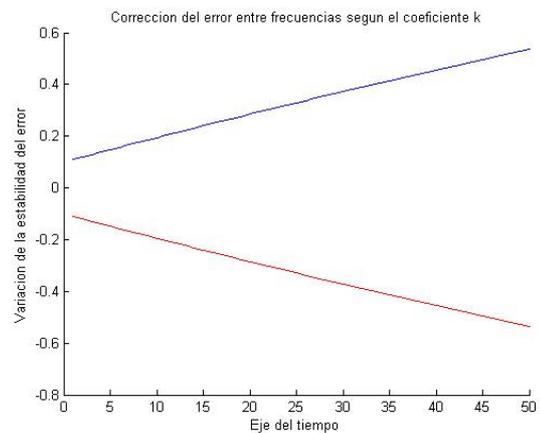


Figura 13: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.002$

Se ha de destacar que aunque la convergencia de las frecuencias no se realiza en el transcurso de tiempo de esta simulación, (en este caso 100 s), si este tiempo de simulación se prolonga, si seria posible que llegasen a converger, pero la eficacia

del sistema desestima que la convergencia se realice en un tiempo demasiado grande, por lo que se considera una situación de no convergencia.

Podemos ver más a bajo en las figuras 14 y 15, con un valor de  $K = 0.4$  como el consenso se realiza de una manera rápida, sin oscilaciones y progresivamente (sin cruces de las rectas que representan las frecuencias).

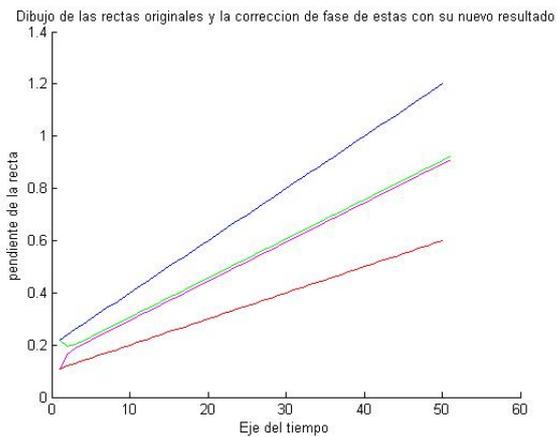


Figura 14: Convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 0.4$

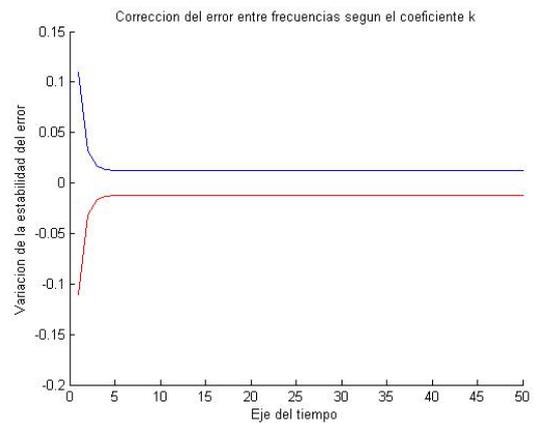


Figura 15: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.4$

Mientras que en las figuras 16 y 17 podemos ver como el consenso también se realiza, pero se aprecia como la corrección de la frecuencia en cada uno de los osciladores se va realizando de una manera mas brusca, originando esto mas saltos bruscos en el valor de la frecuencia instantánea y por tanto mas cruces entres las rectas que representan la frecuencia de cada sensor y con ello también aumenta el tiempo que tardan en llegar al consenso las dos frecuencias. En este caso la simulación se ha realizado con un valor de  $K = 0.94$ .

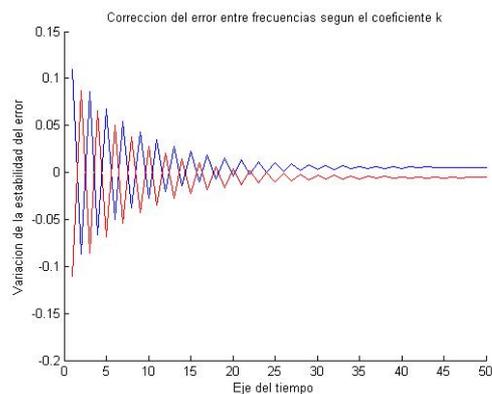
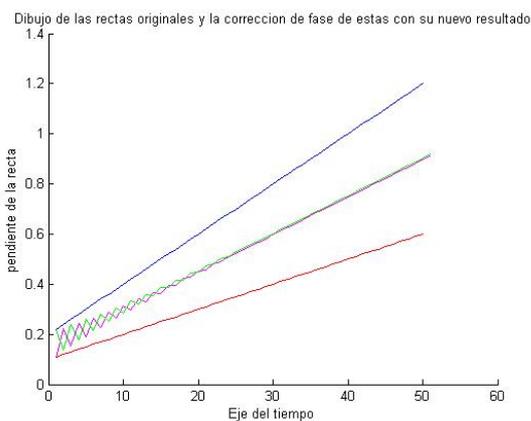


Figura 16: Convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 0.94$

Figura 17: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.94$

Las figuras 18 y 19 se muestran para ratificar el carácter de proporcionalidad que tiene el valor  $K$ , cuyo valor al ser mayor que 1 hace que la probabilidad de convergencia sea nula.

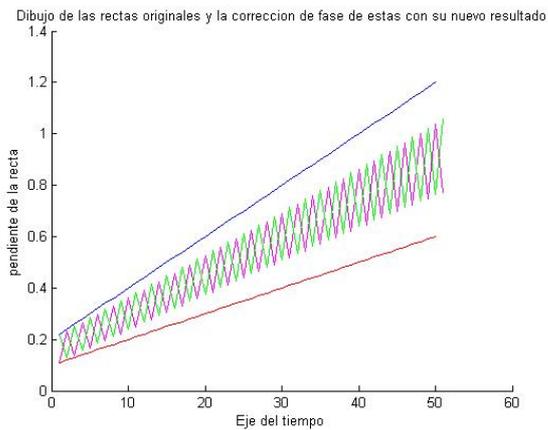


Figura 18: Intento de convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 1.01$

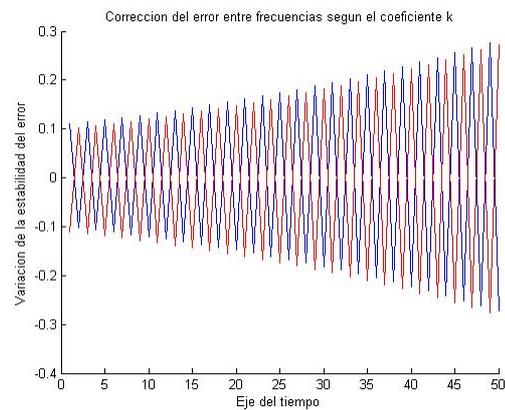


Figura 19: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 1.01$

En las dos figuras se ve claramente que la progresión de las señales se aleja de la convergencia. Así en la figura 18 la corrección de fase instantánea se hace cada vez mayor, y los osciladores cada vez han de intentar corregir un error entre las dos frecuencias, que se hace mas grande a medida que transcurre el tiempo, tal y como podemos comprobar en la figura 19, donde se ve que el error esta muy lejos de ser constante.

## **2.4 Simulaciones en condiciones con ruido,**

Las figuras que se muestran en este apartado son la representación del consenso de los dos sensores introduciéndole ruido blanco gaussiano aditivo, (AWGN)

Este ruido, se introduce en nuestra señal en recepción y se suma a nuestra señal recibida, como consecuencia de esto aparece un término que se le suma a nuestra fase que llamaremos “ruido de fase”. Pero la relación del ruido térmico que se le suma a nuestra señal con el ruido que se le suma a nuestra fase no es directa. Para verlo mejor está la figura (20), donde vemos que para obtener la componente del ruido de fase que nos afecta a la señal, hay un término de arco-tangente. Que nos dará el valor que se le añade a nuestra fase en función del vector ruido térmico añadido.

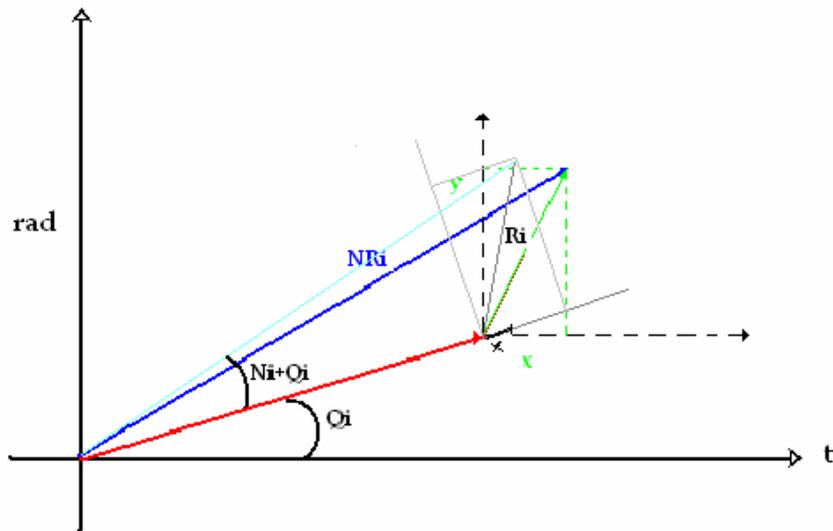


Figura 20: Efecto del ruido gaussiano blanco aditivo sobre la fase de nuestra señal.

- Donde:
- $R_i$  = Vector ruido que se le añade a nuestra fase.
  - $NR_i$  = Vector resultante con ruido añadido.
  - $Q_i$  = Fase inicial.
  - $N_i+Q_i$  = Fase resultante con ruido añadido.

A partir de la potencia de Ruido, y la relación señal a ruido SNR, como la influencia del ruido térmico no es directa en la fase, calculamos cómo afecta el ruido en recepción en términos de fase. Para ello, vamos a calcular cual es la potencia de ruido de fase a partir de de una determinada relación señal a ruido (SNR), que es el parámetro con el que se caracteriza la características y prestaciones del receptor del sensor.

$$SNR = \frac{A^2}{\sigma_n^2} \quad (17)$$

$$Potencia\{Qn\} = \sigma_Q^2 = \frac{\sigma_n^2}{2A^2} = \frac{1}{\frac{2A^2}{\sigma_n^2}} = \frac{1}{2 \cdot SNR} \quad (18)$$

Donde:

$A^2$  = potencia de nuestra señal.

$\sigma_n^2$  = potencia de ruido lineal.

$\sigma_Q^2$  = potencia de ruido de fase.

Se puede ver fácilmente en las ecuaciones 17 y 18 que la SNR considerando condiciones de bajo ruido, o lo que es lo mismo un valor de SNR grande, “como hemos considerado para las ecuaciones 17 y 18”, esta está en directa relación con la potencia de ruido de fase  $\sigma_Q^2$ .

En definitiva, teniendo en consideración unas condiciones de SNR muy grandes, [Barbarossa [6]], se obtiene que el ruido afecta principalmente a la fase de la señal, en el proceso de recepción. Y este ruido que afecta a la fase viene dado por la SNR que tengamos, según se ha visto en la ecuación (18),

Las simulaciones que se verán a continuación se han realizado con una SNR de 10 dB's

Para una  $K = 0.4$  obtenemos:

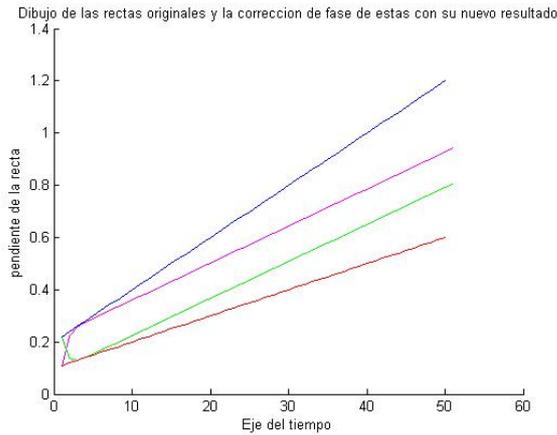


Figura 21: Convergencia de las dos frecuencias con ruido añadido y valor de k = 0.4

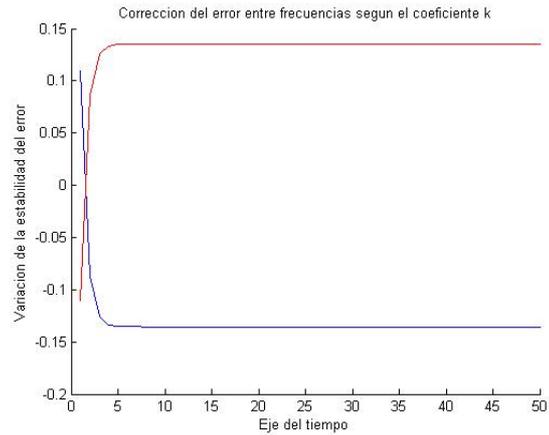


Figura 22: Progresión del error entre frecuencias con ruido añadido y un valor de K = 0.4

Como se puede apreciar en las gráficas 21 y 22, la convergencia es obtenida eficientemente a pesar de existir un ruido de fase añadido, pero este lo que causa es que el error entre fases sea mayor que en el caso de no ruido, (ver figuras 14 y 15). También el ruido añadido origina que la convergencia no se realice a una frecuencia intermedia entre la de los dos osciladores, si no que esta está afectada por el nivel de ruido de fase que se le introduce.

La razón de que la convergencia se obtenga, pero el error de fases sea mayor es motivada, porque el ruido en recepción, podemos considerar que afecta en mayor medida a la fase de la señal, si consideramos que el nivel de ruido es muy pequeño con respecto al nivel de señal. Por ese motivo hemos considerado en las ecuaciones 8 y 9 que es un término que se le añade a la fase. Y según vemos en la ecuación (n)

Como en condiciones de consenso podemos considerar que los coeficientes  $c_i$  son iguales para todas las frecuencias instantáneas, y cada sensor le afecta una  $SNR_i$ , a partir de (19) obtenemos la ecuación (20). Y el resultado es el consenso de las frecuencias pero con un mayor error de fases.

$$\dot{\theta}^*(t) = \omega^* = \frac{\sum_{j=1}^N c_i \cdot \omega_i}{\sum_{j=1}^N c_i} \quad (19)$$

$$\omega^* = \frac{\sum_{j=1}^N SNR_i \cdot \omega_i}{\sum_{j=1}^N SNR_i} \quad (20)$$

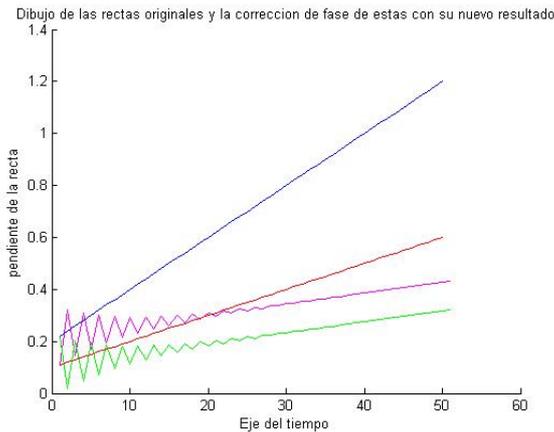


Figura 23: Intento de convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 0.94$

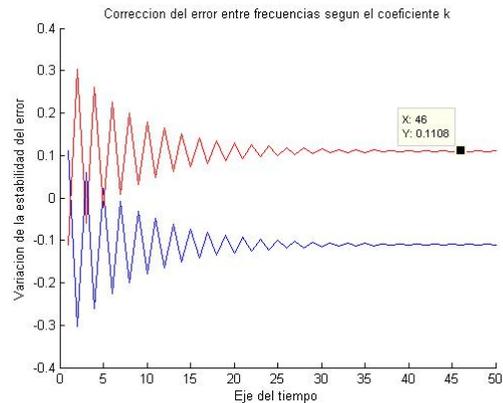


Figura 24: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 0.94$

A medida que nos acercamos al límite superior de la convergencia, con un valor de  $K = 0.94$ , el tiempo que tarda en realizarse esta se hace mayor, tal como explicamos en las figuras 16 y 17. Y el efecto del ruido de fase se hace ver con el aumento del error entre las fases de los osciladores en un mismo tiempo. En la figura 15 simulación para  $K = 0.4$  podíamos observar un error de un valor aproximado a 0.01, mientras que en la figura 24 es de 0.11, también se puede ver como la frecuencia a la que convergen no es la frecuencia promedio entre la de los dos osciladores, sino que al estar influenciada por el nivel de ruido de fase que se le añade, esta tiende a converger hacia un valor diferente.

Tal y como se vio en el caso de no convergencia en las figuras 18 y 19 originada por un valor de  $K$  superior a 1, concretamente para  $K = 1.01$ , al añadirle ruido de fase en esta caso también sucede lo mismo, y los dos osciladores no llegan al consenso. El error se hace cada vez mayor, a medida que transcurre el tiempo, y

el sistema no es capaz de compensarlo y conseguir converger en una única frecuencia. En las figuras 25 y 26, se puede ver un ejemplo de este caso explicado.

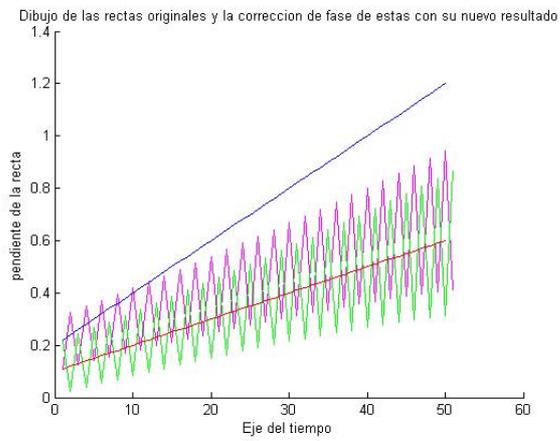


Figura 25: Intento de convergencia de las dos frecuencias con un valor de  $k = 1.01$

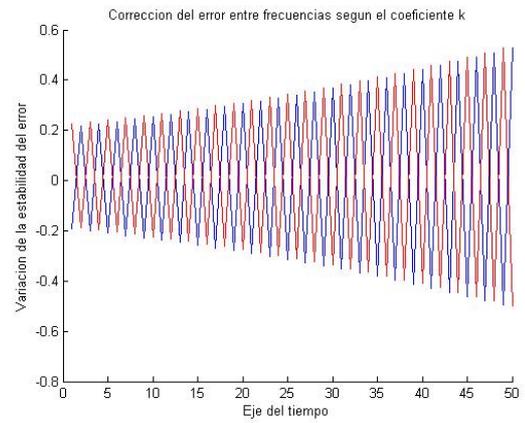


Figura 26: Progresión del error entre frecuencias para un valor de  $K = 1.01$

## **CAPITULO 3. AUTOSINCRONIZACION PARA REDES DE SENSEORES**

### **3.1 Modelo de señal.**

En el capítulo 2 hemos estudiado los parámetros que intervienen en el caso de la sincronización de dos sensores con frecuencia distintas. Para el caso de redes de N sensores el tratamiento que haremos será muy parecido, pero esta vez estableceremos dos únicas frecuencias que definirán la matriz de sensores, con sensores que emiten frecuencia 1 (están activados al detectar un suceso), o emiten frecuencia 0 (no detectan ningún suceso).

En el caso de dos sensores, el estudio es bastante sencillo en lo que se refiere a la sincronización de ambos sensores, pero para el caso de N sensores el estudio se complica y se utilizan teorías de aproximación de campos [8], que característicamente se usa en el estudio de cambios de fase en termodinámica. Esto trae como consecuencia que las soluciones obtenidas a partir de estos cálculos sean soluciones aproximadas.

Una de las primeras consideraciones según esta teoría es aplicar a la ecuación (1) el concepto de que la función diferencia de fases sea periódica.

$$F[\theta_j(t) - \theta_i(t)] \quad (21)$$

$$F(x) = \left( \sin\left(2\pi \frac{x}{T}\right) \right) \quad (22)$$

A continuación se vuelve a desarrollar la teoría de donde sale la ecuación (1), pero esta vez teniendo en cuenta que no es para 2 sensores, sino que en para n sensores, de hay la existencia del termino “r” .

En estado de consenso, la fase a la que tienden todos los sensores pertenecientes a la matriz es igual que la ecuación (3) pero con un termino “r” que será un factor a tener en cuenta para saber en numero de sensores que estén consensuados.

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t)} \approx e^{j\omega^* t} \cdot r \cdot e^{j\alpha} \quad (23)$$

$$\left[ \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t)} \right] \cdot e^{-j\theta_j(t)} \approx \left[ e^{j\omega^* t} \cdot r \cdot e^{j\alpha} \right] \cdot e^{-j\theta_j(t)} \quad (24)$$

Sumamos a los dos lados de la ecuación una fase, que es lo mismo que multiplicarla por la exponencial compleja “  $e^{-j\theta_j(t)}$  ” obteniendo la ecuación (25),

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j[\theta_j(t)-\theta_i(t)]} \approx r \cdot e^{j(\omega^* t - \theta_i(t) + \alpha)} \quad (25)$$

Si como anteriormente tomamos la parte imaginaria de la ecuación...

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \approx r \cdot \sin(\omega^* \cdot t - \theta_i(t) + \alpha) \quad (26)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \approx -r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha) \quad (27)$$

De manera que cuando hay consenso se puede expresar la ecuación (1) de la siguiente manera:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot F[\theta_j(t) - \theta_i(t)] \approx \theta_i(t) = \omega_i + \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \quad (28)$$

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot \sin(\theta_j(t) - \theta_i(t)) \approx \omega_i + \frac{K}{c_i} \cdot (-r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha)) \quad (29)$$

Para simplificar más la nomenclatura, se considera que  $c_i$  es igual a 1, (en apartados más avanzados se mostrará la utilidad de este coeficiente), y obtenemos que:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i + K \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot F[\theta_j(t) - \theta_i(t)] = \omega_i + K \cdot (-r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha)) \quad (30)$$

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i - K \cdot r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha) \quad (31)$$

Siendo  $\omega^*$  la frecuencia de consenso cuando este se produzca. La frecuencia será igual a  $\dot{\theta}_i(t)$ , de manera que si  $\dot{\theta}_i(t) = \omega^*$  obtenemos:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega^* = \omega_i - K \cdot r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha) \quad (32)$$

Una de las primeras aproximaciones que se pueden hacer es a partir de la ecuación final de consenso (13) y para valores grandes de N, si el sistema converge, la función  $r_i(t)$  tiende a ser constante independientemente del índice i y para toda j.

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot e^{j\theta_j(t)} \approx e^{j\omega^*(t)} \cdot r \cdot e^{j\alpha} \quad (23)$$

Esto es bastante interesante, pues se convierte en una herramienta para saber o tener una idea en todo momento de cuantos elementos de una matriz están activos en ese mismo momento, y también para saber si el sistema esta en consenso o no.

En la figura (27) se puede ver la simulación del consenso para 20, 15 y 10 sensores. Cada matriz de sensores se ha simulado 10 veces, con lo que cada sensor a pesar de tener la misma frecuencia, tienen fases diferentes, por tal motivo las trayectorias de las curvas de un mismo color son diferentes hasta que convergen todas las fases. Se puede observar claramente como transcurrido un tiempo de estabilización, cuando todas las fases convergen, el sumatorio de estas nos da el numero de sensores de los que estamos obteniendo las fases y que están en convergencia.

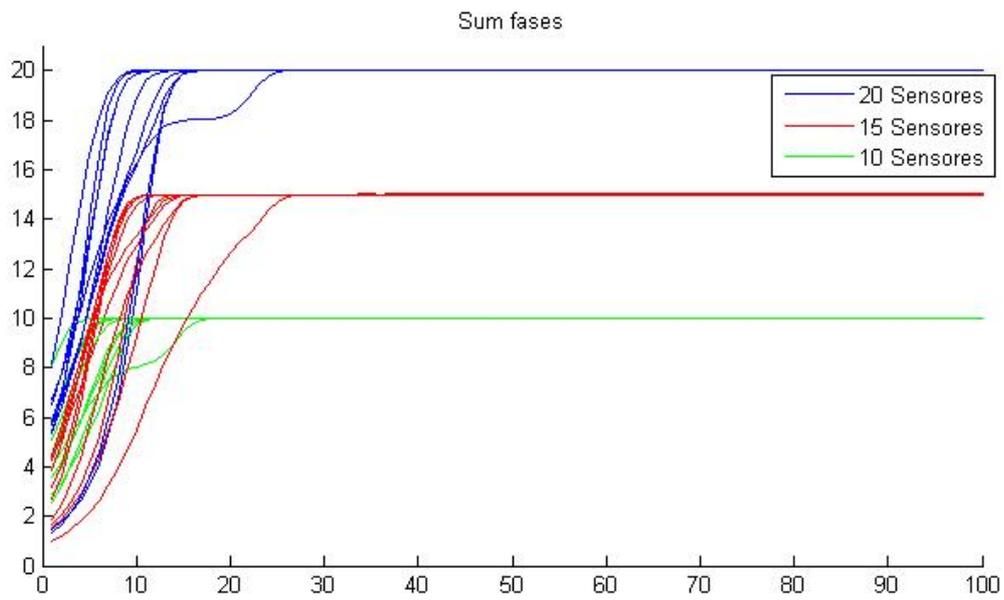


Figura 27: Evolución del sumatorio de fases para números de sensores diferentes, en concreto 10, 15 y 20 sensores funcionando en cada matriz. También se puede interpretar como el la evolución de la función  $r_i(t)$ .

### 3.2 Condiciones de convergencia.

Al igual que para dos sensores, la convergencia de estos esta condicionada por unos factores determinados, en concreto tal y como se vio en el capitulo 2 por el factor K.

A partir de la ecuación (32) se establece una de las condiciones de K que se ha de cumplir para que el consenso entre las N's frecuencias se lleve a cabo, de manera que si:

$$\omega_i - \omega^* = K \cdot r \cdot \sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha) \quad (34)$$

$$\frac{\omega_i - \omega^*}{\sin(\theta_i(t) - \omega^* \cdot t - \alpha)} = K \cdot r \quad (35)$$

teniendo en cuenta que  $\sin(x) \leq 1$  , y que el signo de las frecuencias no nos afecta para calcular K porque es la diferencia que existe entre las frecuencias (la distancia), se puede hacer la siguiente aproximación a partir de las ecuaciones (34) y (55):

$$K \cdot r > |\omega_i - \omega^*| \quad (36)$$

Ecuación equivalente a la (14) del apartado 2.2.1, que marcaba la condición de consenso para dos frecuencias diferentes.

Se ha de tener en cuenta que haciendo esta aproximación se pierde precisión. Pero esta condición se cumplirá siempre que exista consenso entre todas las frecuencias de los osciladores de la matriz. El único parámetro de diseño que podemos modificar nosotros para la existencia o no del consenso es la K.

La r en resumidas cuentas da información del número de sensores que se encuentran acoplados en la red, siempre y cuando los sensores estén en consenso.

Según se ve en la ecuación (33), de todos los N sensores, el sumatorio se realizará coherentemente con los fasores que estén en consenso, y por lo tanto hayan convergido a una misma  $\omega^*$  ,

Por otro lado, han de poder verse entre los sensores, por lo que el sumatorio de fasores se realizará para todos aquellos que estén acoplados al sensor  $i$ , y puedan ser observados desde este, por lo que la  $a_{ij}$  ha de ser  $\neq 0$ , si esto no se cumple y  $a_{ij}$  es  $= 0$ , el sensor  $j$  visto desde  $i$  es como si no existiera, y su contribución al sumatorio de fases sería nula.

Según la ecuación (36), el valor de  $r$  está determinado por el proceso de consenso de todos los sensores, por lo que al principio del proceso, en el comienzo de la sincronización, el valor de  $r$  es pequeño, pero a medida que se van consensuando todos los sensores el valor de  $r$  va aumentando y una vez estabilizado el consenso, este valor será el máximo al que puede llegar  $r$ , que será como máximo el número de sensores de la red consensuados.

Existe la posibilidad de que en una red, los sensores estén lo suficientemente separados como para que se necesite una potencia de emisión demasiado grande para que la convergencia entre estos se produzca, produciendo al no detectarse todos los sensores mutuamente, que la  $r$  no sea lo suficientemente grande para cumplir la ecuación (36), de manera que el valor de  $r$  sería menor que el valor de sensores consensuados. Para ello se crea la variable “ $d$ ”,

En el caso de que pase esto, se ha de intentar que “ $r$ ” tenga un valor proporcional o relacionado con la distancia y la potencia a la que han de emitir los sensores para que lleguen al consenso, si la potencia no es suficiente se puede crear la relación entre la proporción del binomio  $K \cdot d$  según la ecuación (37),

$$K \cdot d < \left| \omega_i - \omega^* \right| \quad (37)$$

de esta manera, el consenso no se produciría. Sabemos que la condición que nos marca la ecuación (26) nos da un porcentaje alto de consenso entre los sensores de la red, pero tal como hemos comentado antes, si la distancia entre sensores aumenta, la probabilidad de consenso disminuiría. Para no tener que aumentar excesivamente la potencia de emisión, por el gasto que esto supone, tomamos un valor “ $d$ ” que nos asegure con mayor porcentaje de acierto, que el consenso entre redes de sensores que cubran extensiones mayores se pueda producir con éxito. De lo que podemos decir que si “ $d$ ” es lo suficientemente grande, la ecuación (37) no se

cumplirá y el consenso se podrá realizar con un mayor porcentaje de éxito en la mayoría de los casos. El factor  $d$ , esta sujeto a un estudio en función de la red de sensores y su distancia, así como la probabilidad de consenso de un determinado numero de sensores y la potencia con la que estos llegan a emitir, sobre este tema no se ha profundizado, pero se han obtenido razonamientos a partir de las explicaciones del paper de S.Barbarossa [9].

### 3.3 Simulación con ausencia de ruido

En este apartado se observará a través de diferentes simulaciones y gráficas, el consenso y la forma en como llegan a este un numero determinado de sensores 10, 15, 20 o más, sin tener en cuenta en estos casos el efecto del ruido que se le añade en recepción. Los sensores que forman la red WSN, van tomando medidas con decisiones binarias. Para indicar el estado de hipótesis  $H_0$ , los sensores emiten una frecuencia  $f_0$ , mientras que para indicar el estado en hipótesis  $H_1$ , los sensores emite una frecuencia  $f_1$ .

Todos los sensores tienen una fase inicial de emisión distinta y aleatoria, distribuida entre  $0$  y  $2 \cdot \pi$ . También se podrá observar la frecuencia de consenso a la que llegan todos los osciladores.

Ejemplo de consenso para dos señales con frecuencias iguales a  $1 \text{ rad/s}$ , y fases diferentes, así como visionado del resultado que nos da la observación de la frecuencia de consenso y del valor de  $r$ .

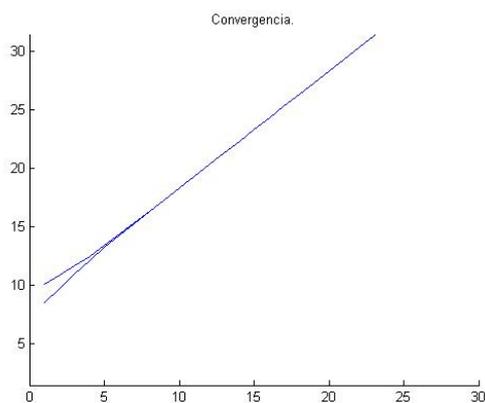


Figura 28: Consenso de dos rectas con fases diferentes.

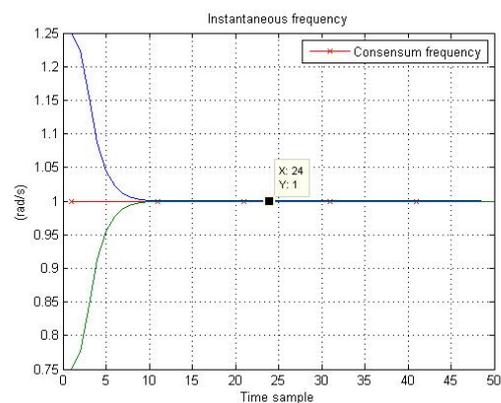


Figura 29: frecuencia instantánea de consenso para dos sensores.

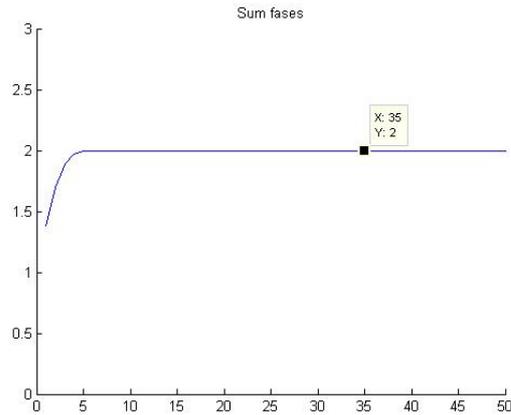


Figura 30: Variación de  $r_i(t)$  a medida que se produce el consenso.

En las figuras 28, 29 y 30 se puede ver un ejemplo del consenso de dos osciladores, oscilando a la misma frecuencia desde un principio, pero con fases iniciales diferentes, estos al oscilar a la misma frecuencia al realizarse la corrección de fase, no afecta a la frecuencia que continúa oscilando a la misma. Pero a medida que transcurre  $t$ , van realizando una corrección de fase que se traduce en un final del sumatorio de  $r_i(t)$  constante e igual al número de señales que se han consensuado.

Para el siguiente ejemplo se utilizan también dos sensores pero esta vez uno con frecuencia = 1, y otro con frecuencia = 0.

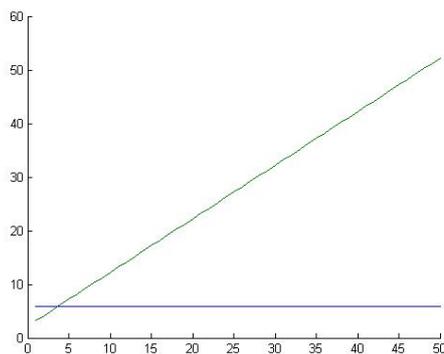


Figura 31: Señales con fase inicial diferentes, y con frecuencias 1 y 0.

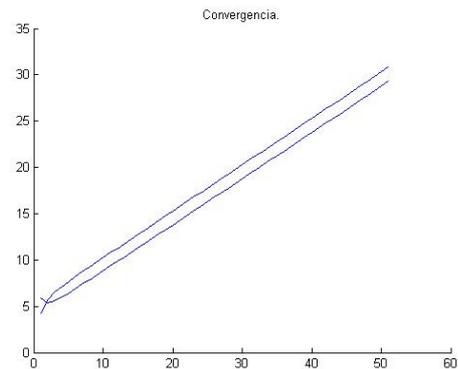


Figura 32: Frecuencias de los osciladores consensuados.

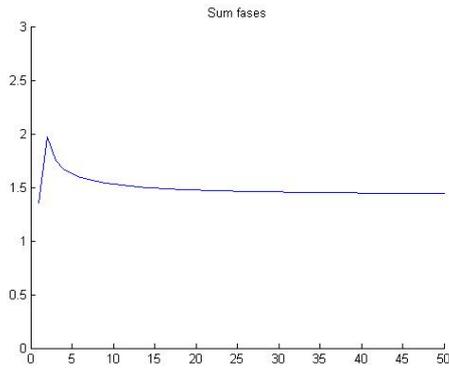


Figura 33: Variación de  $r_i(t)$  a medida que se produce el consenso entre las 2 frecuencias diferentes.

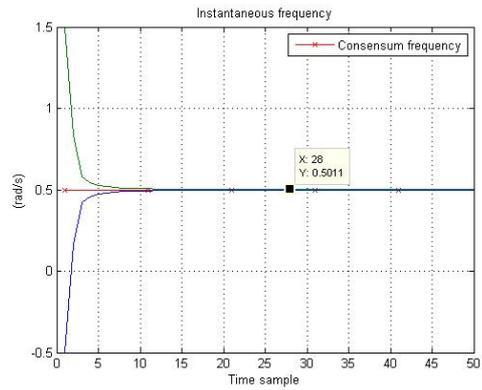


Figura 34: Evolución de las frecuencias de los dos osciladores y su estado constante una vez consensuados

Los siguientes ejemplos que veremos, están realizados con mayor número de sensores pudiéndose ver más claramente el efecto y sentido que tiene el sumatorio de  $r_i(t_i)$ .

En las figuras 35, 36, 37 y 38, la simulación está realizada con osciladores que tienen la misma frecuencia y fases iniciales diferentes. Estos osciladores se sincronizan a través del error de fase, y como se ve en la figura 34 las corrigen y siguen oscilando a la misma frecuencia que es 1.

Ejemplos de consenso de 10 sensores:

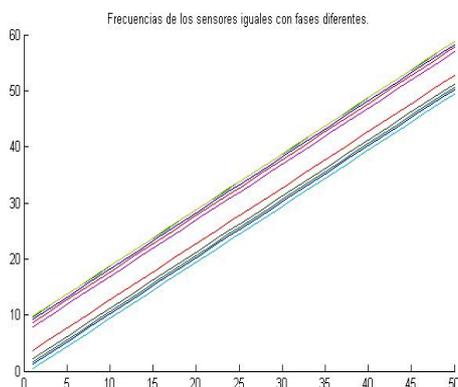


Figura 35: Frecuencia de los sensores con fases diferentes.

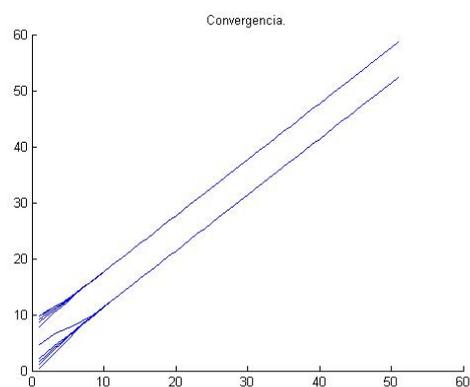


Figura 36: Consenso entre los sensores al corregir sus diferencias de fase.

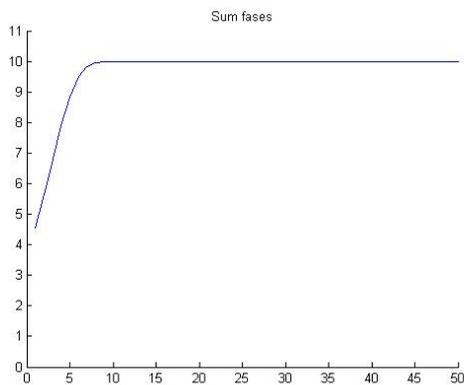


Figura 37: Sumatorio del factor  $r_i(t)$  que nos da el numero de sensores, en este caso 10 por estar todos los sensores emitiendo.

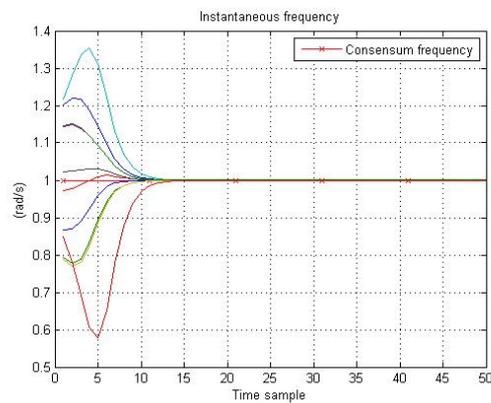


Figura 38: Consenso de todos los sensores con una frecuencia instantánea que se iguala para todos.

En las figuras 39, 40, 41 y 42, en el consenso de estos osciladores se puede ver como la frecuencia de oscilación a la que todos se consensuan ya no es 1, si no que es el promediado entre los frecuencias de los que oscilan a 1 rad/s, y los que lo hacen a 0.

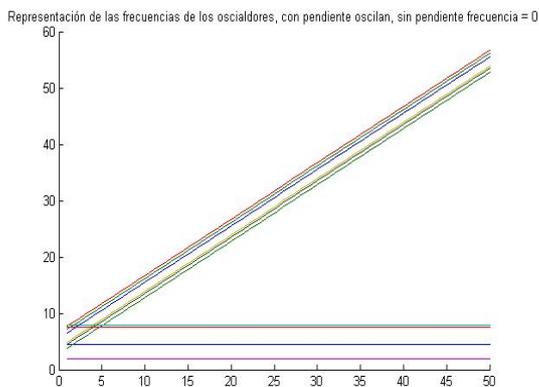


Figura 39: Señales con pendiente son las que tienen frecuencia diferente de 0 en este caso 1.

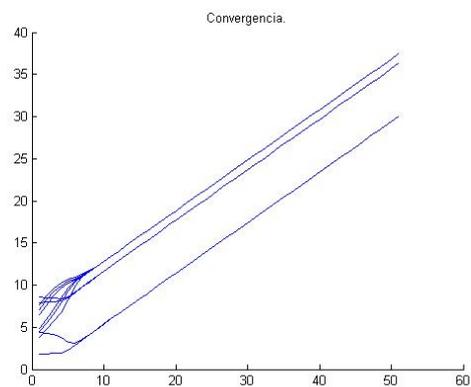


Figura 40: Consenso entre los osciladores de frecuencia 0 y los que tienen frecuencia 1.

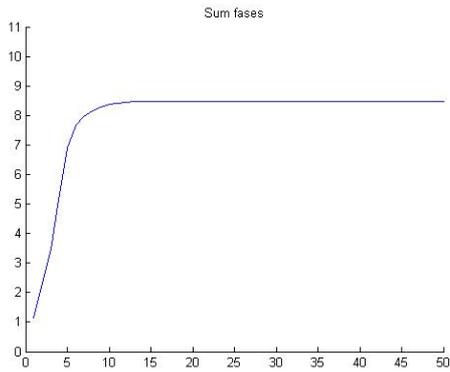


Figura 41: El sumatorio de  $r_i(t)$ , ya no es el numero de sensores de la red, sino que va en relación entre los sensores con frecuencia 1 y los que tiene frecuencia 0.

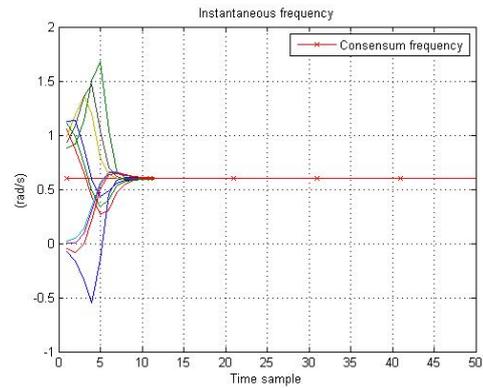


Figura 42: El consenso de las frecuencias de todos los osciladores ya no es 1 sino que es el promedio entre todos ellos.

En estos casos la ecuación (1) realiza el cálculo del error entre las fases de las frecuencias, y corrige cada fase de los  $N_i$  osciladores, hasta que todos se sincronizan con la misma frecuencia. Si recordamos la ecuación (1), se puede ver tal como explicamos en apartados anteriores, que  $K$  mantendrá la relación y cumplirá las condiciones para que el consenso se lleve a cabo, pero el termino  $c_i$  no se tiene en cuenta y en estos casos estudiados hasta ahora hemos estimado su valor = 1. Este es un factor a tener en cuenta, pues en el capítulo 4 veremos la importancia de este termino y una aplicación que nos muestra este termino como factor decisivo.

En las tres siguientes figuras ratificamos con 50 sensores lo que hemos explicado hasta ahora y vemos que el consenso se produce como hasta ahora y así para N sensores.

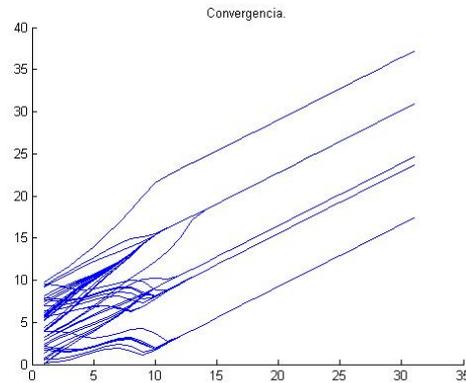


Figura 43: Proceso del consenso de 50 osciladores, con frecuencias de 1 o 0 rad/s iniciales y con fase iniciales aleatorias.

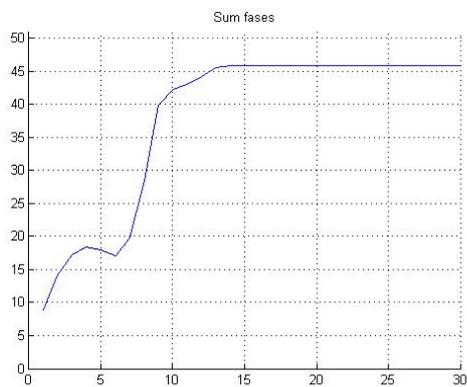


Figura 44: Sumatorio de  $r_i(t)$ , ya no es el número de sensores de la red, sino que va en relación entre los sensores con frecuencia 1 y los que tiene frecuencia 0.

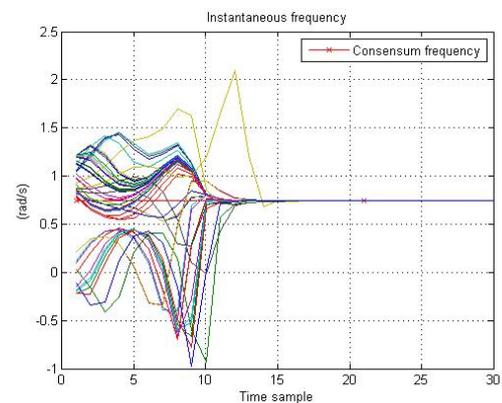


Figura 45: Resultado de la sincronización de 50 sensores en una misma frecuencia instantánea

Tal como se ha explicado en el capítulo 2.3 y en el 3.2, si no se cumplen las condiciones de convergencia el sistema no llega a consenso y no se sincroniza.

En las siguientes figuras se ve un claro ejemplo en el que el valor K no cumple con la condición de convergencia.

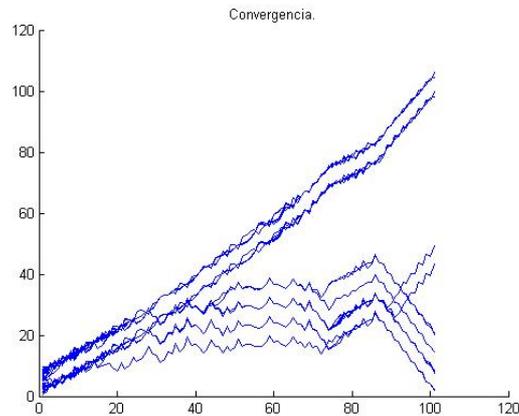


Figura 46: En función del valor de K, las frecuencias no llegan a consenso y el sistema de N sensores no converge.

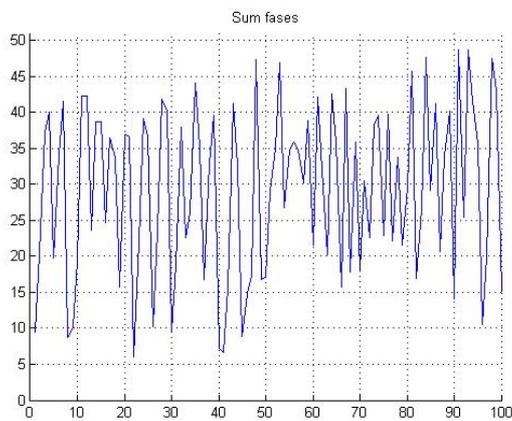


Figura 47: Al no producirse el consenso, el sumatorio de  $r_i(t)$  no se estabiliza tomando el valor significativo de los sensores que han consensuado.

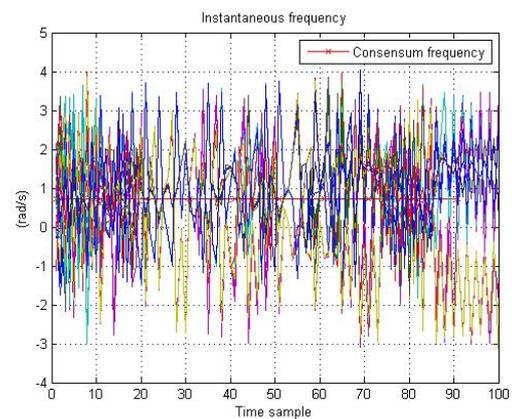


Figura 48: Ejemplo de sistema que no converge. La frecuencia instantánea no es estable para ninguno de los osciladores.

Para un valor muy ajustado de  $K$ , el consenso tarda tanto en producirse que el sistema no es eficaz, hay que optimizar el valor de  $K$ .

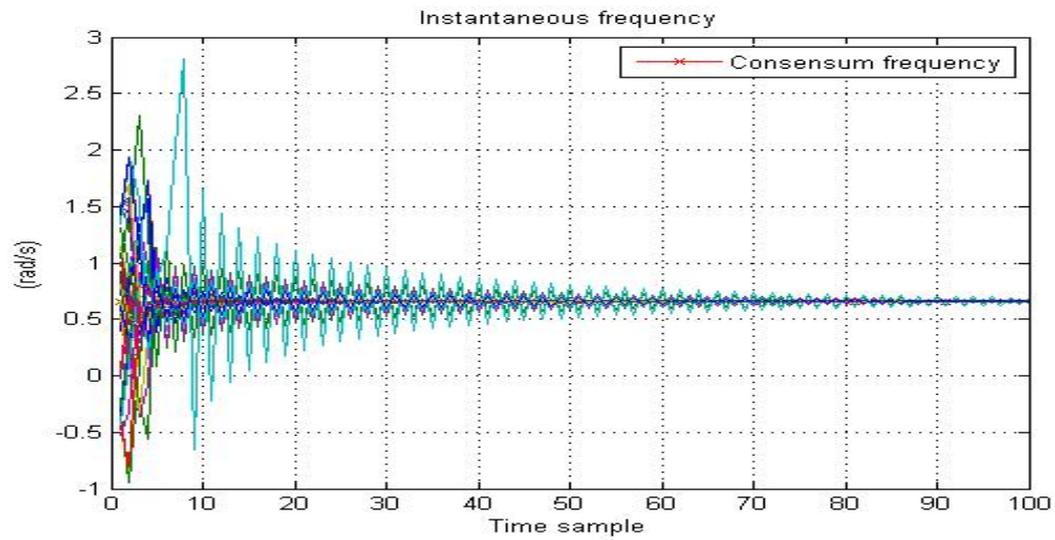


Figura 49: Con un valor de  $K$  muy ajustado al límite, el consenso entre las frecuencias tarda más en producirse debido a la proporcionalidad de la corrección del error entre la frecuencia de un sensor y la frecuencia del otro.

### 3.4 Simulaciones en condiciones con ruido.

Para el caso de consenso en condiciones de ruido, se ha de tener en cuenta que este solo se le introducirá en el proceso de recepción de la señal. Que es ruido aditivo blanco gaussiano. Para las explicaciones y ejemplos tomaremos como referencia un valor de  $SNR = 10$  dB's.

A continuación se muestran unas gráficas ejemplo de cómo el proceso de consenso influye entre los sensores (osciladores), variando estos la frecuencia inicial que tienen, y consensuado todos a otra frecuencia distinta, así como los valores de frecuencia a la que convergen, y la variación del valor del factor  $r_i(t)$  a medida que el consenso se va llevando a termino.

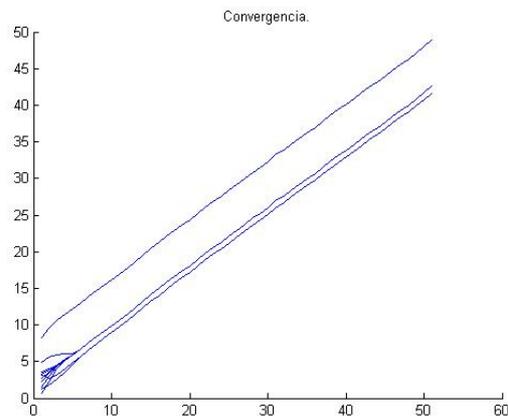


Figura 50: Representación del consenso de 10 sensores a una misma frecuencia con una factor de ruido añadido.

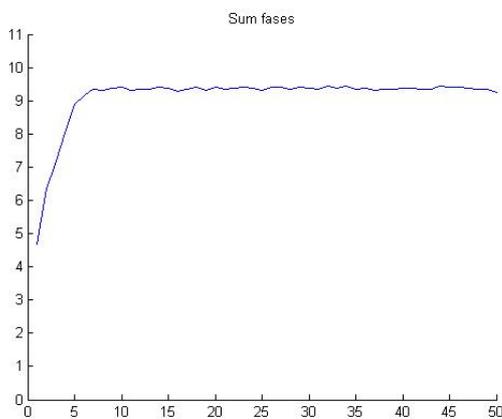


Figura 51: Valor al que llega la función  $r_i(t)$  al realizarse el consenso eficazmente.

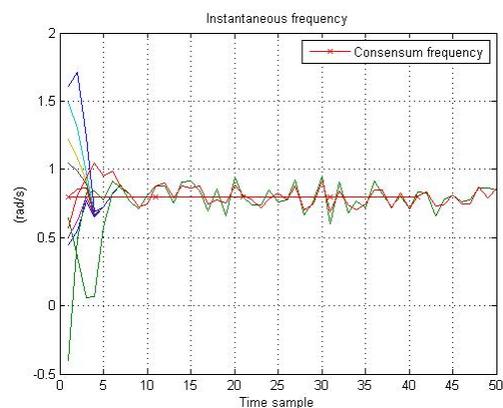


Figura 52: Frecuencia a la que llegan a consenso los 10 osciladores.

Realización de las simulaciones de consenso esta vez para 50 sensores, mostrando así como es posible consensuar un número muy grande de sensores. El proceso es exactamente igual al de 10 sensores, y los resultados obtenidos sobre el consenso son iguales en proceso, aunque no en valor como cabe entender.

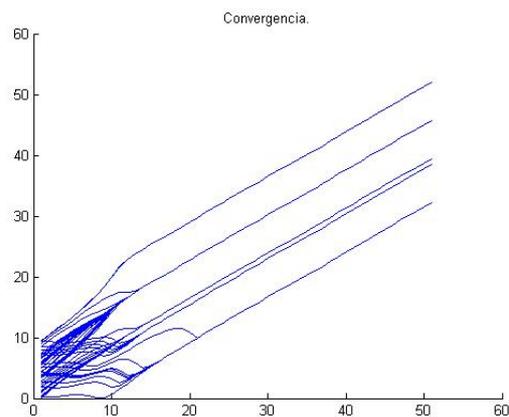


Figura 53: Gráfica de la frecuencia a la que todos los sensores se han consensuado. (50 sensores).

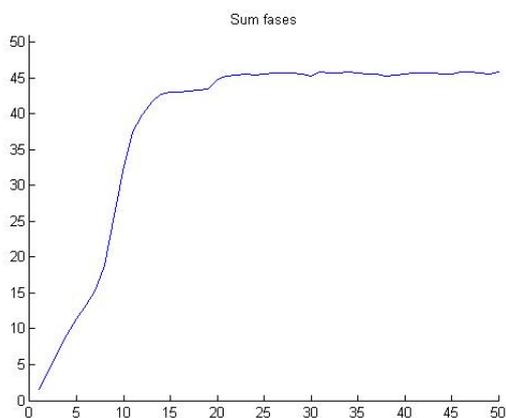


Figura 54: Gráfica  $r_i(t)$  obtenida a partir del consenso de 50 sensores.

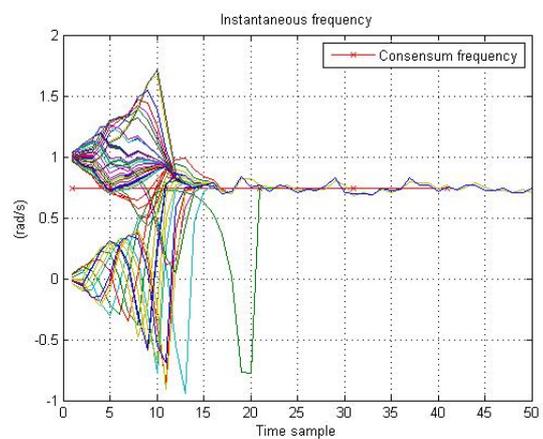


Figura 55: representación gráfica del proceso de consenso de los 50 sensores a una misma frecuencia instantánea.

Seguidamente mostramos la simulación para el caso de no convergencia por un valor de K incorrecto. De esta manera vemos como aun habiéndose realizado el consenso con ruido en los ejemplos anteriores, si el valor de K no es el adecuado, los resultados que se obtiene tampoco son correctos.

Ejemplo con matriz de 10 sensores de los que 4 tenían frecuencia 0 y 6 tenían frecuencia 1.

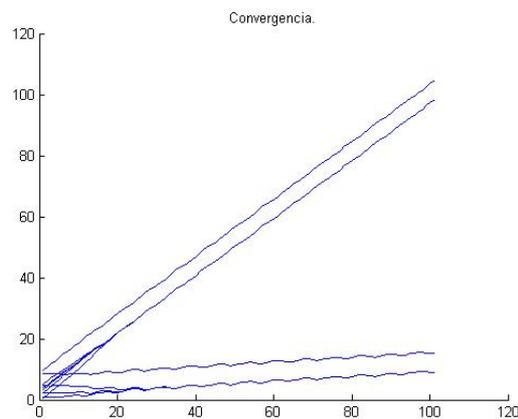


Figura 56: Frecuencias con ruido añadido en recepción de 10 sensores después de intentar realizar el consenso con un coeficiente K que no cumple la ecuación (26) ni (4).

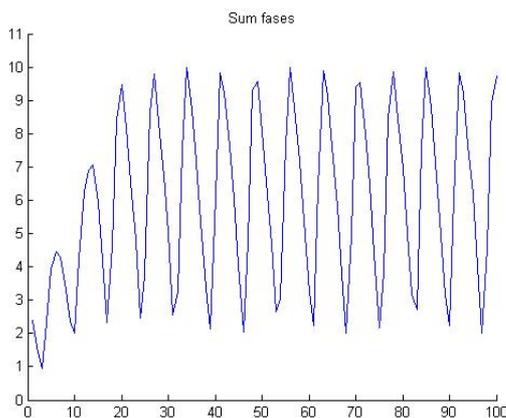


Figura 57: Gráfica  $r_i(t)$  del sistema de 10 sensores no consensuados.

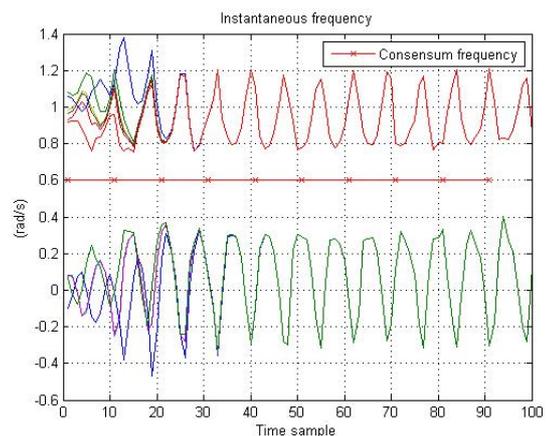


Figura 58: El consenso al que tendrían que tender todos los sensores y oscilar a una misma frecuencia, no se lleva a cabo por un valor de K insuficiente.

### 3.5 Variación del valor de la frecuencia de consenso

Hasta ahora hemos tratado la información matemática de la ecuación (1) por partes. Estudiamos la sincronización de dos frecuencias a partir de las ecuaciones de la recta, que representaban para cada una de ellas su fase inicial y frecuencia. Los valores de K para los cuales la convergencia entre frecuencias puede llevarse a cabo, con un porcentaje de probabilidad adecuado, y la influencia del ruido en la convergencia de las señales.

Ahora vamos a ver como es posible que el consenso de todas las frecuencias de los osciladores de los sensores, tienda hacia la frecuencia de oscilación de un sensor determinado.

Para ello vamos a considerar el valor del coeficiente “ $c_i$ ”. Hasta ahora hemos supuesto que el valor de  $c_i$  era 1. El motivo de esta consideración era para que no afectara en la observación de la convergencia de las frecuencias, y esta convergencia se produjera al valor medio de entre todas las frecuencias de los sensores consensuados. Observando de nuevo la ecuación (1), si analizamos la parte de la ecuación que tenemos representada en la ecuación (38), se intuye claramente, que según el valor que vaya tomando  $c_i$ , nos irá variando más o menos la convergencia hacia una frecuencia u otra de los osciladores de los sensores. Lo que hacemos con este coeficiente  $c_i$ , es dar mayor o menor prioridad al error observado desde cada uno de los sensores con respecto toda la matriz de sensores.

$$\dots \frac{K}{c_i} \sum_{j=1}^N a_{ij} \dots \quad (38)$$

A continuación se muestran unas simulaciones en las que por medio de la variación del valor de  $c_i$ , la convergencia se realiza a una frecuencia determinada, que no sería la misma si la proporcionalidad entre los pesos de las frecuencia de

cada sensor que interacciona fuese la misma. La figura 59 muestra el ejemplo de consenso entre osciladores de la misma frecuencia y con un valor de  $c_i = 1$ , que equivale a decir que todas las frecuencia participan en el consenso en la misma proporción que las demás.

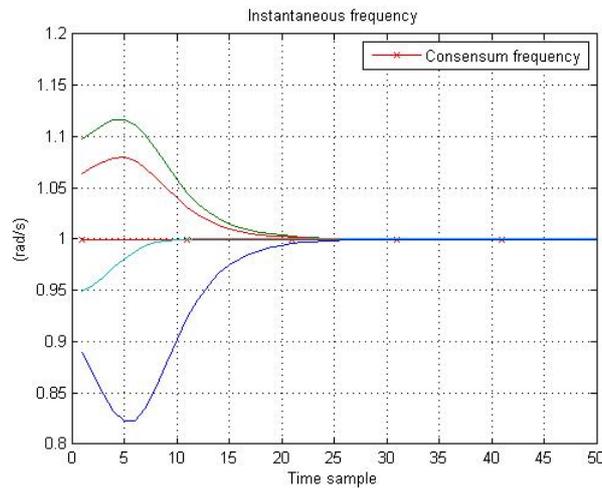


Figura 59: Convergencia de 4 sensores sin efectos del ruido, con fases iniciales diferentes, frecuencias iguales y un mismo valor de coeficiente  $c_i$ .

Se puede observar como la convergencia de todas las frecuencias se realiza a la frecuencia media, Pero en este caso la frecuencia de todos los osciladores es la misma, y el consenso se realiza hacia esta misma frecuencia, pero modificando las fases.

Vemos ahora en la figura (60), un ejemplo de la convergencia de 4 sensores. Pero en este caso no todos tienen la misma frecuencia, sino que uno de ellos tiene otra frecuencia diferente en este caso 0.

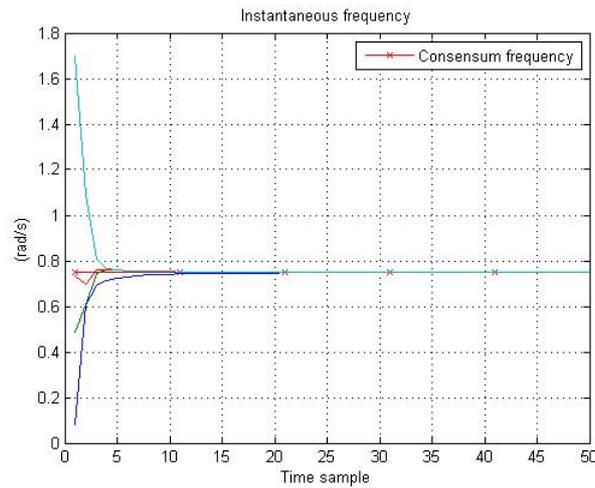


Figura 60: Convergencia de 4 sensores sin efectos del ruido, con frecuencias diferentes y con el mismo valor del coeficiente  $c_i$ .

Tal como está programado, no hay ningún factor que interfiera en el peso de las frecuencias, por que el coeficiente  $c_i$  es igual para todas, y estas tienen el mismo peso dentro del algoritmo de convergencia. Hay tres osciladores con frecuencia 1 y un oscilador con frecuencia 0, el consenso se ha producido a la frecuencia media entre los 4 sensores.

Para el caso de la convergencia de los osciladores, con el efecto de ruido añadido el resultado es el mismo. En la figura 61 se puede ver la simulación del efecto del ruido sobre la convergencia de los 4 osciladores de los sensores, y como sus frecuencias convergen correctamente a la frecuencia media, pero afectadas por el ruido en recepción.

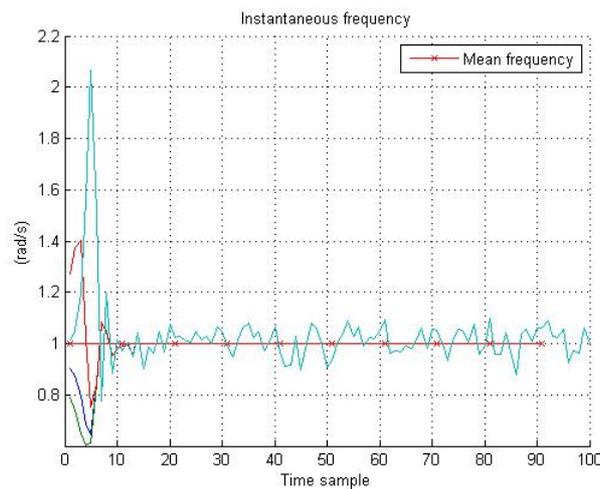


Figura 61: Convergencia de 4 sensores en ambiente ruidoso, con un valor para todos iguales del coeficiente  $c_i$ , y con fases diferentes.

A continuación en la figura (62) se muestra los resultados de las simulaciones en un escenario parecido al anterior, pero con algunas diferencias pues los 4 osciladores de los sensores, ahora pueden oscilar a diferentes frecuencias. Y se ha variado el coeficiente  $c_i$  para un oscilador en particular.

Concretamente el escenario forzado por los valores de partida consta de 4 sensores con frecuencias aleatorias entre 0 y 1, con probabilidades de 0 igual al 20% y probabilidad de que los osciladores estén a frecuencia 1 igual al 80%,

Esto podría ser el resultado de una detección por parte de los sensores. La probabilidad de que se cumpla la hipótesis 1 ( $H_1$ ), es de 0.8 sobre 1, por tanto la probabilidad de que se cumpla la hipótesis 0, es 1 menos la probabilidad de que se cumpla la hipótesis 1. Los osciladores que cumplan  $H_1$ , tendrán una frecuencia de 1, y los que cumplan la  $H_0$ , tendrán frecuencia 0.

El consenso que se obtiene sigue siendo a una frecuencia promedio de la de todos los osciladores que participan en el.

Pero si forzamos a un sensor a tomar una frecuencia diferente, a la vez que establecemos un valor de  $c_i$  para dicho sensor, que le dará mas peso dentro del consenso con los demás osciladores. Veremos como la frecuencia de consenso tiende hacia la del sensor con el coeficiente  $c_i$  que le ha dado mas peso dentro d la red de sensores..

El interés de estas condiciones particulares es para poder ver con mayor claridad el efecto que produce el factor  $c_i$ , dentro de la matriz de sensores, y el echo de asignar una frecuencia diferente a 0 y 1 es para ver que el consenso con dicha frecuencia no es casualidad, sino que viene originado por el algoritmo de ponderación que así lo establece.

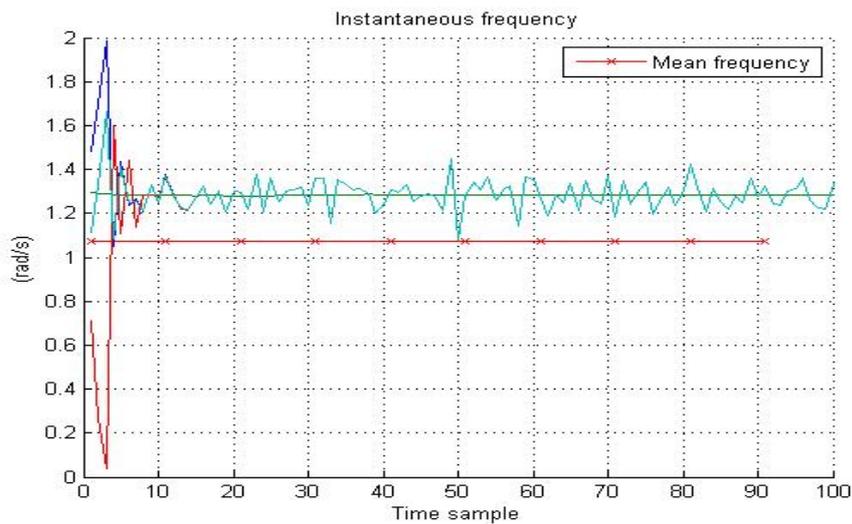


Figura 62: Ejemplo de convergencia de 4 sensores, que convergen a la frecuencia del oscilador con un valor de  $c_i$  mayor que los demás.

En la figura 62, se ve claramente como el consenso de los 4 osciladores no se produce a una frecuencia intermedia de oscilación, sino que por motivo de un mayor peso del sensor debido al coeficiente  $c_i$ , y con una frecuencia diferente al resto de los sensores, “exactamente su frecuencia es de 1,3 rad/s, y para las frecuencias de los demás sensores es de 1 rad/s”, el consenso de toda la matriz de sensores se produce en esa frecuencia diferente del oscilador con respecto al resto de la matriz. Concretamente este ejemplo se realizó con frecuencia 1, 1.3, 1 y 1, su valor medio sería 1.075.

**4.1 Aplicación de la teoría al modelo de señal.**

A partir de las propiedades estudiadas en los apartados anteriores, en este capítulo se explica el proceso para la localización de un evento (fuego, ruido, humo..., depende del tipo de sensor), en una extensión de terreno, mediante la situación de sensores inalámbricos que actúan observándose mutuamente de manera similar a como lo hacen las luciérnagas que comentamos en el capítulo 1.

A través de su mutua observación es posible que estos sensores inalámbricos lleguen a un consenso, dando información de la localización de donde se esta llevando a cabo el evento detectado.

Imaginemos ahora que tenemos una matriz de 4 sensores dispuestos cada uno de ellos en los vértices de un cuadrado imaginario. Las coordenadas que nos marcan la posición dentro de la matriz de cada uno de los sensores que la forman, también nos marcan el valor de las frecuencias con que emiten. De esta manera cada sensor según su posición tendrá dos osciladores,  $(\sigma_j, \sigma_i)$  que nos situaran a este en la matriz, representando  $\sigma_j$  el valor de la componente x, y  $\sigma_i$  el valor de y.

En la figura (63) de la siguiente pagina, se puede ver un escenario simulado con un evento representado con un punto verde (●), y una matriz de 16 sensores, que están representados por los puntos azules (○). Las componentes (x, y) de la posición de los sensores dentro de la matriz, marcan las frecuencias de los dos osciladores que tienen cada sensor. Cuando se produce el consenso, este se realiza entre los osciladores que marcan la posición "x", y por otro lado se realiza el consenso entre los osciladores que marcan la posición "y" de cada sensor.

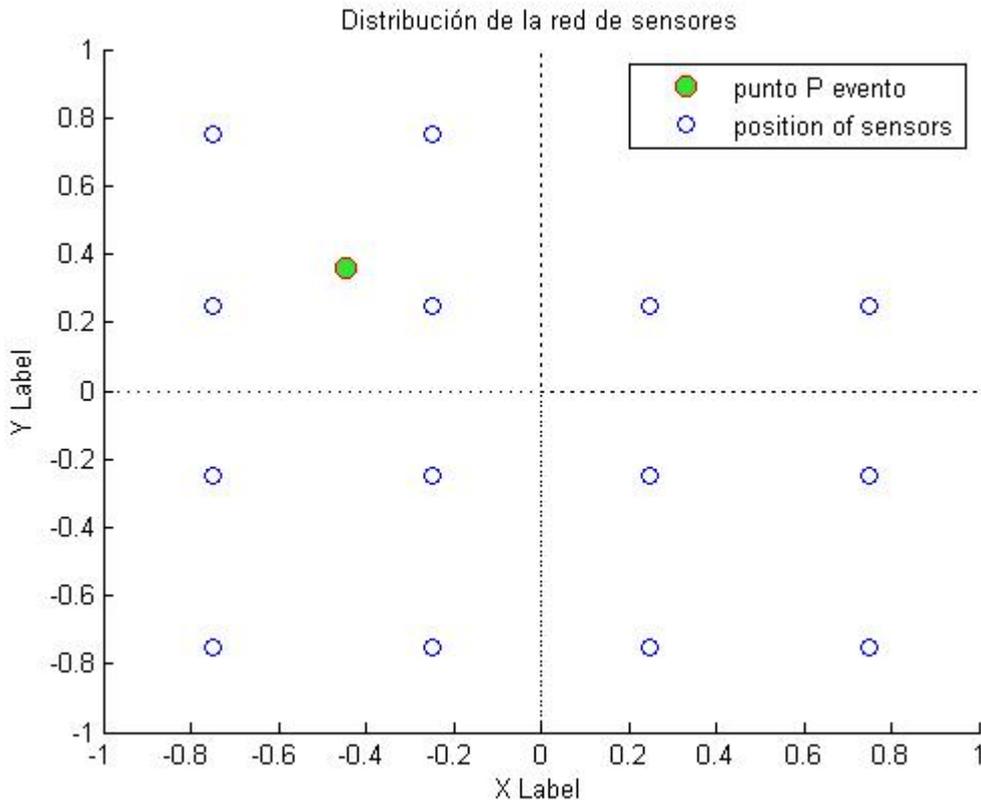


Figura 63: Distribución de los sensores en forma de matriz en la que cada componente (x, y) de la posición del sensor nos da la las frecuencias de sus dos osciladores.

La idea es que a partir de la detección de un evento, “para el que los sensores están diseñados a detectar”, la frecuencia “(x, y)” de emisión de estos sensores, converja con el oscilador o los osciladores de los sensores que mas cerca estén del evento detectado. Esto se producirá al recibir con mayor potencia la señal del evento los sensores más cercanos. La idea es que una red de sensores distribuidos en una superficie plana y que está en condiciones de consenso, puede converger a otra frecuencia desplazada de la promedio de todos los osciladores del consenso. Este desvío de frecuencia esta originado por la presencia del evento en cuestión. Para su representación, se asume que cada sensor conoce sus coordenadas (x, y), que el evento que interesa detectar genera i transmite su potencia de forma radial, y esta va disminuyendo a medida que se expande y se aleja del núcleo del evento generador.

Para que se produzca el consenso a otra frecuencia que no es la promedio de todos los osciladores de los sensores, hay una serie de parámetros que intervienen. La distancia, la potencia de la señal del evento, la posición de cada sensor en la matriz, y la del propio evento.

Hay un parámetro que es clave en la obtención de la posición del evento y que tiene en cuenta todos estos parámetros. Este parámetro es el coeficiente  $c_i$ . La función de este coeficiente es variar la tendencia de la frecuencia de convergencia hacia una que nos de la información de la situación del evento. El calculo de los coeficientes  $c_i$ 's viene definido en la ecuación (39). Loreto Pescosolido [10]

$$P_i = \frac{P_o}{1 + \left[ (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 \right]^{\eta/2} / \lambda^2} \quad (39)$$

Donde  $P_i$  viene dada por la potencia que recibe cada sensor en función de la distancia a la que se encuentra del punto P, y equivale al coeficiente  $c_i$ .

$P_o$  Es la potencia de nuestro sensor. En los datos que hemos utilizado en las simulaciones hemos asumido para todos los sensores de la matriz, una potencia de 1 vatio. Esta potencia se ha de tener en cuenta en condiciones ambientales reales, por la variación que pueda tener según la eficiencia de nuestro sensor y las condiciones de propagación que haya en la zona donde este situado.

El término  $x_i$  representa la coordenada x del sensor para el que estamos calculando  $P_i$ .

$\eta$  Es el exponente de pérdidas que se producen en el camino.

$\lambda$  Parámetro que especifica la potencia empleada en la detección.

De esta manera se crea una matriz de coeficientes  $c_i$ 's para cada uno de los sensores que forman la malla. Esta matriz de  $c_i$ 's le da a cada uno de los sensores el peso o factor con el que van corrigiendo la frecuencia de consenso, acercándola o alejándola del valor de la frecuencia de su oscilador. Este factor en este caso se obtiene en función de la potencia con que se detecta la perturbación desde los

sensores de la matriz, que esta directamente relacionado con la distancia. El sensor que reciba con mayor potencia el efecto de la perturbación (calor en caso de fuego, sonido para detección de ruido, o sensores de humo, etc....) tendrá un valor mayor de coeficiente  $c_i$ , porque está mas cerca, y hará que la corrección de su frecuencia respecto la de los de mas sensores sea muy pequeña o mínima en el caso de sensores que estén en el mismo lugar que el evento, mientras que un sensor que esté mas lejos, la potencia de la señal que recibirá del evento será menor, y por tanto el valor de su  $c_i$  será también menor, originando que el factor de corrección sobre su frecuencia sea mayor.

A partir de la ecuación (39) y una vez se ha llegado al consenso entre todos los osciladores, las coordenadas o distancia del evento detectado vendrá dada por la ecuación (40), para el caso de la coordenada x, y la ecuación (41), para la coordenada y.

$$\hat{x}_c := \hat{\theta}^*(T) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (40)$$

$$\hat{y}_c := \hat{\theta}^*(T) = \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (41)$$

Obteniéndose de esta manera la posición del lugar donde ha sucedido el evento, que vendrá dada por las frecuencias a la que todos los osciladores de la matriz estén emitiendo.

Para que el consenso entre sensores se pueda realizar, tal como comentamos en anteriores temas, el factor K es determinante. Para el caso de una matriz de sensores, teniendo en cuenta que cada sensor ve a todos los demás, y estos a la vez lo ven a el, se ha de calcular la diferencia de cada sensor con todos los demás, y después obtener el valor de la diferencia de frecuencias mas grande, y ese será el valor frontera para la convergencia, Pero ese valor es a partir del cual la convergencia se producirá, se le ha añadir un termino para que no trabaje a límite de su valor donde las probabilidades de no convergencia son muy altas. En la ecuación (42) podemos ver el modelo de cálculo del factor K.

$$Ki = \max\left\{|\omega_i| - |\omega_j|\right\} * \gamma \quad (42)$$

Donde  $\gamma$  es el coeficiente por el que multiplicamos para que el valor de  $Ki$  no esté a límite y ha de ser mayor que 1.

$\omega_i$  es la frecuencia del sensor i, que se recorrerá desde i a j,

$\omega_j$  es la frecuencia del sensor j, que ira recorriendo toda la matriz de sensores .

Como hemos dicho antes, gracias al consenso realizado por parte de una matriz de sensores es posible localizar un evento, pero para ello no es necesario estar en contacto con todos los sensores. Si se tiene contacto con un solo sensor de los que están en convergencia con la red, se puede obtener la información necesaria para localizar el evento. Incluso es posible que el sensor del que estamos haciendo la lectura reciba un nivel de potencia nulo del evento, pero este está en contacto y consenso con otros sensores que si reciben nivel de potencia. De esta forma es posible recibir la información del evento que ha sucedido, sin estar cerca para su detección.

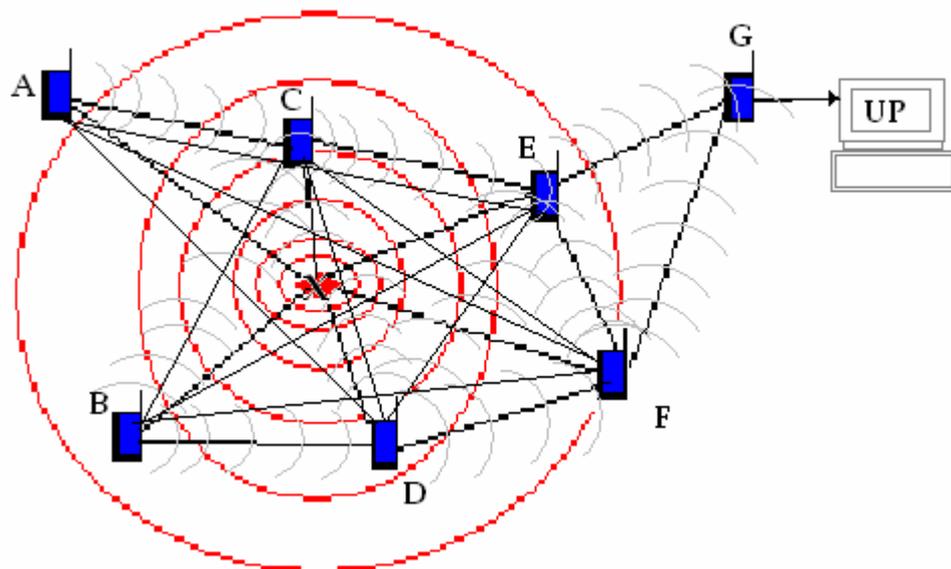


Figura 64, esquema ejemplo de una red de sensores en consenso y enlazada con una unidad de proceso.

En la figura 64 se puede ver un esquema ejemplo de lo que sería una red de sensores que reciben señal de un evento X, los cuales tienen visión entre ellos, menos los sensores A y B que entre si no tienen enlace, pero detectan el evento y están enlazados con otros que también pertenecen a la matriz. El sensor G no recibe señal del evento X, pero realiza el consenso con los sensores E y F, de tal manera que después obteniendo la frecuencia de emisión del sensor G, como esta en consenso con la red de sensores, podremos obtener la situación del evento sucedido.

## 4.2 Simulaciones de consenso y localización.

### 4.2.1 Localización en ausencia de ruido.

Para el caso de simulaciones, tendremos en cuenta 2 casos, las simulaciones en condiciones de ruido, y las que se realizaran en ausencia de ruido.

A continuación se muestran las simulaciones de detección de un evento con ausencia de ruido.

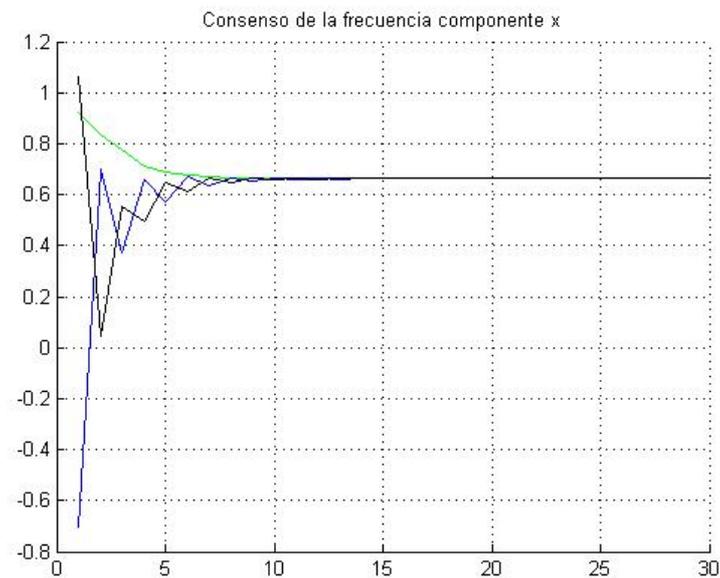


Figura 65: Convergencia de la frecuencia de los sensores que nos da la coordenada "x" de la posición del evento detectado.

En la figura 65 podemos ver como los osciladores de los sensores que nos dan la componente x de la posición, llegan a consenso y a partir de este consenso obtenemos la frecuencia que nos dará la coordenada "x" de nuestro punto del evento detectado.

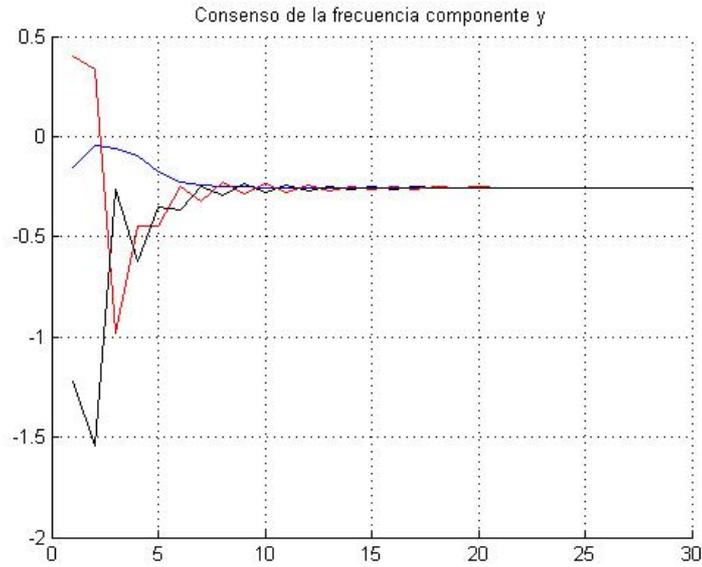


Figura 66: Convergencia de la frecuencia de los sensores que nos da la coordenada “y” de la posición del evento detectado.

De igual manera en la figura 66, se puede observar como con las frecuencias de los osciladores que nos dan la componente “y” de su posición, al llegar estos a consenso influenciados por los coeficientes  $c_i$ 's, obtenemos la frecuencia que nos da la componente “y” de la posición donde se encuentra el evento detectado.

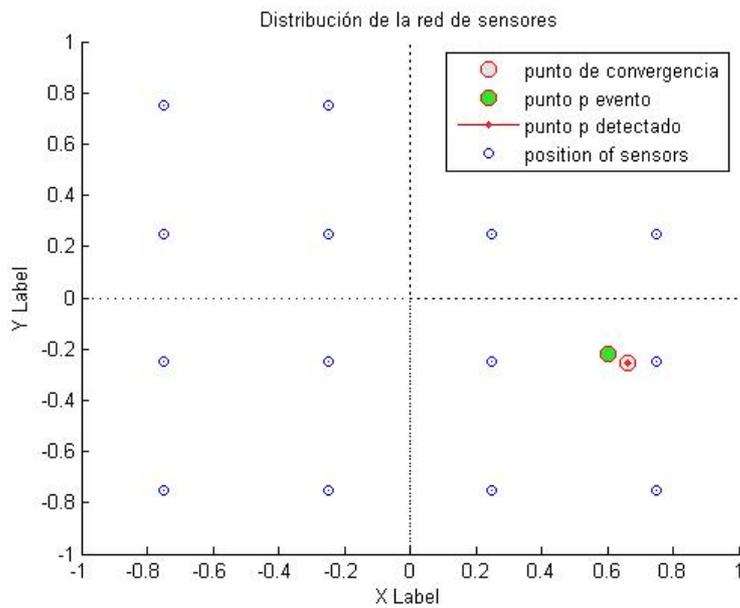


Figura 67: Situación del evento a detectar y la posición del evento detectado.

En la figura 67 se puede ver el evento que se ha de detectar, que es el punto verde (●), el consenso de las frecuencias de los sensores influidos por los coeficientes  $c_i$ 's con el punto (⊙) y el punto (•) es el consenso sin el efecto del ruido. Como no hay ningún parámetro que interfiera en el consenso final de los sensores, la frecuencia de estos consensuados es idéntica a la detectada al final del proceso. Cuando haya algún parámetro que añada alguna interferencia a nuestra señal, la obtención de la posición final variará en proporción a la interferencia añadida "ruido".

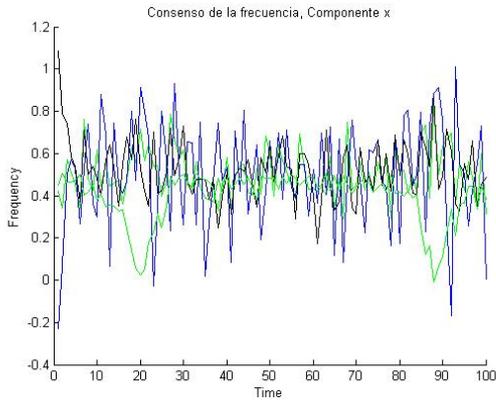
#### **4.2.2 Localización con presencia de ruido.**

La localización de un evento en condiciones de ausencia de ruido hemos visto que se ha producido correctamente dentro de un margen, y la lectura de la frecuencia final a la que llegan todos los osciladores de los sensores coincide con la frecuencia a la que los sensores llegan al consenso.

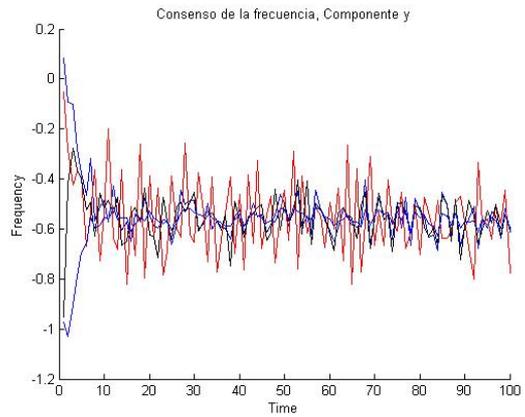
En condiciones de ruido, veremos como la influencia de este sobre la frecuencia final hace que el resultado difiera un poco entre la frecuencia de consenso y la lectura final de la posición del evento. Cuanto menor se la SNR, mayor será el error que tendremos sobre el cálculo de la posición del evento.

A continuación, en las figuras 68 y 69, se muestran los efectos del ruido sobre la convergencia de las frecuencias de los sensores que nos dan las coordenadas (x, y), así como los efectos transmitidos a la localización de un evento. Las simulaciones se han realizado con niveles de SNR de 3.5, 10 y 30 dB's. Se puede observándose claramente, como afecta directamente el nivel de ruido a la convergencia de los osciladores que da la componente "x", y por supuesto a los osciladores convergen y nos dan la componente "y".

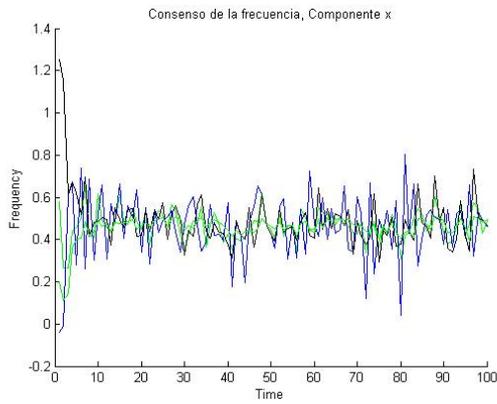
SNR de 3,5 dB's



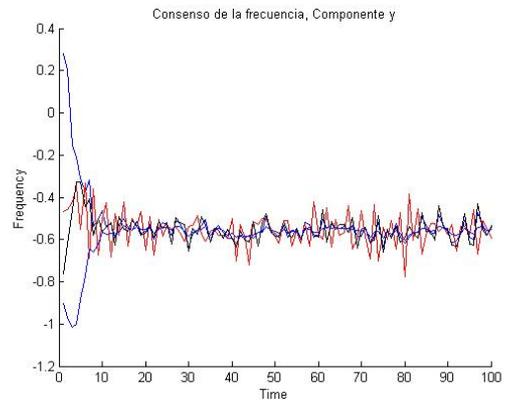
SNR de 3,5 dB's



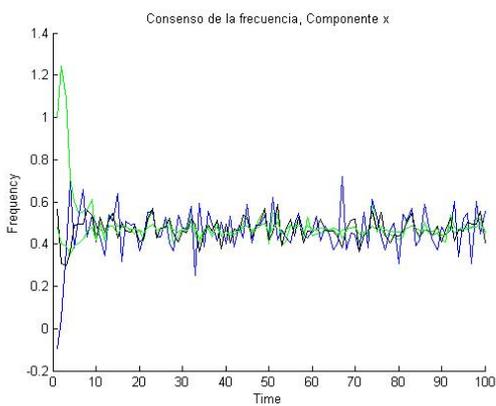
SNR de 10 dB's



SNR de 10 dB's



SNR de 30 dB's



SNR de 30 dB's

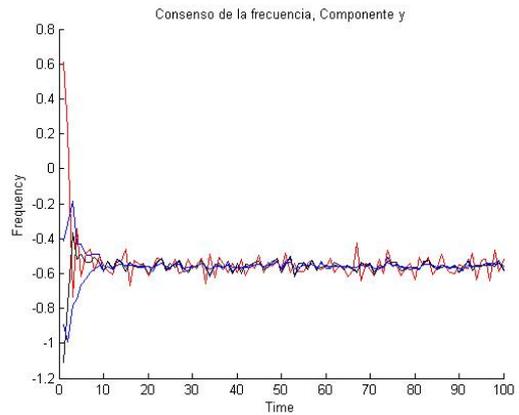


Figura 68: Convergencia de la frecuencia de los sensores que nos da la coordenada "x" de la posición del evento detectado, afectada por ruido añadido. Con una SNR de 3,5 dB's, 10dB's y 30 dB's.

Figura 69: Convergencia de la frecuencia de los sensores que nos dan la coordenada "y" de la posición del evento detectado, afectada por ruido añadido. Con una SNR de 3,5 dB's 10dB's y 30 dB's.

### SNR de 3,5 dB's

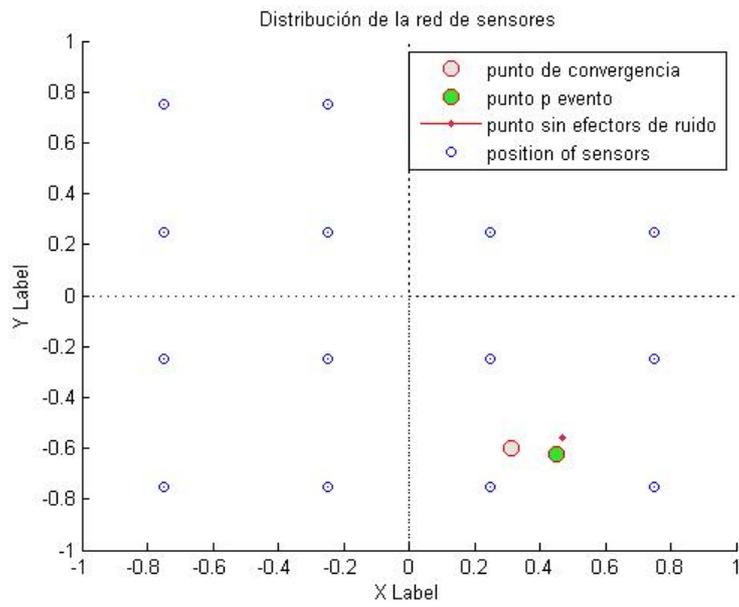


Figura 70: Situación del punto localizado a partir del evento detectado con una SNR de 3,5 dB's.

### SNR de 310 dB's

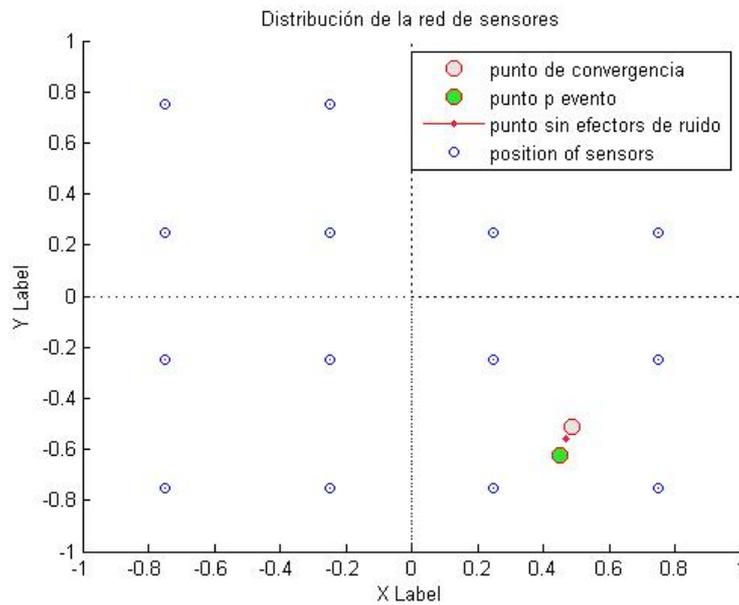


Figura 71: Situación del punto localizado a partir del evento detectado con una SNR de 10 dB's.

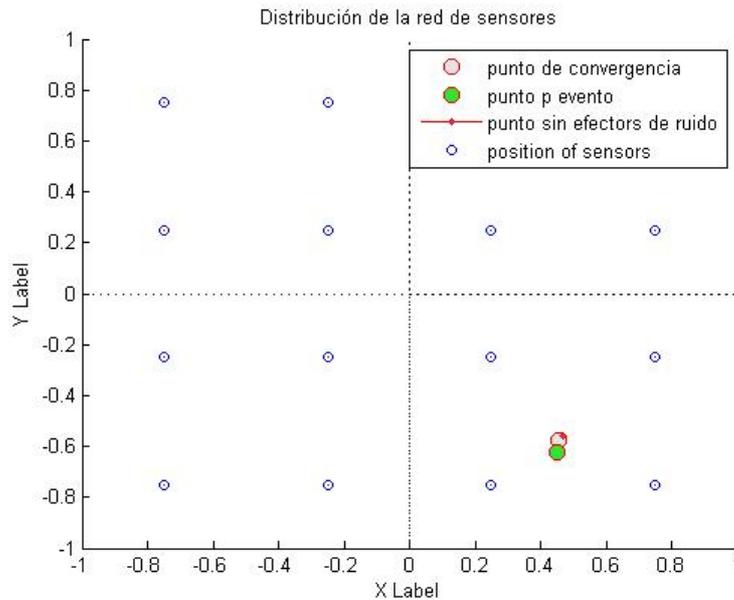


Figura 72: Situación del punto localizado a partir del evento detectado con una SNR de 30 dB's.

Los efectos del ruido en la convergencia y estimación de la posición del evento detectado, están claramente reflejados en las figuras 70, 71 y 72, donde se ve que cuanto mayor es la SNR, la estimación de la posición del evento se hace mas exacta, mientras que a menor nivel de SNR, la desviación sobre la posición estimada del evento es mayor y por lo tanto, la estimación de esta posición es mas inexacta. En el caso de la figura 70, el punto (●) indicador de la posición donde se ha estimado el evento por medio del consenso, está bastante alejado de la posición real del evento. Mientras que en la figura 72, la estimación de la localización del evento, con un nivel de SNR de 30 dB's, es bastante mas acertada y el punto (●) esta tocando la posición real del evento.

## **RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

Con este trabajo se han conseguido los objetivos marcados inicialmente. Realizándose paso a paso y analizando los posibles problemas y los parámetros influyentes desde el principio.

Se ha comenzado explicando lo que es una red de sensores inalámbricos, y de una manera clara y completa se ha ido explicando el proceso de sincronización de sensores con distintas frecuencias. También se ha analizado los parámetros que intervienen en la tendencia de esa sincronización hacia una frecuencia determinada.

Con los resultados y conclusiones obtenidos se ha podido implementar una aplicación en entorno MATLAB, que localiza un evento a partir del consenso de las frecuencias de emisión de los sensores pertenecientes a una red.

- La primera parte del trabajo se ha centrado en el estudio de la sincronización de dos osciladores con frecuencias diferentes, analizando los factores que intervienen en el proceso, y las posibles alteraciones que puede tener este por motivos del ruido añadido.
- Una segunda parte del trabajo, se ha centrado en las características que ha de tener una red de N sensores para que todos ellos se sincronicen y queden en consenso de una manera cooperativa. También estudiando los efectos sobre el consenso que tiene el añadir ruido.
- Y por ultimo como la tercera parte del trabajo, el desarrollo de una aplicación que simula el consenso de una red de sensores. Y utilizando los conocimientos aplicados y obtenidos de la primera y segunda parte, la red de sensores en consenso es capaz a partir de la información que recibe de un evento, localizar la situación donde se encuentra o ha sucedido este.

Se ha de concretar, que las simulaciones aunque han seguido criterios precisos y concretos según las conclusiones obtenidas en los apartados anteriores del estudio, tienen un

margen de precisión que se podría ajustar. Esto es debido a que los parámetros escogidos para la simulación siempre difieren algo de la realidad por ser teóricos. Con información concreta sobre el tipo de sensor y evento que se quiere detectar, así como la potencia de emisión de ellos y otras características, los cálculos serían por supuesto que mas reales y exactos, pero la finalidad con que se ha realizado este trabajo era exponer la teoría de consenso cooperativo entre sensores y dar una utilidad práctica a su realización.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- [1] Pau Closas, Eduard Calvo, Juan A. Fernández-Rubio, Alba Pagès-Zamora. Coupling Noise Effect in Self-Synchronizing Wireless sensor networks. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Dep.. of Signal Theory and Communications, Campus Nord, 08034 Barcelona, Spain.
- [2] C.S. Peskin, Mathematical Aspects of Heart Physiology, Courant Institute of Mathematical Sciences, 1975.
- [3] A.T. Winfree, "Biological rhythms and the behavior of populations of coupled oscillators," J.Theoret. Biol., vol. 16, pp. 15-42, 1967.
- [4] Y.Kuramoto, Chemical Oscillations, Waves and Turbulences, Springer, 1984.
- [5] Yao-Win Hong and A. Scaglione, "Distributed change detection in large scale sensor networks through the synchronization of pulse-couple oscillators," in Proc. of IEEE ICASSP'04, 2004, vol. 3, pp.869-872.
- [6] S.Barbarossa and F. Celano, "Self-Organizing sensor networks designed as a population of mutually coupled oscillators," in Proc. of IEEE SPAWC'05, New York, USA, June 2005.
- [7] S.Barbarossa and F. Celano, "Self-Organizing sensor networks with information propagation based on mutual coupling of dynamic systems," in Proc. of IWWAN'05, London, UK, 2005.

- [8] Kuramoto, Y., Chemical Oscillations, Waves and Turbulence, Dover Publications, August 2003.
- [9] S.Barbarossa, Scutari, G., "Global stability of a population of mutually coupled oscillators reaching global ML estimate through a decentralized approach", to be published on the IEEE Trans. On Signal Processing (July 2007)
- [10] Loreto Pescosolido, Sergio Barbarrosa, Gesualdo Scutari "Decentralized detection and localization through sensor networks designed as a population of self-synchronizing oscillators". IEEE ICASSP '06 2006 vol. 4 pp. 981-984
- [11] Notas Sobre Matlab, Tomas Aranda, J. Gabriel Garcia. Universidad de Oviedo, servicio de publicaciones. DLegal:AS/2978-99. ISBN: 84-8317-180-5
- [12] *MATLAB<sup>R</sup>*. – Using *Matlab<sup>R</sup>* Graphics. Versión 7. The Math Works FAR 12.212. DFARS Part 227.72
- [13] The Languag of Technical Computing Junio 2005 6ª edicion. DFARS 252.227.-7014.

## **APENDICE A**

## **PRINCIPALES SIGLAS UTILIZADAS.**

<b>AWGN</b>	Additive White Gaussian Noise
<b>FFD</b>	Full Function Device
<b>RFD</b>	Reduced Function Device
<b>SNR</b>	Signal Noise Relation
<b>WSN</b>	Wireless Sensor Network

## **APENDICE B.**

## **CONTENIDO DEL CD.**

En el CD se incluye una copia de las aplicaciones utilizadas en las diferentes simulaciones que se han realizado a lo largo de todo el trabajo, así como una copia de la memoria en formato PDF.



En este informe se estudia como es posible utilizar redes de sensores inalámbricos (WSN), para la localización de determinados eventos.

Se hace un estudio previo de cómo una red de sensores puede llegar a estar sincronizada de una manera cooperativa, interactuando todos los sensores de la red entre si.

Primero se realiza el estudio para la sincronización de dos sensores con frecuencias diferentes, viéndose los parámetros que intervienen para que esta sincronización se realice con éxito, y también los efectos que en ella se produce al añadirle ruido.

Seguidamente, se realiza el estudio para la sincronización de redes de N sensores, de manera que interactúen entre ellos de forma cooperativa. Se observan las características de la sincronización cuando todos los sensores llegan a consenso y, después, se busca la forma para que el consenso tienda hacia un valor determinado por mutuo acuerdo de los sensores.

Finalmente, a partir de las características obtenidas en el consenso de N sensores, se realiza una aplicación práctica para la localización de eventos por medio del consenso de estas redes de sensores inalámbricos.

---

En aquest informe s'estudia com es possible utilitzar xarxes de sensors sense fils (WSN), per la localització de determinats esdeveniments.

Es fa un estudi previ de com una xarxa de sensors pot arribar a estar sincronitzada de forma cooperativa, interactuant tots els sensors de la xarxa entre ells mateixos.

Primer, es realitza l'estudi per la sincronització de dos sensors amb freqüències diferents, veient els paràmetres que intervenen per a que aquesta sincronització es realitzi amb èxit, i també els efectes que en ella es produeixen en afegir soroll.

Posteriorment, es realitza l'estudi per a la sincronització de xarxes de N sensors, de manera que interactuïn entre ells de forma cooperativa. S'observen les característiques de la sincronització quan tots els sensors arriben a consens y, després, es troba la forma per que el consens tendeixi cap a un valor determinat per mutu acord dels sensors.

Finalment, a partir de les característiques obtingudes en el consens de N sensors, es realitza una aplicació practica per a la localització de esdeveniments mitjançant el consens d'aquestes xarxes de sensors sense fils.

---

In this report you will see the study about how it is possible to use the wireless sensor networks (WSN), to find the location of specific events.

There is a preliminary study about how a sensor network could be synchronized in a cooperative way, with all sensors network interacting between them.

First of all, it will be the study to synchronize two sensors with different frequencies, looking at the parameters involved in order that this synchronization will be done with success, and to see as well the effects that will be produced after adding the noise factor.

Then, the study will continue synchronizing N sensors network, in order they will interact between them in a cooperative way. We will see the characteristics of this synchronization when all sensors arrive to the consensus and, after that, it will be found the way in order the consensus trend will go to an specific value by common agreement of sensors.

Finally, from the output found at the consensus of  $N$  sensors, it will be explained in a practical application how to find events by the consensus of these wireless sensors networks.