

Hacia la evaluación del desempeño de un modelo de integración de agentes inteligentes & wsn a través de métricas

Tatiana C. Muñoz H., Ing* Demetrio A. Ovalle C., PhD*
Alcides J. Montoya C., MSc†

Fecha de Recibido: 22/01/2010 Fecha de Aprobación: 05/03/2010

Resumen

Las Redes de Sensores Inalámbricas o WSN (por su acrónimo en inglés Wireless Sensor Networks), en general, son redes inalámbricas que se componen de centenares o miles de dispositivos autónomos y compactos llamados nodos sensores. Las WSN son un área emergente de los sistemas embebidos que involucran aplicaciones de gran escala, incluyendo monitoreo, conservación ambiental y control industrial. Sin embargo, aún existen muchas limitaciones en éstas, tales como el consumo de energía, la organización de los nodos en la red, la reprogramación de la red de sensores, la confiabilidad en la transmisión de los datos, la optimización de recursos (memoria y procesamiento), etc., que requieren de investigación por parte de la comunidad científica. Investigaciones actuales incluyen el uso de técnicas de Inteligencia Artificial Distribuida (IAD), específicamente de agentes inteligentes, para hacer frente a los desafíos y limitaciones que éstas traen consigo. De esta forma, se requiere evaluar el desempeño de este modelo integrado (IAD + WSN) a través del uso de métricas. El propósito de este artículo es plantear las principales métricas que serán consideradas para evaluar el desempeño de la integración de agentes inteligentes y WSN.

Palabras clave: Agentes Inteligentes, Sistemas Distribuidos, Redes de Sensores Inalámbricas (WSN), Evaluación del Desempeño, Métricas.

Abstract

The Wireless Sensor Network or WSN, in general, are wireless networks consisting of hundreds or thousands of autonomous and compact devices so called sensor nodes. WSN are an emerging area of embedded systems that involve large-scale applications, including monitoring, environmental conservation and industrial control. However, there are still remain many limitations within those, such as energy consumption, the organization of the nodes in the network, the reprogramming of the sensor network, the transmission reliability of data, optimization of resources (memory and processing), etc., which require further researching by the scientific community. Current research includes the use of Distributed Artificial Intelligence (DAI)

* Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Escuela de Sistemas, Facultad de Minas, Carrera 80 N° 65-223, {tcmunoz, dovalle}@unal.edu.co.

† Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Escuela de Física, Facultad de Ciencias, Calle 59A N° 63-20, amontoya@unal.edu.co.

[‡] Se concede autorización para copiar gratuitamente parte o todo el material publicado en la *Revista Colombiana de Computación* siempre y cuando las copias no sean usadas para fines comerciales, y que se especifique que la copia se realiza con el consentimiento de la *Revista Colombiana de Computación*.

techniques specifically intelligent agents to address the challenges and limitations involved. Thus, it is required to evaluate the performance of this integrated model (DAI + WSN) through the use of metrics. The aim of this paper is to propose the main metrics to be considered in evaluating the performance of the integration of intelligent agents and WSN.

Keywords: *Intelligent Agents, Distributed Systems, WSN (Wireless Sensor Networks), Performance Evaluation, Metrics.*

1. Introducción

Las tecnologías inalámbricas (Wireless Technologies) se están imponiendo sobre las tecnologías alámbricas, debido al alto costo de los cables y de la mano de obra de estas últimas. El bajo tiempo de implementación de los sistemas Wireless y su acceso limpio, sencillo y barato a servicios y redes de telecomunicaciones, las convierten en una solución muy atractiva.

Las Redes de Sensores Inalámbricas o Wireless Sensor Networks (WSN), son un área emergente de los sistemas embebidos que tienen el potencial para revolucionar nuestras vidas en la casa y en el trabajo, con aplicaciones de gran escala, incluyendo monitoreo y conservación ambiental, control industrial, administración de negocios, monitoreo estructural y sísmico, transporte, salud y domótica [1]. Investigaciones actuales incluyen el uso de técnicas de Inteligencia Artificial Distribuida (IAD), específicamente de agentes inteligentes de software, para hacer frente a los desafíos y limitaciones que éstas traen consigo, entre ellas la administración de la energía, haciendo uso del comportamiento inteligente y proactivo de dichos agentes.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente forma: inicialmente, en la sección 2, se presentará un marco teórico asociado a las Redes de Sensores Inalámbricas o WSN, sus componentes básicos, los nodos sensor, las métricas de evaluación para el desempeño de éstas, la Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) y los Sistemas Multi-Agente (SMA). Posteriormente, en la sección 3, se presenta una revisión del estado del arte sobre algunas de las estrategias que se han planteado para enfrentar las diferentes restricciones de las WSN, algunas de las cuales hacen uso de agentes inteligentes de software. Luego, en la sección 4, se realiza un análisis sobre las principales métricas que serán consideradas para evaluar el desempeño de la integración de agentes inteligentes y WSN, las cuales son: la eficiencia energética, el tiempo de vida, la cobertura y el despliegue. Finalmente, se presentan las conclusiones y el trabajo futuro.

2. Marco Teórico

A continuación, se presentará una definición de las WSN, sus componentes básicos, sus características distintivas y algunos de los desafíos que están presentando al momento de diseñarlas. Adicionalmente, se describirán en detalle los componentes básicos de dichas redes, los nodos sensores.

Luego, se explicarán las principales métricas de evaluación para el desempeño de una WSN. Finalmente, se presentará una definición de la IAD y los SMA, incluyendo una descripción de agentes móviles.

2.1 Redes de sensores inalámbricas (Wireless Sensor Network - WSN)

Las Redes de Sensores Inalámbricas o WSN (por su acrónimo en inglés Wireless Sensor Networks), las cuales se definen como sistemas distribuidos de computación ubicua, están siendo usadas actualmente a gran escala para monitorear el estado ambiental en tiempo real [2].

Las Redes de Sensores Inalámbricas o WSN, en general, son redes inalámbricas que se componen de centenares o miles de dispositivos autónomos y compactos llamados nodos sensor [3], los cuales tienen capacidades de sensado, cómputo y comunicación inalámbrica [4] y actúan de manera conjunta con el fin de monitorear o controlar distintos entornos físicos. Cada uno de los nodos de una WSN es esparcido en un campo sensor y toman el nombre de “mote”. Las WSN, constituye normalmente una red inalámbrica ad-hoc y soporta un algoritmo de enrutamiento de múltiples saltos [5].

Los principales componentes de una WSN son una estación base (nodo “sink”) y uno o más nodos sensores (ver Figura 1). Cada nodo funciona sin ataduras, tiene un microprocesador y una pequeña cantidad de memoria para el procesamiento de la señal y la programación de tareas. También, están equipados de uno o más dispositivos de detección tales como arreglos de micrófonos, cámaras de video o fotográficas, infrarrojo (IR), sísmicos o sensores magnéticos [1]. Los sensores son los dispositivos que producen una respuesta medible a un cambio en condiciones físicas como la temperatura y la presión [3]. Las funciones deseables para los nodos incluyen: facilidad de la instalación, auto-identificación, auto-diagnóstico, confiabilidad, conocimiento del tiempo para la coordinación con otros nodos [6], entre otras.

Los nodos retransmiten sus datos sensados directamente a la estación base o por medio de otro nodo (denominado multi-hopping),

dependiendo de la escala de la red. A su vez, la estación base envía comandos a los nodos [7]. Las estaciones base son una o más componentes distinguidos de la WSN con muchos más recursos de cómputo, energía y de comunicación. Actúan como un gateway o nodo recolector entre los nodos sensor y el usuario final [5].

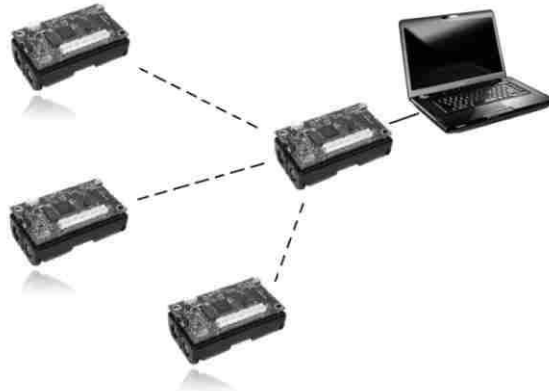


Fig 1. Esquema básico de una WSN (3 motes unidos a un PC a través de una estación base). Las líneas punteadas representan una conexión inalámbrica desde los 3 nodos a la estación base y la línea sólida es una conexión cableada de la estación base al PC [8].

Dado que las WSN a menudo deben recopilar datos durante largos períodos de tiempo y se utilizan en ambientes inhóspitos, donde cambiar las baterías es un inconveniente o un hecho imposible, la mayor parte de la investigación en este ámbito, aborda el reto de reducir al mínimo las necesidades de energía de cada sensor [9].

Los sensores individuales en estas redes deben coordinar típicamente sus acciones de detección con los sensores próximos para alcanzar los objetivos de todo el sistema (por ejemplo, variando sus tiempos de sensado y el tiempo de inactividad con el fin de maximizar la vida de la batería al mismo tiempo que se reduce la detección redundante de áreas superpuestas). Además, la red de forma autónoma debe adaptar sus respuestas en un entorno en continua evolución tal que puede alcanzar los objetivos a largo plazo de todo el sistema sin intervención humana directa [9]. Asimismo, las WSN tienen capacidad de auto-restauración, es decir, si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para enrutar los paquetes de datos. De esta forma, la red sobrevivirá en su conjunto, aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan [10].

Algunas características distintivas de las WSN, tomadas de [2], son:

- a) Topología única de la red
- b) Aplicaciones diversas
- c) Características únicas de tráfico
- d) Limitaciones severas de recursos

Según [1], algunos de los desafíos a los que se les debe hacer frente al momento de diseñar redes de sensores incluyen:

- **Hardware limitado:** Cada nodo tiene capacidades limitadas de procesamiento, almacenamiento y comunicación, igualmente sus fuentes de energía y ancho de banda son limitados.
- **Soporte limitado para el establecimiento de una red (networking):** La red es par-a-par, con una topología mesh y una conectividad dinámica, móvil y no confiable. No existen protocolos de enrutamiento universales o servicios centrales de registro. Cada nodo actúa como un router y como un host de la aplicación.
- **Soporte limitado para el desarrollo del software:** Las tareas son típicamente en tiempo real y distribuidas masivamente, lo cual implica la colaboración dinámica entre nodos y deben manejar eventos de competencia múltiples.

2.2 Motes

Como se había mencionado anteriormente, los motes son unidades autónomas que constan de un microcontrolador, una fuente de energía (casi siempre una batería), un radio transceptor y un elemento sensor [10].

En la Figura 2 se presenta la arquitectura del sistema de un nodo sensor genérico. Este se compone de cuatro bloques principales: fuente de alimentación, la comunicación, la unidad de procesamiento y el bloque de sensores. El bloque de la fuente de alimentación consiste en una batería y un convertidor dc-dc y tiene el propósito de accionar el nodo. El bloque de la comunicación consiste de un canal de comunicación inalámbrico (Transmisor/Receptor de radio). La mayor parte de las plataformas utilizan la radio de corto alcance. Otras soluciones incluyen el laser y el infrarrojo. La unidad de procesamiento se compone de memoria para almacenar datos y programas de aplicaciones, un microcontrolador y un convertidor análogo-digital para recibir la señal del bloque de sensado. Este último bloque liga el nodo al mundo físico y tiene un grupo de sensores y de actuadores que dependen de la aplicación de la WSN [3].

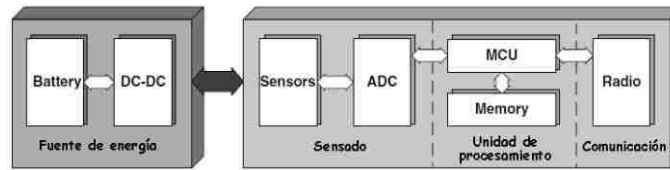


Fig 2. Arquitectura de un nodo sensor genérico.

Existen muchos tipos de sensores, como por ejemplo magnetómetros, acelerómetros, sensores de luz, temperatura, presión, humedad, etc. Los tipos de sensores que son utilizados en un nodo dependen de la aplicación realizada [3].

Según [2], el sistema que integra nodos sensores debe ser:

- **Tolerante a fallas:** El sistema debe ser robusto contra la falla de un nodo (cuando se queda sin energía, por destrucción física, características de hardware y de software, etc.).
- **Escalable:** El sistema debe soportar un gran número de nodos para abastecer las diversas aplicaciones.
- **Duradero:** El tiempo de vida del nodo define enteramente el tiempo de vida de la red y este debe ser bastante alto. El nodo sensor debe ser eficiente energéticamente contra los recursos de energía limitados que tiene, puesto que es difícil substituir o recargar miles de nodos. La comunicación del nodo, las operaciones el computo, de sensado y las operaciones de accionamiento deben ser eficientes energéticamente también.
- **Programable:** La reprogramación de los nodos en el campo podría ser necesaria mejorar la flexibilidad.
- **Seguro:** El nodo debe soportar las siguientes características:
 - a) Control de acceso: para prevenir intentos no autorizadas de tener acceso al nodo.
 - b) Integridad del mensaje: para detectar y prevenir cambios no autorizados al mensaje.
 - c) Confidencialidad: para asegurar que el nodo sensor debe encriptar los mensajes de modo que sólo aquellos nodos que tienen la clave secreta escuchen.
 - d) Protección: para asegurar que el nodo sensor debe proporcionar protección contra adversarios que reutilizan un paquete auténtico para obtener la confianza de acceso a la red, el ataque de hombre en el medio se puede prevenir sellando a tiempo los paquetes de datos.

- **Costeable (accesible):** El sistema debe utilizar dispositivos de bajo costo puesto que la red abarca miles de nodos, etiquetas y dispositivos asociados al sensor. La instalación y el mantenimiento de los elementos del sistema deben también ser significativamente bajas para hacer su despliegue realista.

2.3 Métricas de evaluación del desempeño de una WSN

Se define una métrica como un criterio o indicador que evalúa cuantitativamente o cualitativamente el desempeño de un sistema. Dicha evaluación del desempeño, sirve para comparar 2 o más sistemas y determinar el impacto de agregar o eliminar un componente. Algunas de las características de una buena métrica son: linealidad, confiabilidad, repetitividad, facilidad de medir, consistencia.

Hill [11], enuncia que las métricas de evaluación claves para las WSN, como un todo, son principalmente el tiempo de vida, la cobertura, el costo y la facilidad del despliegue, el tiempo de respuesta, la exactitud temporal, la seguridad y la efectividad en las tasas de muestreo. Muchas de estas métricas de evaluación están interrelacionadas y puede ser necesario disminuir el rendimiento en una de ellas para incrementar el de la otra. A su vez, las métricas de evaluación de un nodo sensor son la energía, la flexibilidad, la robustez, la seguridad, la comunicación, el tiempo de sincronización, el tamaño y coste. A continuación, se explican las métricas de evaluación de una WSN como un todo.

Métricas de evaluación del sistema como un todo

- **Tiempo de vida:** Este término puede ser definido de varias maneras según [12]: (a) el tiempo de duración hasta que algún nodo agota toda su energía, o (b) el tiempo de duración hasta que la calidad de servicio de las aplicaciones no se pueden garantizar, o (c) el tiempo de duración hasta que la red esté disociada. El principal factor limitante para la vida de una red de sensores es el suministro de energía. Cada nodo debe estar diseñado para gestionar su suministro local de energía a fin de maximizar la duración total de la red [11].
- **Cobertura:** La cobertura se define como la relación entre el espacio monitoreado y todo el espacio de posible monitoreo [12]. Es importante tener en cuenta que la cobertura de la red no es igual al rango de los enlaces de comunicación inalámbrica que están siendo utilizados. Técnicas de comunicación múltiples saltos

pueden ampliar la cobertura de la red mucho más allá del alcance de la tecnología de radio. Sin embargo, esto puede aumentar el consumo de energía de los nodos y disminuir la vida útil de la red [11].

- **Despliegue:** El despliegue de nodos es el problema básico en las redes de sensores inalámbricas, ya que estas redes, en algunas ocasiones se deben desplegar en ambientes inhóspitos o de difícil acceso, donde una ubicación manual sería un inconveniente o prácticamente imposible. La dispersión de sensores por aeronaves es una posible solución. Sin embargo, usando esta técnica, la posición real de aterrizaje no se puede controlar debido a la existencia de viento y los obstáculos tales como árboles y edificios. En consecuencia, la cobertura puede ser inferior a los requisitos de la aplicación, no importa cuántos sensores se dejen caer [13] o en algunas otras circunstancias, se puede presentar información redundante.
- **Tiempo de respuesta:** A pesar del bajo consumo de energía, los nodos deben ser capaces de comunicar mensajes de alta prioridad a través de la red tan rápido como sea posible. Si bien estos eventos serán poco frecuentes, pueden ocurrir en cualquier momento sin previo aviso. El tiempo de respuesta puede ser mejorado mediante la inclusión de los nodos que funcionan todo el tiempo. Estos nodos pueden escuchar los mensajes de alarma y las remitirá por backbone de enrutamiento cuando sea necesario. Esto, sin embargo, reduce la facilidad de la implementación del sistema [11].
- **Exactitud temporal:** Se refiere a la correlación de los datos de diferentes nodos para determinar la naturaleza del fenómeno que está siendo medido por medio de la red. Para lograr una precisión temporal, una red debe ser capaz de construir y mantener una base global de tiempo que puede ser usada para cronológicamente ordenar las muestras y eventos. La información de sincronización debe ser continuamente comunicada entre los nodos [11].
- **Seguridad:** Las WSN deben ser capaces de mantener la información importante y de carácter privado fuera del alcance de intrusos. Una posible solución es el uso de encriptación de la información, sin embargo, esto afecta la energía y el ancho de banda de la red [11].
- **Efectividad en las tasas de muestreo:** esta se define como la frecuencia de muestreo en la cual los datos sensados pueden ser tomados por cada nodo individual y comunicarlos a un punto de

recolección en la red. Los diferentes tiempos de muestreo se definen dependiendo de la prioridad asignada a las variables que se requieran medir.

- **Eficiencia energética:** se entiende como el número de paquetes que se pueden transmitir con éxito utilizando una unidad de energía. La colisión de paquetes, los costos del enrutamiento, la pérdida de paquetes y de la retransmisión de estos, reduce la eficiencia energética [12].

Otras métricas de rendimiento incluidas en [12] son:

- **Confiabilidad:** En WSN, la confiabilidad es usada como una medida para mostrar el grado de confiabilidad del evento sentido puede ser reportado al nodo sink. Para las aplicaciones que pueden tolerar la pérdida de paquetes, la confiabilidad puede ser definida como la proporción de los paquetes recibidos con éxito por el número total de paquetes transmitidos.
- **Conectividad:** Para WSN de múltiples saltos, es posible que la red se desconecte porque algunos nodos han dejado de funcionar. La métrica de conectividad puede ser utilizada para evaluar qué tan bien la red está conectada y / o la cantidad de nodos que han sido aislados.
- **Métricas de calidad de servicio:** Algunas aplicaciones en WSN tienen propiedades en tiempo real. Estas aplicaciones pueden tener requisitos de calidad de servicio tales como retraso, pérdida de relación y ancho de banda.

2.4 Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) y Sistemas Multi-Agente (SMA)

La Inteligencia Artificial Distribuida (IAD) es un sub-campo de la Inteligencia Artificial dedicada al desarrollo de soluciones distribuidas para problemas complejos, explotando la solución de problemas en paralelo, la distribución del trabajo y de los recursos. Ésta se ocupa de los principios y del diseño de los Sistemas Multi-Agente, los cuales son sistemas distribuidos compuestos por agentes de software que pueden interactuar potencialmente uno con otro, con el fin de alcanzar sus objetivos individuales y grupales. Esta interacción entre agentes requiere de capacidades de cooperación, coordinación y negociación dinámica.

Dichos agentes, realizan algún conjunto de tareas en beneficio de los usuarios con algún grado de autonomía [14], pueden percibir su

ambiente a través de sensores y actuar sobre él a través de actuadores [15]. En general, los agentes son: autónomos, orientados a metas, colaborativos, flexibles, comunicativos y adaptativos.

En particular, un agente móvil es una clase especial de software o programa de computador que migra entre los nodos de una red para realizar una tarea (o tareas) autónomamente e inteligentemente, en respuesta a cambios en las condiciones en el ambiente de la red [7].

En [16] se destacan algunas de las principales ventajas que surgen de la utilización de dichos agentes móviles en las WSN, entre las cuales se encuentra una mayor flexibilidad para la administración de recursos en la red, ya que estos se pueden auto-posicionar en lugares óptimos dependiendo de las tareas requeridas. Además, reducen el tráfico de la red y los costos de la comunicación, ya que se basan en la premisa que es más efectivo llevar el cómputo a los datos en lugar de transmitir los datos a un lugar específico para luego ser analizados.

3. Antecedentes

Para resolver algunos de los diferentes problemas que se presentan en el momento de la implementación de una WSN, se han evaluado varias estrategias que intentan abordar algunas de las dificultades presentes en éstas.

Gajbhiye, et al. [13], presenta una revisión bibliográfica de varias arquitecturas y algunas estrategias para el despliegue de nodos en las WSN, las cuales son dependientes de los requerimientos de la aplicación. Se describen los puntos claves de dichas estrategias, entre las cuales se incluyen el área de cobertura de los nodos, la búsqueda de los nodos “muertos”, así como los nodos en los límites de la zona de cobertura de otros nodos. Sin embargo, no se presentan las ventajas y limitaciones de las diferentes estrategias abordadas.

Ruzzelli, et al. [17], muestra una descripción de los principales componentes de las WSN, las ventajas y desventajas de las transmisiones a través de múltiples saltos, las diferentes consideraciones que se deben realizar para un despliegue de nodos, entre las cuales se incluyen la cantidad de nodos requeridos, la administración de su energía y la calibración de los sensores por los cuales están compuestos. Además, se resalta la capacidad que tienen los sensores para interactuar con PDAs (Asistente Digital Personal) y teléfonos móviles, permitiéndole a las WSN mejorar la supervisión de una actividad y comunicarse con un usuario de una manera más efectiva y eficiente. Sin embargo, se plantean varios retos en los

aspectos relacionados con la posibilidad de una interacción fluida y transparente entre las WSN y los dispositivos de computación móvil, entre los cuales están la compatibilidad entre los protocolos de comunicación, el manejo de la confiabilidad de los datos, entre otros.

Debido a la flexibilidad, modularidad y aplicabilidad general a una amplia gama de problemas, los agentes de software se han convertido en una de las alternativas exploradas para hacer frente a los desafíos y limitaciones que las WSN traen consigo, como por ejemplo las la administración de la energía, haciendo uso del comportamiento inteligente y proactivo de los agentes de software inteligentes.

Tynan, et al. [18], examinan algunas de las decisiones potenciales que un agente de software puede enfrentar en materia de la administración inteligente de la energía y muestran cómo la noción más fuerte del concepto de “agencia”, la cual se caracteriza por la noción de deliberación y es típicamente realizada a través del uso del paradigma BDI (Belief, Desire and Intention), podría emplearse para permitir un razonamiento mas amplio respecto a decisiones potenciales. Sin embargo, no se realiza ningún análisis sobre los efectos en otros atributos de la red que están directamente relacionados con la administración de la energía, como son la cobertura, la latencia, la exactitud y la longevidad.

Min Chen, et al. [19], proponen el uso de un paradigma de agentes móviles para el procesamiento, agregación y concatenación de datos en una arquitectura de red plana, eliminando así la redundancia de datos y el costo de la comunicación, especialmente en conexiones con bajo ancho de banda. La arquitectura propuesta es llamada “Mobile Agent based Wireless Sensor Network (MAWSN)”, cuyo rendimiento es comparado, por medio de una simulación, con el de la arquitectura tradicional basada en el paradigma cliente/servidor a través del uso de cuatro métricas de evaluación (consumo de energía, retraso promedio end-to-end, una métrica combinada (energía y retraso) y la proporción de entrega de paquetes). En los resultados presentados se puede ver claramente que MAWSN muestra un mejor rendimiento en términos de consumo de energía y en la proporción de entrega de paquetes, sin embargo, tiene una mayor latencia end-to-end bajo ciertas condiciones. No obstante, el montaje físico proporcionaría información adicional, permitiendo así mejorar la arquitectura actual, debido a la necesidad de enfrentarse con las limitaciones físicas de los nodos.

En un trabajo posterior, M. Chen, et al. [20], examinan las posibles aplicaciones de los agentes móviles en WSN, se mencionan algunas de las ventajas que estos le proporcionan a las WSN, entre las cuales se destacan la reducción potencial del consumo del ancho de banda y el

gasto de energía. Además, se discuten los tópicos claves del diseño para tales aplicaciones. Se descompone la funcionalidad del diseño del agente en cuatro componentes: la arquitectura, la planificación de itinerarios, el diseño de sistemas de middleware y la cooperación de agentes.

Hairong Qi, et al. [21], presenta un modelo de computación basado en agentes móviles para CSIP (Collaborative Signal and Information Processing) en redes de sensores, donde a diferencia del modelo de computación tradicional basado en cliente/servidor, el código de procesamiento se mueve hasta la localización de los datos a través de agentes móviles. Dicho modelo, tiene unas características que responden a los desafíos únicos que plantea la red de sensores, como son la escalabilidad, la confiabilidad, la adaptabilidad a las tareas y conciencia de la energía. A su vez, se compara el rendimiento de éste con respecto al modelo tradicional cliente/servidor desde las perspectivas de tiempo de ejecución y consumo de energía a través de una simulación y un estudio analítico.

4. Análisis y utilización de métricas

En esta sección, se realizará un análisis de las 4 métricas que fueron seleccionadas para la evaluación del desempeño en la integración de agentes inteligentes y WSN, las cuales son: el tiempo de vida del sistema, la cobertura, el despliegue de nodos y la eficiencia energética.

Como se había mencionado anteriormente, dado que las WSN a menudo deben recopilar datos durante largos períodos de tiempo y se utilizan en ambientes inhóspitos, donde cambiar las baterías es un inconveniente o un imposible, la mayor parte de la investigación en este ámbito, aborda el reto de reducir al mínimo las necesidades de energía de cada sensor. Sin embargo, se debe tener en cuenta que otros atributos de la red están directamente relacionados con la administración de la energía, como son la cobertura, la latencia, la exactitud y la longevidad. Otro de los factores decisivos en la calidad de la cobertura de la red es el despliegue de los nodos sensores.

En [12], se plantea un caso de estudio donde bajo ciertas condiciones sobre la topología de la red, la distribución de los nodos sensores, su capacidad de almacenamiento en buffer, la congestión de la red, etc., se presenta un modelo para calcular la métrica correspondiente al **tiempo de vida del sistema**. Este modelo se expresa a través de la ecuación (1),

la cual esta en función de la energía máxima de cada sensor, la tasa de transmisión de datos, el número de nodos en la WSN, la longitud del paquete de datos, entre otros.

$$T_L = \frac{E}{r_c e (1 + n_r)} \quad (1)$$

donde:

T_L = Tiempo de vida del sistema (en segundos)

E = Máxima energía de cada nodo sensor (en Juole)

r_c = Tasa total de datos que convergen (en Hertz). Esta es función de la frecuencia de transmisión de datos y del número de paquetes en cada reporte, que a su vez es función de la información total a ser entregada, el encabezado del paquete y su longitud).

e = Energía total consumida al enviar un paquete (en Joule) en un solo salto (hop), la cual depende a su vez de la energía de transceiver, la energía de cómputo y la energía empleada para la escucha y en el momento de inactividad del nodo sensor.

n_r = Número promedio de retransmisiones (constante), la cual es función de la probabilidad de error en un paquete y del número de retransmisiones en sí, debida a errores en los paquetes de datos.

Se plantea la posibilidad de mejorar el tiempo de vida del sistema (T_L) variando parámetros como la longitud del paquete, lo cual afectaría directamente el número de paquetes requeridos para la transmisión de datos y a su vez la probabilidad de encontrar errores en dichos paquetes y por ende el número promedio de retrasmisiones que serian requeridas. Otra posible solución para mejorar T_L , es variar la frecuencia de transmisión de datos, la cual podría mejorar el gasto de energía. Sin embargo, al disminuir la frecuencia, por ejemplo, podría resultar en una carencia en la correlación de tiempo entre los eventos, lo cual afectaría la Exactitud temporal y disminuiría el tiempo de vida del sistema.

A su vez, las métricas de **cobertura** y **despliegue de nodos**, son una parte fundamental que se debe considerar para tener un óptimo desempeño en una WSN. La cobertura, como se había definido anteriormente, es la relación entre el espacio monitoreado y todo el espacio de posible monitoreo y se debe considerar que no es igual al rango de los enlaces de comunicación inalámbrica que están siendo utilizados por los dispositivos. Esta puede ser mejorada implementando técnicas de comunicación de múltiples saltos, sin embargo, esto podría afectar el consumo de energía de los nodos, especialmente de los más cercanos a la estación sink, los cuales deben acarrear un mayor número de datos.

Por otra parte, el **despliegue de los nodos sensores** influye considerablemente en la cobertura, ya que dependiendo de la disposición de éstos en el área a monitorear, se tendría una mayor o menor cobertura, cuya área puede llegar a estar por debajo de los requisitos de la aplicación o inclusive, en un caso opuesto, se podría presentar información redundante, conduciendo a un gasto de energía en la transmisión y recepción de datos que ya pudieron haber sido procesados. Como se puede ver, dichos parámetros también afectarían el tiempo de vida del sistema.

Finalmente, un factor decisivo en la operación de cualquier sistema, y en especial de una WSN por las limitaciones mencionadas anteriormente de sus componentes, es la métrica de **eficiencia energética**, la cual se ve afectada por la colisión de paquetes, los costos del enrutamiento, la pérdida de paquetes y de la retransmisión de estos y cuyos efectos se evidencian fuertemente en el tiempo de vida de la red.

Cabe señalar que algunos autores ya han analizado el desempeño que ha tenido la integración de agentes inteligentes, específicamente de agentes móviles, en las WSN, cuyos resultados son comparados con el modelo de computación tradicional basado en cliente/servidor, mostrando amplias ventajas respecto a este. Sin embargo, en estos trabajos se realiza un análisis por separado de las diferentes métricas involucradas en la evaluación del desempeño de dicha integración, sin considerar las relaciones entre ellas mencionadas anteriormente.

5. Conclusiones y trabajo futuro

La integración de agentes inteligentes en las WSN es promisoría en la medida en que los agentes inteligentes permiten hacer frente a los desafíos y limitaciones que las WSN traen consigo, haciendo uso del comportamiento inteligente y proactivo de dichos agentes.

Un aspecto crucial en la integración, es lograr evaluar el desempeño de ésta considerando los diferentes factores que se encuentran íntimamente relacionados. Para ello se propuso en este artículo una primera aproximación al análisis de las principales métricas de evaluación seleccionadas las cuales son: el tiempo de vida del sistema, la cobertura, el despliegue de nodos y la eficiencia energética. Además se expusieron las ventajas que tendría la utilización de agentes, específicamente de agentes móviles, para mejorar algunas de las limitaciones encontradas.

Como trabajo futuro, a partir de una WSN conformada por nodos sensores de tipo Sun SPOT [22], se pretende evaluar si es posible

mejorar el desempeño de dicha WSN por medio de la integración de técnicas de IAD y realizar el análisis de su desempeño basado en métricas, teniendo en cuenta las relaciones entre estas. Además, corroborar el beneficio en la utilización de agentes inteligentes en dichas redes.

Referencias

- [1] F. Zhao y L. Guibas. *Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach*. Ed. Elsevier/Morgan-Kaufmann, 2004.
- [2] V. Potdar; A. Sharif y E. Chang. *Wireless Sensor Networks: A Survey*. En: *International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, pags. 636-641, 2009.
- [3] M. A. Veiral y D. C. Da Silva. *Survey on Wireless Sensor Network Devices*. IEEE, pags. 537-544, 2003.
- [4] K. Ishibashi y M. Yano. *A Proposal of Forwarding Method for Urgent Messages on an Ubiquitous Wireless Sensor Network*. En: *6th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies*, pags. 293-298, 2005.
- [5] S. Sankaranarayanan. *Intelligent Agent based Information routing in Wireless Body sensor Mesh Networks*. IEEE, pags. 1-5, 2009.
- [6] F. L. Lewis. *Wireless Sensor Networks. Smart Environments: Technologies, Protocols, and Applications*. Ed. D.J. Cook and S.K. Das, John Wiley, New York, 2004.
- [7] R. Tynan, et al. "Multi-Agent System Architectures for Wireless Sensor Networks". *Computational Science – ICCS 2005*. Springer Berlin / Heidelberg, pags. 687–694, 2005.
- [8] R. Tynan; A. Ruzzelli y G.M.P. O'Hare. *A Methodology for the Deployment of Multi-Agent Systems on Wireless Sensor Networks*. *Agent-Oriented Software Development Methodology (AOSDM'2005) Workshop*, En: *Proceedings of 17th International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE'05)*, Julio 2005.
- [9] A. Rogers, N.R. Jennings y D. Corkill. "Agent Technologies for Sensor Networks". *IEEE Intelligent Systems Journal*, IEEE Computer Society, 24(2): 13-17, Marzo 2009.

- [10] N. Aakvaag y J.E. Frey. Redes de sensores inalámbricos. Revista ABB 2/2006. pags. 39-42.
- [11] Hill, J.; "System Architecture for Wireless Sensor Networks". PhD thesis, UC Berkeley (2003).
- [12] K. Sohraby; D. Minoli y T. Znati. Wireless Sensor Networks – Technology, Protocols, and Applications. Ed. WILEY-INTERSCIENCE, John Wiley & Sons. Canadá, pags. 283-301, 2007.
- [13] P. Gajbhiye y A. Mahajan. "A Survey of Architecture and Node deployment in Wireless Sensor Network", En: First International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT 2008), pags. 426-430, 2008.
- [14] A. Y. SEYDIM. (1999). INTELLIGENT AGENTS: A DATA MINING PERSPECTIVE. Dallas.
- [15] N. Vlassis. (2007). A Concise Introduction to Multiagent Systems and Distributed Artificial Intelligence. Greece.
- [16] G. O'Hare. Curso de Multi-Agent Systems(MAS) & Distributed Artificial Intelligence(DAI) [web] <http://www.csi.ucd.ie/content/comp-30240> [Último acceso, 21 Enero 2010]
- [17] A. Ruzzelli, et al., "Advances in Wireless Sensor Networks". Encyclopedia of Mobile Computing & Commerce, (EMCC) Vol. 1. 2006.
- [18] R.Tynan, et al. "Agents for Wireless Sensor Network Power Management". En: Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'05), pags. 413-418, 2005
- [19] M. Chen, et al., "Mobile Agent Based Wireless Sensor Networks". Journal of Computers, 1(1): 14-21, Abril 2006.
- [20] M. Chen, et al., "Applications and Design issues for Mobile Agents in Wireless Sensor Networks". IEEE Wireless Communications Magazine, Special Issue on Wireless Sensor Networking, 14(6): 20-26, Dec. 2007.
- [21] H. Qi, et al. Mobile-Agent-Based Collaborative Signal and Information Processing in Sensor Networks. En: Proceeding of the IEEE, 91(8): 1172-1183, Agosto 2003.
- [22] Sun Spot. <http://www.sunspotworld.com>. Último acceso 18 Marzo 2010.