

# Simulación de Redes de Sensores Inalámbricos Mediante Autómatas Celulares

Pablo Godoy<sup>1,2</sup>, Lucas Iacono<sup>1,2,3</sup>, Ricardo Cayssials<sup>4</sup>, and Carlos García Garino<sup>1,2,3,5</sup>

<sup>1</sup> ITIC, Instituto Universitario para las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, UNCuyo

<sup>2</sup> LAPIC, Laboratorio de Investigación y Desarrollo para la Producción Integrada por Computadora, Carrera de Redes y Telecomunicaciones, ITU

<sup>3</sup> Facultad de Ingeniería, Universidad de Mendoza

<sup>4</sup> Facultad de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur

<sup>5</sup> Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo

**Abstract.** Las redes de sensores inalámbricos (WSN) son una herramienta útil para el sensado remoto de variables ambientales y agrícolas. Están compuestas por nodos que se comunican a través de señales de radio frecuencia.

Los modelos basados en autómatas celulares son apropiados para modelar WSNs, debido a que cada nodo se comporta como una entidad autónoma, posee un conjunto de atributos, e interactúa con otros nodos siguiendo reglas establecidas en el protocolo de comunicaciones.

En este trabajo se propone un modelo para WSN basado en autómatas celulares. El mismo propone modelar los nodos, mensajes de datos y eventos mediante objetos que interactúan entre sí, aplicando la teoría de autómatas celulares.

A modo de ejemplo, se lleva a cabo una implementación del modelo, utilizando la herramienta de modelado y simulación Repast Simphony.

## 1 Introducción

### 1.1 Redes de Sensores Inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN) es un sistema compuesto de dispositivos conocidos como nodos, los cuales están compuestos, generalmente, por cuatro componentes principales:

- Un microcontrolador, que incluye un microprocesador y módulos de memoria.
- Un módulo de comunicación inalámbrica o radio.
- Sensores para medir diferentes variables.
- Fuente de alimentación, generalmente compuesta por pilas comerciales del tipo AA.

Las WSNs tienen un gran número de aplicaciones, tales como: monitoreo del medio ambiente, medición de variables en agricultura, automatización de procesos industriales, automatización de edificios, aplicaciones militares, etc. Se espera que el número de aplicaciones y el número de WSNs crezca considerablemente en los próximos años [1][2][3][4].

Una WSN puede contener diferentes tipos de nodos, cada tipo con diferentes funciones. Pueden tener nodos con funciones especiales según la aplicación, pero en general, todas las WSN tienen los siguientes tipos de nodos:

- Estación base: Sus funciones más importantes son: controlar y gestionar la WSN, recolectar información sobre los nodos (nodos en funcionamiento, nodos con fallas, etc), e inicializar la WSN.
- Nodo sumidero: Es el encargado de recolectar los datos generados por los demás nodos. Generalmente la estación base cumple esta función, aunque puede ser un nodo diferente.
- Nodos router o simplemente nodos: Su función es recolectar datos y transmitirlos al nodo sumidero. Además, tienen la función de reenviar datos generados por otros nodos, de modo que alcancen el destino final. En general, todos los nodos de la mayoría de las WSNs cumplen esta función (excepto la estación base).

Las WSN tienen requisitos de diseño muy estrictos. Entre estos requisitos podemos citar:

- Elevado número de nodos para lograr cobertura adecuada. Este requisito impone la necesidad de nodos de bajo costo. Por consiguiente poseen reducida capacidad de procesamiento y memoria.
- Adecuada vida útil, de acuerdo a la aplicación, sin o con mínimo mantenimiento.
- Apropiada robustez, para soportar las condiciones medioambientales en las cuales deben funcionar los nodos.
- Bajo consumo de energía, debido a que los nodos son alimentados por baterías.
- Elevada confiabilidad para preservar la integridad de datos bajo las diferentes condiciones medioambientales de funcionamiento.
- Adecuada Autonomía acorde a la aplicación, una WSN debe ser capaz de adaptarse a cambios en la topología debido a la reubicación de nodos, nodos que se dañan, resolver fallas, etc.

Los requisitos de diseño antes mencionados y el creciente número de aplicaciones han conducido a investigadores y empresas a desarrollar plataformas de hardware y software específicas para WSN.

## **1.2 Protocolos de Comunicación**

Los nodos que componen una WSN se comunican a través de señales de radio frecuencia. La comunicación es la función, en cada nodo, que generalmente posee

el mayor consumo de energía. Como ejemplo se puede citar que para nodos Tmote Sky [5], el consumo del nodo con la radio apagada es del orden de 2 mA, mientras que con la radio encendida, en modo recepción es 23 mA, y en modo transmisión es de 21 mA. Puede observarse que en el ejemplo citado, la radio consume más de 10 veces la energía que consumen el resto de los componentes del nodo. El alcance de cada nodo está limitada a unos 100 (nodos Tmote Sky).

Solo se comunican con la estación base los nodos que están más cercanos a la misma, los demás nodos envían sus mensajes a otros nodos, y estos los reenvían a otros nodos hasta llegar a la estación base.

Los nodos o la estación base en una WSN generan mensajes de datos. Estos mensajes pueden contener información de variables medidas, eventos detectados, u órdenes que la estación base envía a los nodos. Los mensajes pueden ser generados en momentos de tiempo predefinidos por la aplicación (por ejemplo medir temperatura cada 10 minutos), o cuando ocurre un evento en el área que se está monitoreando (p.e si se detecta fuego, fenómenos naturales, presencia de animales, etc). Los protocolos de comunicación tienen como objetivo que los mensajes generados por los nodos o estación base lleguen a destino.

### 1.3 Autómatas Celulares

Un autómata celular es un sistema que evoluciona en pasos de tiempo discretos. Consiste en una grilla de objetos o celdas, que interactúan y evolucionan de acuerdo a un conjunto de reglas. Estas reglas, para un determinado objeto, determinan el estado del mismo en el siguiente periodo de tiempo, dependiendo del estado de los objetos adyacentes y de si mismo.

Los autómatas celulares se utilizan para modelar el comportamiento de sistemas formados por un gran número de componentes, que siguen un conjunto de reglas, Se utilizan para modelar distintos tipos de sistemas físicos, sociales, etc.

Existen diversas herramientas de software mediante las cuales pueden modelarse y simularse sistemas basados en agentes y autómatas celulares, entre ellas, dos muy populares son NetLogo [6] y Repast [7].

Repast es una plataforma de Software basada en Java, por lo que la transcripción del código generado en Repast a lenguaje C, que es el lenguaje empleado para programar la mayoría de los nodos para WSNs comerciales, parece ser simple. Pensando en trabajos futuros, los cuales pueden incluir herramientas de software que realicen esta transcripción, se ha seleccionado esta herramienta para implementar la simulación descrita en la sección 3.

### 1.4 Estructura del Trabajo

El resto del trabajo se organiza como sigue. La Sección 2 describe en detalle el modelo propuesto para modelar el comportamiento de WSNs a través de autómatas celulares. La Sección 3 describe una implementación mediante simulación del modelo propuesto a modo de ejemplo. Finalmente, la Sección 4 presenta posibles mejoras y concluye este trabajo.

## 2 Modelado de WSNs a Través de Autómatas Celulares

Este trabajo propone una metodología para modelar WSNs basadas en autómatas celulares. Existen trabajos en los cuales se emplean modelos basados en autómatas celulares para WSNs [8][9][10] los cuales modelan los nodos mediante autómatas.

Se plantea modelar los nodos que componen la WSN, los mensajes que se transmiten por esta, y los eventos que puedan ocurrir en el área que está siendo monitoreada. Estos elementos de la WSN se representan como objetos de diferentes tipos, que forman parte de un sistema que se comporta como un autómata celular. A continuación se explican los modelos propuestos para cada uno de estos elementos.

### 2.1 Nodos

Cada nodo se modela mediante un objeto o elemento de un autómata celular estático, dispuestos en forma de grilla (trabajos futuros podrían utilizar nodos móviles). Cada nodo posee propiedades y reglas que deben cumplir. Debido a que los nodos pueden ser de diferentes tipos, cada tipo de nodo se modela mediante diferentes tipos de objetos.

En general, cada nodo puede estar en uno de diferentes estados:

- Radio encendida: Un nodo cuya radio está encendida puede comunicarse con sus nodos vecinos, tener conciencia del estado de los mismos, y recibir, enviar o reenviar mensajes de datos. Su estado depende de sí mismo, del estado de los nodos de su vecindario, y de si tiene mensajes para enviar o no. Además, el modelo puede considerar el caso de que los nodos modifiquen el nivel de potencia con la cual transmiten, con la finalidad de ahorrar energía y adaptarse a distintas condiciones de funcionamiento de la red.
- Radio apagada: Un nodo cuya radio está apagada no puede comunicarse con sus vecinos, por lo que no puede conocer el estado de los mismos, ni recibir o reenviar mensajes. El estado de un nodo cuya radio está apagada no puede depender de sus vecinos, ya que no puede conocer el estado de los mismos, solo puede depender de sí mismo. El microcontrolador puede estar encendido o apagado, lo cual determina la capacidad del nodo de detectar eventos o no.
- Modos de bajo consumo: Los nodos de una WSN pueden estar en diferentes estados de bajo consumo de energía, en los cuales se apaga uno o más periféricos, o se disminuye la frecuencia de trabajo del procesador, con el fin de disminuir el consumo de energía.

Los nodos poseen dos propiedades fundamentales, nivel de energía y un temporizador. Debido a que los resultados de las mediciones son producto de conversiones analógico-digitales, el nivel de energía medido es un número entero entre 0 y un máximo. El modelo planteado en este trabajo consiste en decrementar el valor del nivel de energía un número  $N$  de unidades, por cada

$M$  unidades de tiempo, dependiendo  $M$  y  $N$  del estado del nodo. Si el nivel de energía de un nodo llega a cero, el nodo se considera fuera de servicio.

En estado de radio apagada el nodo no puede conocer el estado de sus vecinos, por lo que la única forma de "despertarlo" es mediante un temporizador interno, que enciende la radio del nodo luego de una determinada cantidad de unidades de tiempo.

El paso de un nodo de radio apagada a radio encendida depende exclusivamente del temporizador interno. El paso del nodo de estado radio encendida a estado radio apagada depende de las reglas que determine el protocolo de comunicación que el usuario implemente.

Los nodos sumideros siguen reglas similares, salvo que están siempre en estado encendido. Este nodo generalmente está alimentado con una fuente de energía no finita, por lo que su energía nunca se agota.

## 2.2 Mensajes

Los mensajes de datos también son modelados mediante objetos. El modelo considera que cada nodo cubre una determinada área del campo que está siendo monitoreado. Cuando se produce un evento en un determinado punto, el nodo que monitorea esa área actuará de acuerdo a las reglas fijadas en el protocolo de comunicaciones, pudiendo generar un mensaje que indique dicha situación. Los mensajes pueden moverse pasando de un nodo a otro, siempre que ambos nodos, es decir el emisor y receptor del mensaje, estén encendidos.

Pueden haber diferentes tipos de mensajes, por ejemplo:

- Mensaje de datos: Contienen datos de mediciones realizadas o información de eventos que han sido detectados. Estos mensajes son retransmitidos por los nodos que los reciben, intentando hacerlos llegar al nodo sumidero.
- Mensajes de información de estado: Son mensajes generados por los nodos que se encuentran encendidos, para notificar dicha condición a sus vecinos. No son retransmitidos por los nodos que los reciben.
- Comandos generados por la estación base: Estos mensajes son generados por la estación base y tienen como destino final cualquiera de los nodos de la red, un grupo de ellos o todos.

Como puede observarse, cada tipo de mensaje tiene sus características y comportamiento propio, por lo que pueden ser modelados mediante diferentes tipos de autómatas celulares.

## 2.3 Eventos

Los eventos pueden ser síncronos, por ejemplo, cuando un nodo toma mediciones a intervalos regulares de tiempo, o asíncronos, por ejemplo, cuando los nodos detectan eventos fortuitos como fuego, presencia de animales, etc. Estos eventos pueden generarse en cualquier punto de la red, y su aparición puede motivar a los demás elementos de la red a realizar determinadas acciones, por ejemplo, generar

un mensaje. Por lo tanto, los eventos también son modelados mediante objetos, que son generados en puntos y momentos específicos o con una determinada probabilidad de ocurrencia, y que interactúan con los demás elementos del sistema, induciéndolos a que realicen las acciones especificadas en el protocolo de comunicación.

### **3 Implementación del Modelo Mediante el Simulador Repast**

#### **3.1 Implementación de los Componentes del Modelo en el Simulador Repast**

Se implementó una red formada por 122 nodos, siendo el nodo central el sumidero de datos. Sin embargo, el número de nodos puede variarse fácilmente, desde unos pocos a cientos de miles. Los nodos están dispuestos en una grilla. Suponemos que cada paso de simulación dura un segundo. Se le da a cada nodo un valor de energía inicial igual a 1000. Por cada paso de tiempo la energía se decrementa una unidad. Esto es equivalente a decir que un nodo encendido de manera permanente tendría una vida útil de 1000 segundos.

#### **3.2 Nodos**

Se definió una clase para implementar tanto los nodos routers como el nodo sumidero. A partir de dicha clase se crearon objetos que simulan los nodos. Esta clase tiene las siguientes propiedades:

- Estado: Puede ser encendido, apagado y sin energía (fuera de servicio).
- Energía: Se decrementa una unidad por cada paso de la simulación cuando el nodo está encendido. Se deja sin cambios cuando el nodo está apagado.
- Tiempo: Variable que indica el tiempo que falta para que un nodo que se encuentra apagado pase al estado encendido. Se incrementa una unidad, desde cero, cada paso de la simulación, cuando el nodo está apagado. Cuando llega a un determinado valor, el nodo pasa a estado encendido. Para las simulaciones llevadas a cabo en este trabajo, se ha dado a esta variable un valor de 120 (2 minutos), pero este valor puede modificarse de acuerdo a las necesidades de la aplicación.

La posición de todos los nodos es estática. Esta posición se fija al momento de creación de los nodos, definiendo las coordenadas de los mismos.

El protocolo que controla el comportamiento de los nodos debe seguir las siguientes reglas:

- Para cada nodo se define un vecindario, formado por aquellos nodos que están a una distancia de una unidad, excluyendo el propio nodo.
- Si un nodo está en estado encendido, seguirá encendido si ninguno o solo uno de sus vecinos están encendidos. De lo contrario se apagará.

- Si el nodo posee un mensaje para ser transmitido, entonces no puede apagarse, independientemente del estado de sus vecinos, hasta que el mensaje haya sido transmitido a otro nodo.
- Si un nodo está apagado, se encenderá solamente cuando su contador interno llegue a cero.

Un nodo conoce la cantidad de vecinos encendidos gracias a los mensajes de información de estado que recibe.

### 3.3 Mensajes

Se generan mensajes periódicamente, y en puntos aleatorios de la grilla. Los mensajes se mueven buscando llegar al nodo sumidero. La simulación supone dos tipos de mensajes: mensajes de datos y mensajes de información de estado. El protocolo que controla el comportamiento de los mensajes datos intenta dos cambios de posición, para cada mensaje, en cada paso de tiempo. El primer intento de cambio de posición es en dirección horizontal, y el sentido es hacia el nodo sumidero (intentando avanzar horizontalmente hacia el nodo sumidero). El segundo intento de movimiento es en dirección vertical, también hacia el nodo sumidero. Ambos intentos de movimiento son independientes, pueden tomar lugar cualquiera de ellos, ambos o ninguno. Cada movimiento sólo toma lugar si tanto el nodo origen como el nodo destino están en estado encendido.

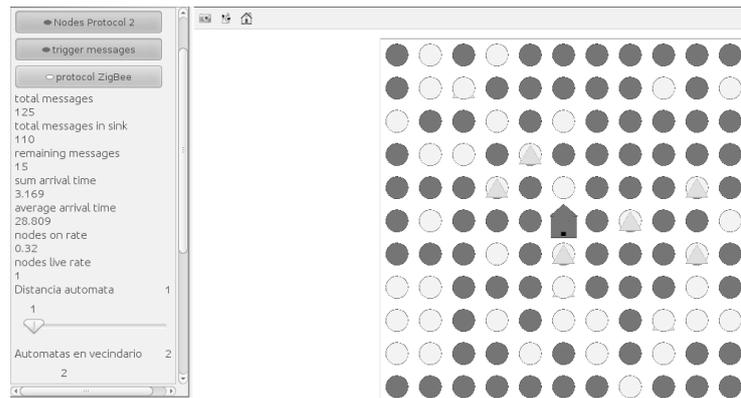
### 3.4 Experimentos

**Métricas de Comparación** Los experimentos llevados a cabo tienen la finalidad de evaluar la performance del protocolo de comunicación propuesto. Para ello definimos dos métricas de comparación:

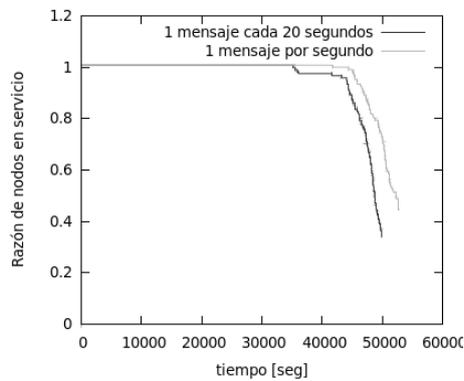
- Relación entre la vida útil de la WSN utilizando el protocolo bajo prueba, respecto a la vida útil cuando todos los nodos están encendidos de manera permanente. Esta métrica permite comparar fácilmente distintos protocolos de comunicación en cuanto a la efectividad de los mismos para maximizar la vida útil de la WSN.
- Latencia promedio: Tiempo medio que demoran los mensajes en llegar al nodo destino.

La primera métrica es de gran importancia, ya que la vida útil es un parámetro clave en una WSN. La idea clave es que la misma permite comparar resultados obtenidos por diferentes usuarios. Requiere de la definición de la vida útil de la red. Un inconveniente es que en la literatura existen diferentes definiciones de vida útil, por lo que la comparación de protocolos de comunicación, utilizando esta métrica, requiere que se haya utilizado la misma definición de vida útil para todos los experimentos.

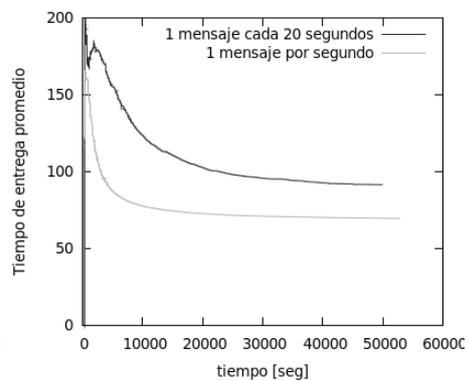
**Resultados** La figura 1 es una representación gráfica de la WSN simulada que genera Repast. Los nodos se han representado con círculos, cuyo color indica su estado: verde cuando está encendido (color claro en la figura 1), marrón si está apagado (color oscuro en la figura 1), gris si está fuera de servicio. Los mensajes se representan mediante triángulos.



**Fig. 1.** Representación gráfica del sistema simulado



**Fig. 2.** Razón de nodos en servicio



**Fig. 3.** Tiempo de entrega promedio

Las figuras 2 y 3 representan la razón de nodos en servicio (aun con energía) y el tiempo de arribo promedio de los mensajes al nodo sumidero, respectivamente, para dos velocidades de generación de mensajes distintas: generación de un mensaje cada 20 segundos y un mensaje por segundo.

En la figura 2 se observa que el tiempo de vida promedio es de aproximadamente 50000 segundos, es decir, 50 veces mayor que el tiempo de vida que tendría la red si los nodos estuvieran encendidos de manera permanente (ver sección 3.1).

El tiempo de entrega promedio de los mensajes es de 100 segundos, como se desprende de las curvas de la figura 3.

Por último, de las curvas de las figuras 2 y 3 puede verse que la modificación de la velocidad de generación de mensajes realizada no tiene una influencia significativa en la demora de entrega promedio ni en la vida útil de la red.

## 4 Conclusiones y Trabajos Futuros

Este trabajo muestra como se puede modelar una WSN mediante autómatas celulares y como sus componentes (nodos, mensajes y eventos) pueden modelarse mediante objetos adecuados.

Se realizó una implementación con la herramienta Repast para mostrar factibilidad de la propuesta.

Además del modelo propuesto, se destaca como aporte adicional del trabajo, la propuesta de una métrica para comparar protocolos de comunicaciones para WSN, respecto a su eficiencia en cuanto a maximizar la vida útil de los nodos.

El modelado de WSN mediante autómatas celulares y agentes, y sus correspondientes simulaciones, pueden ser de utilidad para diseñar protocolos de comunicación y software para las WSN.

Como trabajo futuro se propone la implementación de estos modelos sobre nodos reales, pudiendo utilizarse alguno de los WSN testbeds existentes [11], y la comparación con los protocolos de comunicaciones existentes en la actualidad.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen la ayuda financiera recibida del Instituto de Desarrollo Industrial Tecnológico y de Servicios (IDITS) y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) mediante el proyecto PID-PAE 146 Grid Embebida y de Sensores. Lucas Iacono y Pablo Godoy agradecen las becas doctorales otorgada por la ANPCyT a través del proyecto PAE-PID 146 y el Programa PRH financiado por la ANPCyT y la UNCuyo, respectivamente.

## Referencias

1. J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12):2292 – 2330, 2008.
2. Th. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis. A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks. In *Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pages 719 –724, june 2005.

3. Q. Ho and T. Le-Ngoc. A wireless sensor network testbed. In *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual*, pages 304–309, may 2010.
4. H. Hellbruck, M. Pagel, A. Kroller, D. Bimschas, D. Pfisterer, and S. Fischer. Using and operating wireless sensor network testbeds with wisebed. In *Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), 2011 The 10th IFIP Annual Mediterranean*, pages 171–178, june 2011.
5. Moteiv Corporation. *Tmote Sky, Ultra low power IEEE 802.15.4 compliant wireless sensor module*, 2006.
6. Center for Connected Learning (CCL) and Computer-Based Modeling. Netlogo website, <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
7. Argonne National Laboratory. Repast simphony website, <http://repast.sourceforge.net/>.
8. I. Maity, G. Bhattacharya, S. Das, and BK Sikdar. A cellular automata based scheme for diagnosis of faulty nodes in wsn. In *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1212–1217. IEEE, 2011.
9. S. Misra, V. Tiwari, and M. Obaidat. Lacas: learning automata-based congestion avoidance scheme for healthcare wireless sensor networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 27(4):466–479, 2009.
10. X. Xu, X. Zhang, and L. Wang. Simulating energy efficient wireless sensor networks using cellular automata. In *Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2011 Winter*, pages 3202–3211. IEEE, 2011.
11. L.P. Steyn and G.P. Hancke. A survey of wireless sensor network testbeds. In *AFRICON, 2011*, pages 1–6, sept. 2011.