

# PROLONGANDO VIDA UTIL DE REDES DE SENSORES. MODIFICACION PROTOCOLO AODV

Juan de Dios Benitez, Ricardo Urdinola, Micaela Olivera, Diego Alberto Godoy,  
Eduardo O. Sosa, Edgardo A. Belloni, Hernán Bareiro

Centro de Investigación en Tecnologías de la Información y Comunicaciones (C.I.T.I.C.) -  
Universidad Gastón Dachary (UGD)

{juan.benitez, rurdinola, molivera, diegodoy, eduardo.sosa, ebelloni, hbareiro} @citic.ugd.edu.ar,

## Resumen

En el presente trabajo se presenta una modificación en el protocolo de ruteo multi salto reactivo AODV para WSN el cual permite por medio de la adaptación del calculo de su métrica, poder aumentar la vida de una red disminuyendo la probabilidad de la existencia de segmentaciones en una WSN. Permitiendo de esta manera la optimización de la batería de los nodos extendiendo la vida útil de nodo individual, concluyendo con una vida útil de la red mejorada y aumentada. Dicho estudio es una línea dentro del proyecto denominado “*Diseño de arquitecturas de soporte a la Internet del futuro y Ambientes Inteligentes para su Aplicación en Ciudades Inteligentes – Fase II*” de la Universidad Gastón Dachary.

**Palabras clave:** Protocolo, AODV, Protocolo Reactivo, Redes de Sensores Inalámbricos, IoT

## Contexto

El trabajo se enmarca en el proyecto de investigación denominado “*Diseño de Arquitecturas de Soporte a la Internet del Futuro y Ambientes Inteligentes*” y “*Diseño de arquitecturas de soporte a la Internet del futuro y Ambientes Inteligentes para su Aplicación en Ciudades Inteligentes – Fase II*”, acreditados en la Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UGD por RR.19/A/12 y RR.18/A/14 respectivamente.

Se relaciona y articula directamente con diversos proyectos de investigación acreditados en la Secretaría de Investigación y Posgrado (SECIP) de la Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales de la UNaM, enfocados en las temáticas “*Internet del Futuro*” e “*Internet de las Cosas*”, entre los que se incluyen: Proyecto 16Q457 “*Hacia la Programación de Sensores Inalámbricos en la Forma Web 2.0*”; Proyecto 16Q474 “*Simulaciones de Sistemas Modernos de Comunicación*”; y Proyecto 16Q519 “*Ambientes Inteligentes. Una Mirada a Internet del Futuro*”.

Referente a este proyecto existen 5 tesinas de grado en curso, 3 tesinas de grado finalizadas, un trabajo final de Especialización finalizado, un trabajo de fin de Máster en curso y una Tesis Doctoral en etapa de redacción final.

## Introducción

El aumento de la capacidad de cómputo, la miniaturización de los componentes y el abaratamiento de los dispositivos hacen posible la realización de la Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things) [1] y de la Inteligencia Ambiental [2], en la que los objetos cotidianos contarán con sensores conectados a Internet.

El desarrollo de estas tecnologías brinda oportunidades de aprovechamiento económico e industrial, y a la vez representa un enorme desafío tecnológico. Como parte del desarrollo de las tecnologías de la IoT, las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Network) [3] son un área de continuo estudio y desarrollo [4]. Hoy en día

existen WSNs con miles de nodos, recolectando datos en infinidad de entornos, para todo tipo de fines y a un costo razonable.

## Objetivos

El objetivo general del proyecto marco es: "Diseñar arquitecturas de soporte a Internet del futuro y Ambientes Inteligentes para su aplicación a Ciudades Inteligentes". Como objetivos específicos se indican: A) Especificar el Estado del Arte de la Internet del de Futuro y los Ambientes y Ciudades Inteligentes. B) Determinar los protocolos de ruteo óptimos para WSN y ciudades inteligentes. C) Determinar el impacto en la vida útil de una red WSN de del protocolo AODV estándar por medio de simulaciones. D) Analizar y diseñar una modificación a dicho protocolo para que el mismo sea energéticamente eficiente aumentando la vida útil de una red. E) Simular escenarios de Ciudades inteligentes de redes de sensores inalámbricos. F) Determinar cuál es la métrica correcta que optimiza la vida útil de la red. G) Realizar las simulaciones entre los protocolos AODV estándar y AODV modificado, para analizar la mejora en la red.

## Protocolo AODV

Una de las características más importantes que poseen los nodos en redes WSN es la habilidad de crear redes autónomas. Esto hace realmente fácil la implementación y el mantenimiento de las WSN, pero requiere que los nodos implementen dos funciones muy diferentes: La captura de información del medio para la cual fue distribuido y a su vez el encaminamiento de los paquetes desde el origen hasta el destino seleccionado.

Generalmente, cuando una WSN es implementada, existe un nodo denominado Gateway o nodo sumidero, que posee mayores recursos, tanto energéticos como de hardware, que los otros nodos. Este nodo sink (sumidero) suele tener acceso a internet (si fuera necesario) y fuentes de energía ininterrumpidas. Por otro lado los demás nodos que conforman la red son realmente limitados en lo que se refiere a,

almacenamiento, potencia de cómputo y esencialmente a la capacidad de energía la cual es provista por baterías internas.

Esta última limitación es un factor crítico a considerar. El tiempo de vida de la red depende directamente de la energía residual con la que cuenta cada nodo. Se entiende por energía residual a la energía remanente, que poseen las baterías al ser utilizadas. A medida que los nodos se quedan sin con poca energía, la red puede llegar a sufrir fragmentaciones, causando lo que se denominan islas, las cuales son inalcanzables por el resto de la red a raíz de la limitada potencia de transmisión que poseen los nodos.

La complejidad se incrementa en las redes que implementan métodos de reenvío de paquetes por medio de multisaltos, donde múltiples retransmisiones son necesarias para poder enviar un paquete desde el origen hasta el destino. El mayor consumo de energía se lleva a cabo en los momentos de Transmisión y recepción de información por medio de los nodos. Esto implica que los protocolos y algoritmos de ruteo son claramente esenciales y decisivos en el tiempo de vida de una WSN. Sin embargo uno de los algoritmos mas utilizados por redes WSN como es el AODV (On- Demand Distance Vector Routing) – Un protocolo de camino más corto, sigue un enfoque tradicional con una búsqueda del camino con el costo más bajo a través del conteo de saltos, causando que los nodos participantes en la red concentren su tráfico a través de un grupo de nodos aumentando el consumo de energía en los mismos y de esta forma segmentando la red de manera más rápida. El protocolo *AODV*, es un protocolo de ruteo proactivo el cual actúa únicamente cuando hay la necesidad de transmitir a un destino en particular a través de una ruta desconocida. El proceso se activa iniciando el descubrimiento del camino, lo que básicamente se lleva a cabo por medio de una inundación de la red a través de un paquete de *RREQ* (*Route Request*). Cuando el paquete *RREQ* llega al nodo deseado, un paquete de *RREP* (*Route Replay*) es enviado al nodo origen de por medio de una transmisión en unicast como se puede apreciar en la Fig 1.

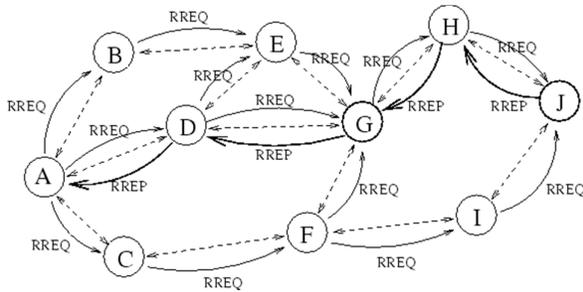


Fig 1: Proceso de descubrimiento de la ruta

El paquete *RREQ* (Fig 2) cuenta con un campo de 8 bits denominado “Hop Count” (conteo de saltos), el cual es incrementado en cada retransmisión del paquete por todos los nodos participantes.

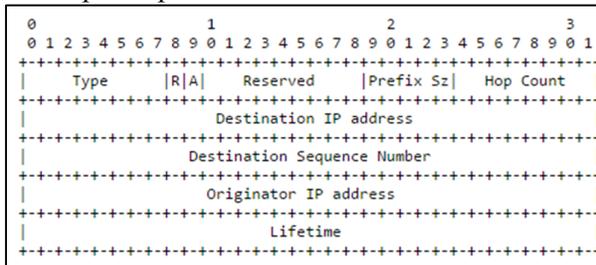


Fig 2: Descripción del paquete RREQ

Cuando el paquete *RREQ* llega al destino, el campo de conteo de saltos tiene el valor necesario para transmitir el paquete entre el nodo origen y el destino. Esta métrica de saltos, representa la distancia física entre ambos nodos. Este costo es almacenado en el nodo, en su tabla de ruteo y determina el camino que se debe utilizar para alcanzar dicho destino

### Modificación del Protocolo AODV

La modificación que se ha realizado en el algoritmo de cálculo de la métrica del protocolo AODV estándar para mejorar la vida de la red, consiste en que durante el proceso de descubrimiento, los nodos al incrementar el costo en el campo de *hop count* en el *RREQ*, en vez de incrementar el valor en una unidad por cada salto, adicionará la energía residual que tiene el nodo que retransmite el paquete en sus baterías, por medio de una aproximación cuadrática. La cual permite una priorización de la ruta mas adecuada frente a otros tipos de aproximaciones como ser lineales,

exponenciales negativas, etc. Estos parámetros se han concluido a través de análisis empíricos de los distintos cálculos de métricas y simulaciones de desempeño de la red.

La ecuación propuesta para determinar este costo es:

$$Cost = -\left(102 + \frac{8}{21}\right)x^2 - \left(152 + \frac{13}{21}\right)x + 255$$

Donde “*x*” es la energía residual relativa en el nodo. Esta ecuación representa una función cuadrática, obteniendo un costo de 255 cuando el nodo no tiene energía y un costo de 0 cuando la energía residual relativa es igual a 1 (Fig 3).

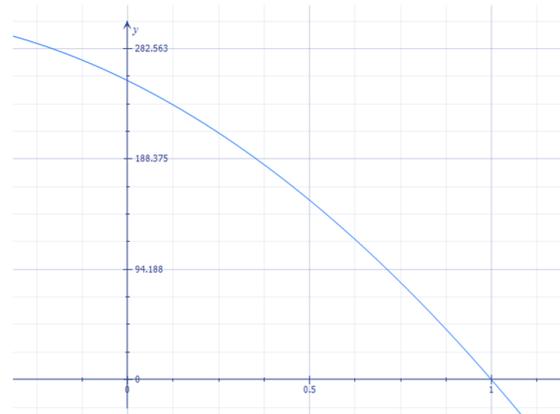


Fig. 3 Función Cuadrática

### Proceso de Simulación

El entorno usado para realizar los análisis y simulaciones cuenta con una PC estándar con un sistema operativo Linux distribución Ubuntu 14.04, en el cual se corre el simulador Omnet++, un simulador de eventos discretos orientado a objetos, distribuido bajo licencia publica académica. Una de las características más importantes del simulador proviene de la capacidad del uso adicional de *frameworks*, los cuales habilitan a la implementación sencilla de los módulos necesarios.

El equipo de desarrollo de Omnet++, mantiene los *frameworks* llamados INET. Sin embargo para este trabajo se ha utilizado una extensión denominada INETMANET, la cual provee la implementación de MANETS, incluyendo el protocolo AODV, desarrollado

por la Universidad Upsala. Esta Extensión ha sido usada y testeada por la comunidad Omnet++ por alrededor de 10 años, por lo que se considera una extensión estable.

Se han llevado a cabo dos series de simulaciones. en la primera de ellas se realizó utilizando el protocolo AODV estándar, mientras que en la segunda fue realizada bajo las mismas características que la anterior pero utilizando el protocolo AODV modificado que se presenta en este trabajo. Cada serie cuenta con 50 corridas del simulador configuradas con diferentes semillas en los generadores números aleatorios, produciendo escenarios distintos. Para poder mantener la coherencia entre las series de simulaciones, se configura al simulador para mantener el mismo juego de semillas entre las dos series, de esta forma se pueden comparar ambos protocolos bajo las mismas condiciones de aleatoriedad.

Cada corrida del simulador consiste en la generación aleatoria de un escenario de 1Km<sup>2</sup> el cual cuenta con 25 nodos sensores distribuidos de manera aleatoria con una probabilidad uniforme. La densidad de nodos resultante permite una alta probabilidad del uso de ruteo multisalto, para realizar el encaminamiento de los paquetes desde un nodo origen hasta el nodo *gateway* o *sink*.

Como se desea que la simulación represente un escenario lo más real posible, se han configurado los nodos de manera que tengan ciclos de transmisión de datos aleatorios en un intervalo entre 50 y 120 segundos.

Todos los nodos están equipados con un modelo de consumo de batería lineal, implementado en el *framework* INETMANET, y el consumo de energía es el único factor determinante en la muerte de los nodos. Los nodos se encuentran equipados con baterías de 3800mAh con un voltaje de 12V.

En la Tabla 1, se puede observar el consumo de energía original configurado en la simulación.

Tabla 1 Consumo energía original.

<i>Estado del nodo</i>	<i>Valor</i>
Ocupado	0.5mA
Recepción	1mA
Espera	1mA
Dormido	0.001mA

Para poder reducir los tiempos de simulación, y debido a las limitaciones de hardware para las simulaciones se ha decidido incrementar cada uno de los consumos en diez mil veces, dando como resultado los valores que se puede ver en la Tabla 2:

Tabla 2 Consumo de Energía Incrementado

<i>Estado del nodo</i>	<i>Valor</i>
Ocupado	5000mA
Recepción	10000mA
Espera	10000mA
Dormido	10mA

Como el interés de este trabajo es la medición del tiempo de vida de la red, se ha decidido que cada simulación se corte al momento que el primer nodo se queda sin batería y muere. En ese momento se realiza la medición de la energía residual de la red para comparar con el protocolo original.

## Resultados

Usando los resultados de las simulaciones, se han comparado los parámetros de tiempo de vida y distribución de energía en la red utilizando ambos protocolos, AODV estándar y AODV modificado.

Como se puede apreciar en la Fig 4, el protocolo AODV modificado tiene un tiempo de vida de la red mayor que el AODV estandar.

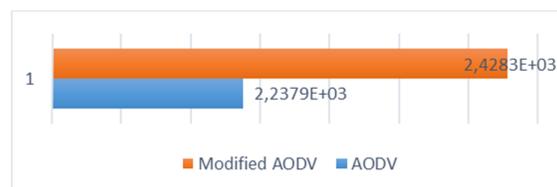


Fig. 4 Comparación del tiempo de vida promedio [Segundos]

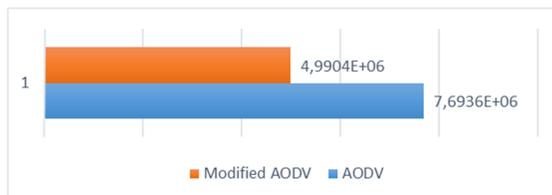
**Tabla 3 Mediciones de Tiempo de Vida promedio de la red**

	<i>AODV</i>	<i>Modif. AODV</i>	<i>Diferencia</i>
<b>Tiempo</b>	2237,9338s	2428,2961s	8,5062%

El resultado muestra una mejora del 8,5% en la utilización del AODV modificado contra el AODV estándar.

Con la utilización del protocolo AODV modificado, se ha buscado obtener una mejor distribución del consumo de energía en la red. El resultado esperado se muestra a través del uso de la desviación estándar utilizada en la representación de una distribución normal.

En la Fig 5 se puede observar los resultados de las simulaciones en notación científica.

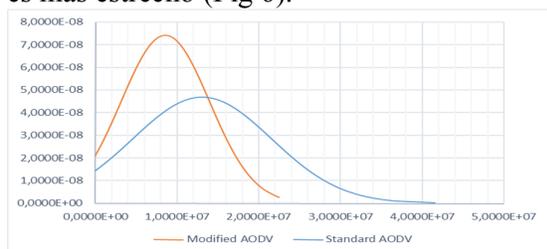


**Fig. 5 Comparación de la Desviación Estándar**

Como se puede ver en la Fig 5 se ha logrado una reducción del 35,13% en la desviación estándar del protocolo modificado sobre el protocolo estándar. Esto significa que los nodos distribuyeron su energía de una manera mas homogénea en la red.

En la practica esto es equivalente a decir que los paquetes utilizaron diferentes rutas, evitando que se concentre una ruta sobre un mismo nodo agotando de manera mas rápida su energía.

Este resultado se puede observar mejor en el estudio de la distribución normal, donde el protocolo AODV con la métrica modificada es más estrecho (Fig 6).



**Fig. 6 Comparación de la distribución Normal**

De otra manera, se puede observar que el protocolo modificado, tiene una curva mas hacia la izquierda que el AODV estándar, con lo que se puede deducir que la curva del protocolo modificado posee una energía residual media menor que el protocolo estándar.

Este es el efecto esperado y deseado en la comparación de ambos protocolos.

## Formación de Recursos Humanos

El equipo de trabajo se encuentra formado por una Doctora en Ingeniería Telemática(España), un Doctor en Ciencias Informáticas, un Doctorando en Tecnologías de la Información y Comunicaciones, Magister y Especialista en Ingeniería de Software, un Maestrando de Ingeniería de la Web, un Maestrando de Redes de Datos, tres auxiliares de investigación graduado, un auxiliar de investigación graduado residente en la ciudad de Córdoba Capital, y ocho auxiliares de investigación en período de realización de trabajos de grado. El número de tesis de grado en curso con proyecto aprobado es de cinco y el número de trabajos de especialidad finalizado es tres dentro de la línea de investigación. Los proyectos de grado se titulan “Diseño de un prototipo para monitoreo eficiente de iluminación basado en WSN utilizando HTML5”, “Contribución a la Gestión de Residuos Domiciliarios como una Aplicación en Ciudades Inteligentes” y “Análisis y comparación de modelos de propagación para optimizar la localización geográfica de Ganado”.

## Bibliografía

- [1] K Ashton, "“That 'Internet of Things' Thing”,” 2009 (rev. 2011).
- [2] Ahola J., Ambient Intelligence, 2001.
- [3] W. Dargie and C. Poellabauer, “Fundamentals of Wireless Sensor Networks - Theory and Practice. Reino Unido: Wiley, West Sussex, 2010.
- [4] Eduardo O. Sosa, Contribuciones al establecimiento de una red global de Sensores Inalámbricos. Tesis Doctoral, Junio 17, 2011.
- [5] DerWerff, T. J. Van, «10 emerging technologies that will change the world,» MIT

- Technology Review, vol. 2, 2003.
- [6] R. M. Perez, «Algoritmos Fiables y Eficientes basados en Enrutamiento Geográfico para Redes Realistas de Sensores Inalámbricos,» Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones, Universidad de Murcia, Murcia, 2012.
- [7] «The Alliance,» ZigBee Alliance, 2014. [En línea]. Available: <http://www.zigbee.org/About/AboutAlliance/TheAlliance.aspx>. [Último acceso: 11 06 2014].
- [8] «ZigBee Specification Overview,» ZigBee Alliance, 2014. [En línea]. Available: <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx>. [Último acceso: 11 06 2014].
- [9] J. P. Dignani, *Análisis del Protocolo Zigbee*, La Plata, Buenos Aires: Facultad de Informática. Universidad Nacional de La Plata, 2011.
- [10] D. Gascón, «802.15.4 vs ZigBee,» Wireless Sensor Networks Research Group, 17 11 2008. [En línea]. Available: <https://web.archive.org/web/20150206055338/http://www.sensor-networks.org/index.php?page=0823123150>. [Último acceso: 11 06 1014].
- [11] Huarui Wu, Chunjiang Zhao, Li Zhu, «Study on an Energy-aware Routing Algorithm for Agriculture WSN,» *TELKOMNIKA*, vol. 11, nº 7, p. 3576 ~ 3584, 2013.
- [12] Fatma Bouabdallah, Nizar Bouabdallah, Raouf Boutaba, «On Balancing Energy Consumption in Wireless Sensor Networks,» Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, School of Computer Science, University of Waterloo, Rennes, France; Waterloo, Canada, 2008.
- [13] Ruben Hidalgo, José Ignacio Moreno, «Routing Design in Wireless Sensor Networks and a Solution for Healthcare Environments,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, vol. 9, nº 3, 2011.
- [14] G. Werner-Allen, K. Lorincz, M. Welsh, O. Marcillo, J. Johnson, M. Ruiz, «Deploying a wireless sensor network on an active volcano,» *IEEE Internet Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 18–25, 2006.
- [15] Q. Wang, M. Hempstead, and W. Yang, «A realistic power consumption,» de *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 3rd Annual IEEE Communications Society on, vol. 1, 2006, pp. 286-295.
- [16] Diego Martínez, Francisco Blanes, José Simo, Alfonso Crespo, *Redes de Sensores y Actuadores Inalámbricas: Una Caracterización y Caso de Estudio para Aplicaciones Médicas en Espacios Cerrados*, Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, España. : XXIX Jornadas de Automática. , 2008.
- [17] Héctor Ramos Morillo, Francisco Maciá Pérez, Diego Marcos Jorquera , *Redes Inalámbricas de Sensores Inteligentes. Aplicación a la Monitorización de Variables Fisiológicas*, Alicante, España : Departamento de Tecnología Informática y Computación, Universidad de Alicante, 2013.
- [18] Jorge del Valle Arias, Rodrigo Palacios Marugán, «Trabajar la tierra con redes de sensores inalámbricos,» BIT, del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación de España (COIT), vol. 1, nº 188, pp. 67-70, 2012.
- [19] J. Quiza. , T. Castelblanco. , D. González, «Sistema Web de Identificación de Ganado Bovino y Monitoreo en Tiempo Real de su Temperatura y Frecuencia Cardiaca Usando Redes de Sensores Inalámbricos,» *ENGI Revista Electrónica De La Facultad De Ingeniería* , vol. 1, nº 1, 2012.
- [20] C. Perkins, Elizabeth M. Belding-Royer, S. Das, «Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing,» 2003.
- [21] T. Shah, N. Javaid, T. N. Qureshi, «Energy Efficient Sleep Awake Aware (EESAA),» COMSATS Institute of Information Technology, 44000, Islamabad, Pakistan, 2012.
- [22] Rahul C. Shah, Jan M. Rabaey, «Energy Aware Routing for Low Energy Ad Hoc Sensor Networks,» *Wireless Communications and Networking Conference*, 2002.
- [23] S.Ganesh, R.Amutha, «Efficient and Secure Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,» Sathyabama University, SSN College of Engineering, Chennai, Tamil Nadu, India, 2013.
- [24] V. Karthikeyan, A.Vinod, P. Jeyakumar, «An Energy Efficient Neighbour Node Discovery Method for Wireless Sensor Networks,» 2014.
- [25] Mostafa SAADI, Moulay Lahcen HASNAOUI, Abderrahim BENI HSSANE, Said BENKIRANE, Mohamed LAGHDIR, «Energy-Aware Scheme used in Multi-level Heterogeneous Wireless Sensor Networks,» 2013.
- [26] M. Tahir, N. Javaid, A. Iqbal, Z. A. Khan, and

- N. Alrajeh, «On Adaptive Energy-Efficient Transmission in WSNs,» International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013.
- [27] Amit Sharma, Kshitij Shinghal, Neelam Srivastava, Raghuvir Singh, «Energy Management for Wireless Sensor Network,» de International Journal of Advances in Engineering & Technology., 2011.
- [28] Q. Nadeem, M. B. Rasheed, N. Javaid, Z. A. Khan, Y. Maqsood, A. Din, «M-GEAR: Gateway-Based Energy-Aware Multi-Hop Routing Protocol for WSNs,» COMSATS Institute of Information Technology, Faculty of Engineering, Dalhaousie University, Islamabad, Pakistan; Halifax, Canada, 2013.
- [29] Y. Khan, N. Javaid, M. J. Khan, Y. Ahmad, M. H. Zubair, S. A. Shah, «LPCH and UDLPCH: Location-aware Routing Techniques in WSNs,» Dept of Electrical Engineering, COMSATS Institute of IT; University of Oulu, Islamabad, Pakistan; Oulu, Finland, 2013.
- [30] Eduardo O. Sosa, Diego Alberto Godoy, Rebeca Díaz Redondo, Rodolfo M. Lilli, Juan de Dios Benitez, «Localización Geográfica de Ganado Utilizando Modelos de Propagación de Señal y XBee,» de XVI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, Ushuaia, Tierra del Fuego, 2014.
- [31] Raúl Luft, Darios Sosa, Diego A. Godoy, Eduardo O. Sosa, Juan D. Benitez, «Validando aplicaciones para Ciudades Inteligentes - Recolección de Residuos Urbanos».
- [32] C. Ltd, «Ubuntu,» [En línea]. Available: <http://www.ubuntu.com/download/desktop>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [33] O. Ltd., «OMNeT++,» [En línea]. Available: <https://omnetpp.org/>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [34] A. A. Quintana, «GitHub,» [En línea]. Available: <https://github.com/aarizaq/inetmanet-2.0>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [35] OMNeT++ developers, [En línea]. Available: <https://inet.omnetpp.org/>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [36] Uppsala University, [En línea]. Available: <http://moment.cs.ucsb.edu/AODV/>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [37] Uppsala University, [En línea]. Available: <http://www.uu.se/>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [38] The MathWorks, Inc., [En línea]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>. [Último acceso: 04 10 2015].
- [39] F. Ren, J. Zhang, T. He, C. Lin y S. Ren, «EBRP: Energy-Balanced Routing Protocol for Data Gathering in Wireless Sensor Networks,» IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 22, n° 12, pp. 2108-2125, 2011.