

## Aplicación de la metáfora de la colonia de hormigas en la administración de direcciones en redes móviles ad hoc

Álvaro Pachón\*  
(correo e: [alvaro@icesi.edu.co](mailto:alvaro@icesi.edu.co))

Manuel Fernández Veiga\*\*  
(correo e: [mveiga@det.uvigo.es](mailto:mveiga@det.uvigo.es)).

Fecha de recepción: 6-02-2009

Fecha de selección: 24-04-2009

Fecha de aceptación: 17-04-2009

### ABSTRACT

Address management is a critical process in a network, because any node wishing to make part of the network must first obtain an address.

Address management in MANETs poses particular challenges, due to their operation conditions, their dynamic topology and the unique events that take place inside them. This article presents an approach for solving the address management problem in this environment, using

the self-organization and emergency principles governing the behavior of social insect colonies, particularly ant colonies. The article presents results that evaluate the proposal's validity and efficiency through several scenarios. Three fundamental aspects were evaluated: Model functionality, efficiency and impact on user applications. The obtained results show the proposed model is able to identify, manage and solve all the events related to address management in a MANET, in an efficient manner.

\* Profesor titular del Departamento de Tecnologías de Información y Comunicaciones en la Universidad Icesi, Colombia

\*\* Profesor titular del Departamento de Ingeniería Telemática en la Universidad de Vigo, España

## KEYWORDS

Address management in MANETs, self-organization, swarm intelligence.

## RESUMEN

La administración de direcciones es un proceso crítico en una red. La posesión de una dirección es un requisito previo e ineludible para cualquier nodo que aspire a hacer parte de ella. La administración de direcciones en una red móvil ad hoc se constituye en todo un desafío, por las particulares condiciones de operación de este tipo de redes, por la naturaleza dinámica y cambiante de su topología, y por el tipo particular de eventos que en ella tienen lugar. En este artículo se presenta una propuesta para resolver este problema. En ella, se aplican los principios de auto-organización y emergencia que gobiernan el comportamiento de las colonias de insectos sociales. En particular, se utilizan los principios de organización y de comportamiento presentes en una colonia

de hormigas para dar tratamiento a los principales eventos que ocurren al interior y entre redes móviles ad hoc. En el artículo se presentan, para diferentes escenarios, resultados orientados a valorar la validez y eficiencia de la propuesta. Para hacerlo se evaluaron tres aspectos fundamentales: la funcionalidad del modelo propuesto, la eficiencia de la solución y la valoración del impacto que sobre el desempeño de las aplicaciones del usuario tiene el modelo propuesto. La evidencia experimental obtenida demuestra que el modelo propuesto es capaz de identificar, gestionar y resolver, adecuada y eficientemente, todos los eventos relacionados con la administración del espacio de direcciones en una red móvil ad hoc.

## PALABRAS CLAVE

Administración de direcciones en redes móviles ad hoc, auto-organización, inteligencia de la colonia.

**Clasificación Colciencias:** Tipo 1

## I. INTRODUCCIÓN

La administración de direcciones es un proceso crítico y fundamental en una red. Para que un nodo pueda convertirse en un interlocutor válido en un intercambio de información, debe estar en capacidad de reconocer y de ser reconocido de forma única por sus pares. Ningún algoritmo de enrutamiento podría trabajar correctamente, si previamente no existe la garantía plena de que todos los interlocutores, las fuentes y los destinos de los intercambios han sido identificados adecuadamente. Por tal motivo, para la operación de una red, es requisito indispensable contar con un mecanismo que se encargue de administrar su espacio de direcciones. En las redes cableadas este rol fue desarrollado inicialmente por el administrador de la red, quien de forma manual se encargaba de asignar las direcciones a las estaciones. Después, cuando el número de estaciones se incrementó, se hizo necesario efectuar esta tarea de forma automatizada. El protocolo DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*) de la familia de protocolos TCP/IP es un ejemplo de un protocolo para la administración automática del espacio de direcciones. Sin embargo, cuando se intenta resolver el problema en el contexto de una red móvil ad hoc, las soluciones existentes que han sido propuestas para los ambientes con infraestructura no resultan ser directamente aplicables.

Los autores,<sup>1</sup> definen una red móvil ad hoc (*Manet*) como un sistema autónomo integrado por un conjunto de nodos móviles que utilizan enlaces inalámbricos para comunicarse. Los nodos constituyen una red temporal sin la ayuda de una administración centralizada y sin los servicios de

soporte con los que regularmente se cuenta en una red convencional. Los nodos se mueven de forma aleatoria y pueden organizarse de forma arbitraria. Por lo tanto, la topología de la red podría cambiar de forma dinámica, muy rápida e impredecible. En este artículo se presenta una propuesta para resolver el problema de la administración del espacio de direcciones en este tipo de redes.

## II. METÁFORA DE LA COLONIA DE HORMIGAS

### A. Inteligencia de la colonia

La naturaleza resulta ser una fuente de inspiración para proponer soluciones a diversos problemas que surgen en el campo de la ingeniería. El autor,<sup>2</sup> define el concepto de inteligencia de la colonia (*Swarm Intelligence*) y se refiere a él como una metáfora, computacional y de conducta, que se fundamenta en el comportamiento colectivo que exhiben los insectos sociales (como las termitas, las abejas y las hormigas) y otras sociedades de animales (como algunas variedades de aves y de peces) para desplegar diferentes formas de "inteligencia" (conductas útiles) que emergen globalmente como resultado de las interacciones locales entre los individuos que hacen parte de la sociedad. En particular, en esta propuesta se utilizará el comportamiento y la dinámica de una colonia de hormigas. Las hormigas son insectos sociales que trabajan y viven en colonias. Como consecuencia de la colaboración mutua que se establece entre ellas, son capaces de mostrar comportamientos muy complejos que les permiten realizar tareas muy difíciles de ejecutar desde el punto de vista individual. Cuando algunas especies de hormigas

requieren ir en busca de alimento, se mueven desde el hormiguero hacia alguna fuente de comida, depositando una sustancia química denominada feromona que les permite establecer una forma de comunicación indirecta a través de modificaciones del espacio físico que perciben. Esta forma de comunicación se denomina estigmergia. Cuando las hormigas no encuentran rastros de feromonas en su camino, se mueven de forma aleatoria, mientras que cuando existe feromona depositada, tienden a seguir este rastro. Por consiguiente, se puede afirmar que las hormigas seleccionan el camino que van a seguir utilizando un mecanismo de decisión probabilístico sesgado por la cantidad de feromona. El depósito de feromona que realizan las hormigas genera un proceso de auto-refuerzo, en el cual, a medida que más y más hormigas siguen una trayectoria, el nivel de feromona se incrementa y la trayectoria queda señalada como óptima hacia la fuente de alimento. A este efecto se lo denomina autocatalítico. Todo el proceso se complementa a través de la acción del entorno natural que provoca la evaporación de la feromona después de cierto tiempo. Este comportamiento de comunicación estigmérgica, de depósito y de evaporación de la feromona es el que permite que las hormigas puedan encontrar caminos más cortos entre el hormiguero y la fuente de comida y ha sido adoptado en telecomunicaciones para resolver el problema del enrutamiento en una red.

### **B. Características de diseño de los sistemas basados en inteligencia de la colonia**

El comportamiento social de los individuos que hacen parte de la colonia

puede ser “traducido” o emulado en un ambiente computacional para resolver diversos tipos de problemas. El autor<sup>2</sup> identifica las características que debería tener un sistema que ha sido diseñado observando los principios de inteligencia de la colonia. Es importante reconocer estas características para imponerlas como premisas de diseño en la formulación de una propuesta para la administración de direcciones en redes móviles ad hoc.

El autor afirma<sup>3</sup> que dos términos: auto-organización y emergencia, pueden definir y caracterizar las metodologías para el diseño de servicios en las redes móviles ad hoc. Respecto de la auto-organización, la define como un proceso en el cual aparece (emerge) un comportamiento en un nivel global de un sistema, a partir de las numerosas interacciones entre los componentes de bajo nivel del mismo. Adicionalmente, las reglas que especifican las interacciones entre los componentes del sistema son ejecutadas exclusivamente a partir de la información local disponible sin referencia a un patrón global. Respecto de la emergencia, el autor define la conducta emergente de un sistema como el resultado de la colaboración entre sus componentes.

Los autores resaltan<sup>4</sup> las siguientes características como las más relevantes en un sistema auto-organizado: a) el control en un sistema auto-organizado está distribuido y está localizado; b) la conducta de las entidades individuales (conducta microscópica) determina la estructura resultante y el funcionamiento del sistema (conducta macroscópica); c) la aplicación de una conducta simple, a nivel mi-

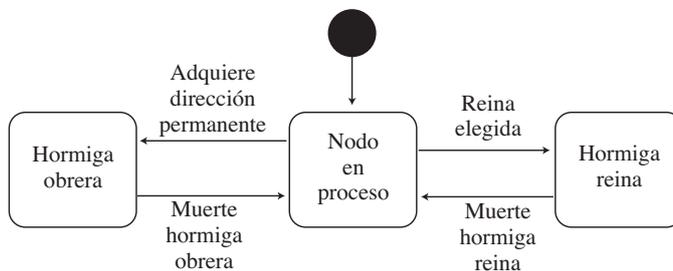
croscópico, determina una organización sofisticada del sistema, aspecto que ha sido denominado como conducta emergente; d) adaptabilidad, de forma coordinada, frente a cambios en el sistema/ambiente; e) el sistema intenta converger hacia estructuras benéficas deseadas, mientras busca evitar otras indeseables; f) la adaptabilidad intrínseca y la naturaleza distribuida producen como resultado un sistema robusto frente a daños y a fallas porque el sistema es capaz de detectar y de corregir daños sin la ayuda externa. Igualmente, ante la falla de un componente, la degradación que experimenta el sistema es una degradación lenta y g) un sistema auto-organizado tiene un alto nivel de escalabilidad. Si el sistema considerado es una red, y al sistema se lo califica como auto-organizado, la consecuencia inmediata será una red más escalable, más flexible, más tolerante a fallos y sobre todo, una red con una menor carga administrativa derivada de la disminución del esfuerzo de configuración que es necesario realizar sobre cada uno de sus componentes.

### III. APLICACIÓN DE LA METÁFORA AL PROBLEMA PROPUESTO

En este contexto se denominará colonia a una red móvil ad hoc. En un

área geográfica determinada, podrían existir una o varias colonias. En cada colonia habrá una y solo una hormiga reina. Los nodos de la red se mueven de forma aleatoria y generan una topología de carácter dinámico, esto es, variable en el tiempo. Estos nodos pueden asumir cualquiera de los siguientes roles: a) *nodo en proceso* (*de adquirir una dirección permanente*). Un nodo asumirá este rol cuando acaba de inicializarse y no cuenta con dirección alguna y no participa de ninguno de los procesos de la red móvil ad hoc; b) *hormiga reina*. Un nodo asume este rol cuando tiene la responsabilidad por la asignación de direcciones. En esta metáfora, asumiremos que cada vez que asigna una dirección, la hormiga reina estará creando una nueva hormiga obrera para la colonia; c) *hormiga obrera*. Un nodo asume este rol cuando participa en el proceso colectivo y distribuido para la asignación de direcciones (en este caso se comportará como un intermediario ante la hormiga reina en el proceso de adquisición de la dirección) y cuando participa del proceso colectivo de mantenimiento de la topología. En la Figura 1 se muestra el ciclo de vida de un nodo.

En el contexto de la metáfora propuesta, la inicialización de la colonia ocurre cuando la hormiga reina, la primera hormiga de la colonia, asume



**Figura 1.**  
Ciclo de vida de un nodo.

la responsabilidad de proporcionar la identidad a la colonia (a través de un identificador de red (NETID) que ella selecciona) y por asumir inicialmente todas las tareas de la colonia. Luego, en la medida que los nodos empiezan a adquirir direcciones y a “nacer para la colonia”, nace la etapa de eclosión de las primeras obreras, en este momento aparece la especialización funcional. Los nodos de la colonia, comienzan a asumir sus roles, como hormiga reina y como hormigas obreras. La hormiga reina es la responsable por la creación de nuevos individuos. La colonia inicia entonces su fase de expansión/crecimiento que supone el nacimiento de las obreras (el proceso de asignación de direcciones) y su muerte (cuando deciden

abandonar la red). Es posible que la colonia pase por un estado temporal de inestabilidad como consecuencia de procesos de mezcla y de partición de la red, o como consecuencia de la desaparición de la reina. Estos eventos deben ser resueltos y su solución producirá un retorno de la colonia a la fase normal de crecimiento, o a una desaparición de la misma como consecuencia de la desaparición de la reina. Cada vez que una hormiga muere para la colonia, tiene la posibilidad de volver a nacer como una nueva reina o como una nueva hormiga obrera en otra colonia y repetir nuevamente el ciclo. El ciclo de vida de la colonia en el escenario de simulación se muestra en la Figura 2.

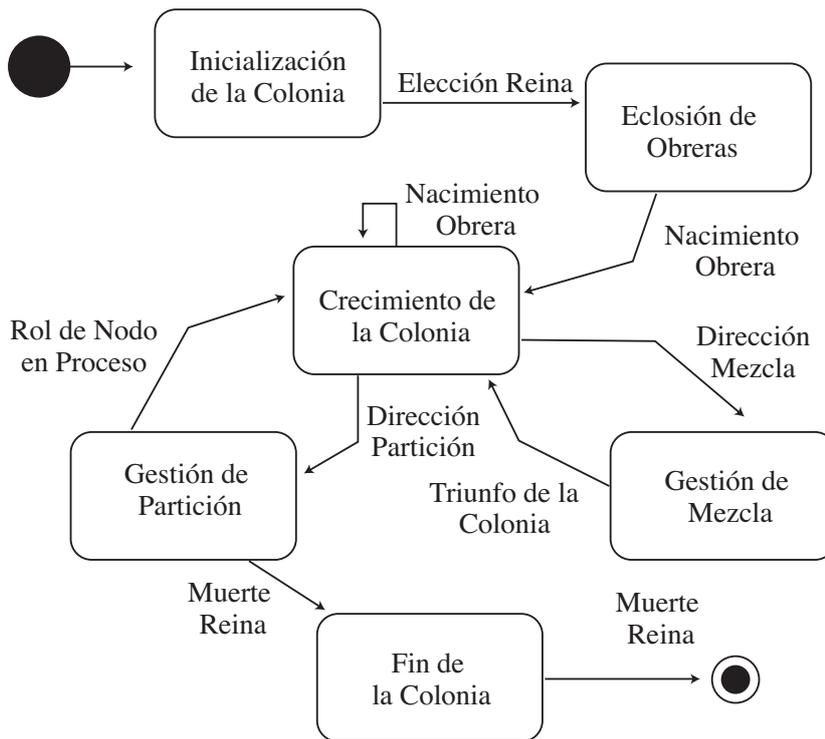


Figura 2. Ciclo de vida de una colonia.

#### IV. DIRECCIONAMIENTO

Como premisa de diseño, la propuesta debe ser lo suficientemente general y, por lo tanto, debe poder resolver el problema de la asignación de direcciones, independientemente del tipo de dirección empleado. Sin embargo, se utilizará IPv4 sin perder generalidad. Es importante señalar aquí que las nuevas facilidades implementadas en IPv6 favorecen la implementación del modelo propuesto. En el proceso de obtención de una dirección, un nodo evoluciona a través de dos procesos: a) El proceso de generación de una dirección temporal y b) El proceso de asignación de una dirección permanente. Este enfoque es utilizado por los autores.<sup>5,6</sup> La dirección temporal es usada por cada nuevo nodo que desee integrarse a la red y es utilizada para permitir la comunicación con los vecinos directos. En el proceso de adquisición de una nueva dirección, un vecino directo (un nodo ya configurado en la red) jugará un papel protagónico puesto que se convierte en el intermediario entre la hormiga reina (responsable por la asignación de nuevas direcciones) y el nodo en proceso de adquirirla.

En la propuesta se asume un esquema centralizado para la administración del conjunto de direcciones permanentes. Un nodo, llamado la hormiga reina, asume la responsabilidad por la administración de la tabla de asignación de las direcciones. Sin embargo, los procesos de asignación de direcciones y de mantenimiento de esta tabla, tienen un carácter distribuido y cooperativo. En la naturaleza, la reina es la responsable exclusiva por la creación de las nuevas obreras para la colonia. Sin embargo, vale la pena mencionar que las obreras son

las responsables por la ejecución, de forma colectiva y distribuida, de las actividades restantes de la colonia. Por lo tanto, será necesario mantener una comunicación permanente entre la reina y las obreras. Después del nacimiento de las obreras, la reina necesitará conocer su estado y eventualmente repoblar la colonia.

En la propuesta, en el caso de la asignación de la dirección a un nodo (hormiga obrera), se tienen dos momentos y un enfoque de asignación de direcciones diferente para cada uno de ellos. En el primer instante, previo al nacimiento del nodo en la colonia, el nodo tiene una dirección temporal. Esta dirección es usada para contactar a los vecinos directos y para seleccionar al nodo que hará las veces de intermediario. Esta dirección es asignada al azar y, por lo tanto, se pueden generar direcciones duplicadas. Por consiguiente, se requiere de un proceso para la detección y gestión de las direcciones duplicadas. En el segundo instante, durante su vida como hormiga obrera, el nodo tiene una dirección permanente. Esta dirección es usada para comunicarse con otros nodos de la red móvil ad hoc. Esta dirección es asignada por la hormiga reina y utiliza un enfoque libre de conflictos. Por consiguiente, no requiere la invocación de un proceso de detección de direcciones duplicadas. Finalmente, la propuesta, según lo establecen los autores,<sup>7</sup> implementará un tiempo de alquiler de la dirección como el mecanismo a través del cual resultará posible lograr la reutilización de las direcciones. En él, la hormiga obrera, el nodo al que le ha sido asignada la dirección por un tiempo determinado, debe solicitar, a través del envío de

una hormiga exploradora (unidad de información), la readquisición de la dirección.

## V. PRESENTACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

A continuación se presentará, con algún nivel de detalle, una descripción de la lógica que gobierna el modelo propuesto.

### A. Rol de nodo en proceso

Cuando un nodo se activa en el escenario de simulación, adquiere el rol de nodo en proceso. La primera actividad que tiene que cumplir es generar, de forma aleatoria, una dirección. Esta dirección tiene un carácter temporal porque tan sólo será utilizada por el nodo para reconocer su entorno cercano (aquel que corresponde con su rango de cobertura) y

solicitar a alguno de sus vecinos que le asigne una dirección permanente que corresponda con el espacio de direcciones válido de la red. Dado que esta asignación es aleatoria, pueden generarse conflictos de direcciones. Por lo tanto, resulta necesario verificar la unicidad de la dirección temporal generada. Para hacerlo, el nodo envía un mensaje en el cual postula la unicidad de dirección. Si recibe alguno como respuesta, se debe a que otro nodo en proceso en su vecindad también ha generado la misma dirección. Es necesario entonces volver a reiniciar el proceso y generar una nueva dirección. Si no se recibe respuesta alguna, entonces se puede asumir la unicidad de la dirección. Detalle de este comportamiento se muestra en la Figura 3.

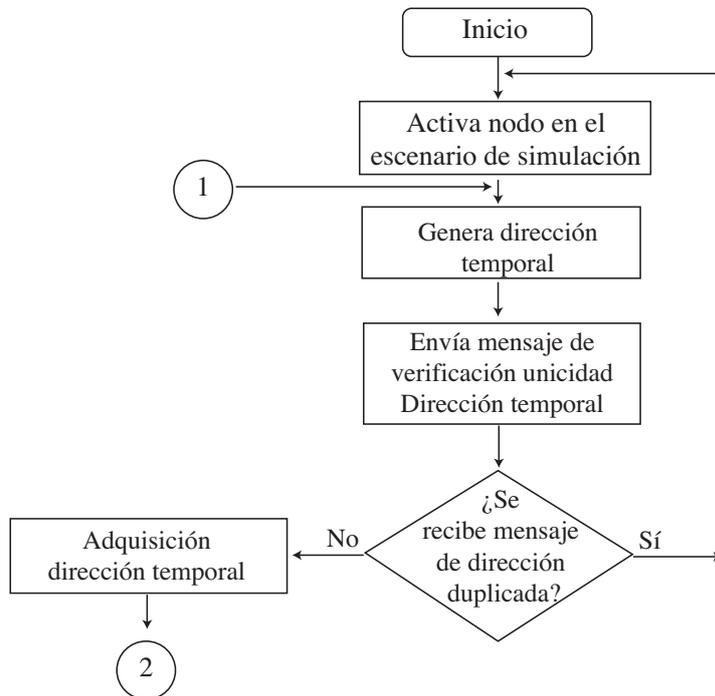


Figura 3. Nodo en proceso: generación de dirección temporal.

Una vez el nodo en proceso ha adquirido su dirección temporal única, procede a enviar un mensaje de solicitud de dirección al vecindario (el conjunto de nodos que se encuentran dentro de su rango de cobertura). El nodo en proceso puede recibir o no una respuesta a esta solicitud. Si recibe una respuesta, entonces existe en el vecindario al menos un nodo a través del cual puede adquirir su dirección permanente, a este proceso lo llamaremos gestión de asignación de dirección permanente. Si el nodo en proceso no recibe respuesta alguna, entonces debe activarse el proceso de elección de la hormiga reina, puesto que no existe una colonia a la cual pueda vincularse. Detalle de este comportamiento se muestra en la Figura 4.

Es importante señalar aquí que es necesario reconocer las condiciones particulares de operación de una red móvil ad hoc. En ella, el medio de transmisión es propenso a errores y a fallas, los nodos también pueden estar expuestos a fallas y pueden moverse fuera del rango de cobertura de su interlocutor. Para brindar algún grado de confiabilidad y de certeza, y para poder suponer razonablemente la ocurrencia de un evento, se propone la utilización de un envío temporizado y confirmado de información hacia un destino. Solo después de haber realizado un número  $n$  de intentos fallidos de envío de un mensaje a un destino, se puede asumir la ocurrencia del evento de no respuesta a este mensaje.

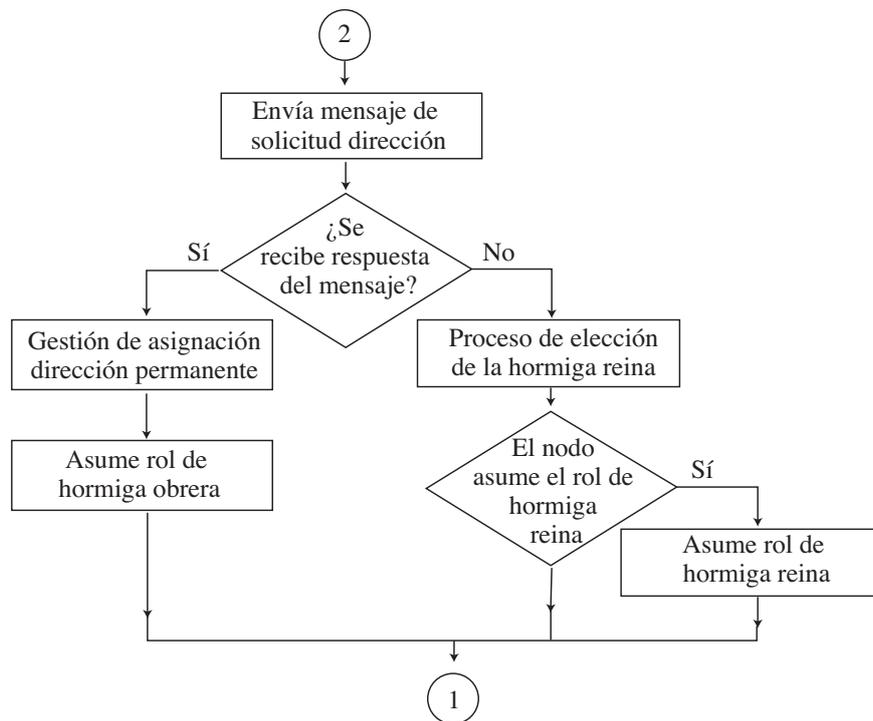


Figura 4. Nodo asume rol en la colonia

En cuanto al proceso de asignación de una dirección permanente. Si el nodo en proceso recibe una respuesta, la debe analizar. Puede ser una respuesta de la hormiga reina (porque ésta se encuentra entre sus vecinos directos). En este caso, el nodo se asigna para sí la dirección permanente y asume el rol de hormiga obrera en la colonia. La respuesta también ha podido ser generada por una hormiga obrera que notifica al nodo su disposición para convertirse en intermediaria ante la reina. En este caso, el nodo en proceso solicita a la obrera que sirva como intermediaria y adquiere, de forma indirecta, una dirección permanente que le permite asumir el rol de hormiga obrera. Es importante señalar aquí que todas las hormigas obreras deben conocer la dirección del nodo que ejerce el rol de hormiga reina.

Con respecto del proceso de elección de la hormiga reina. Si el nodo en proceso no recibe respuesta alguna, significa que no existe una colonia dentro de su rango de cobertura a la cual pueda vincularse. Entonces, el nodo en proceso se postula para adquirir el rol de hormiga reina (emerge esta conducta ante la necesidad de contar en el escenario con un nodo que asigne las direcciones) y envía un mensaje de postulación al vecindario. Si recibe alguna respuesta, su aspiración para convertirse en reina tiene una objeción porque otro nodo en proceso aspira también a desempeñar este rol. Es necesario entonces resolver esta contienda. El nodo en proceso con mayor dirección temporal resultará ganador. En consecuencia, un nodo en proceso podría declinar su aspiración porque

resulta perdedor en la contienda. En este caso, solicitaría directamente la dirección ante la hormiga reina que resultó ganadora. Por otra parte, el nodo en proceso podría también resultar triunfador en la contienda. En este caso, se convierte en la nueva y única hormiga reina del escenario. El modelo propuesto garantiza la existencia de una única hormiga reina en la colonia y también reconoce la posibilidad de que existan diferentes colonias aisladas (redes) en el escenario de simulación. Precisamente, el encuentro de dos o más de estas colonias, como consecuencia del movimiento de sus nodos, genera el evento de mezcla de redes. Detalle de este comportamiento se muestra en la Figura 5.

Una vez el nodo ha adquirido su rol de hormiga dentro de la colonia, se limitará a enviar mensajes a su entorno directo (aspecto que será denominado "*Envío de Solicitud*") y a recibir mensajes de su entorno directo (aspecto que será denominado "*Escucha de Solicitudes*"). Con respecto del envío de solicitudes, la hormiga enviará la solicitud y quedará a la espera de la respuesta. La hormiga puede o no recibir una respuesta. Dependiendo de ello, dará el tratamiento adecuado al evento que ha ocurrido y retornará al estado de envío de solicitudes. Con respecto de la escucha de solicitudes. La hormiga debe escuchar las solicitudes que realizan los nodos de su entorno directo. Por lo tanto, debe ponerse a la escucha. Cuando recibe una solicitud la debe procesar, y luego debe enviar una respuesta al nodo que la generó. Detalle de este comportamiento se muestra en la Figura 6.

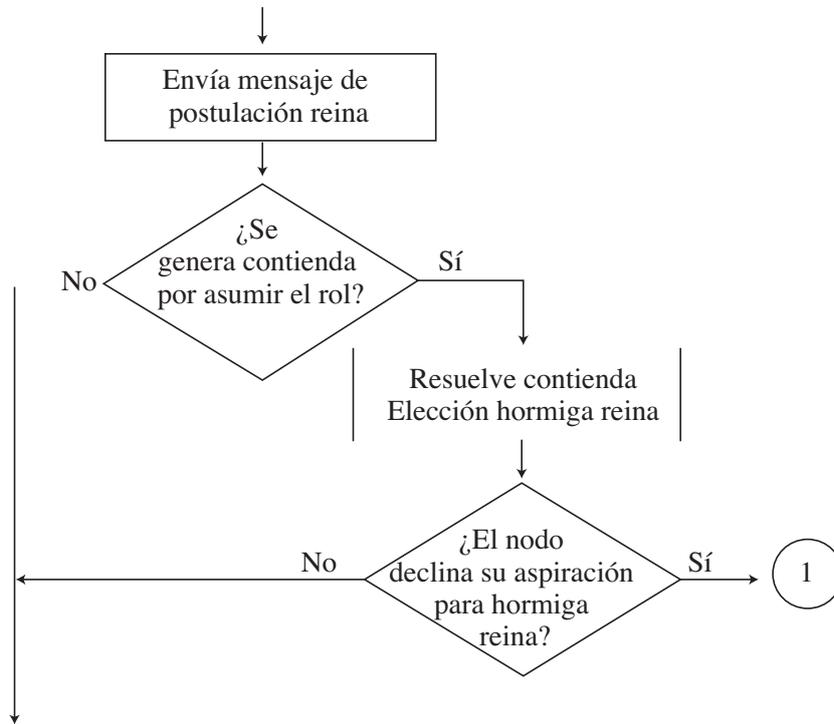


Figura 5. Elección de la hormiga reina

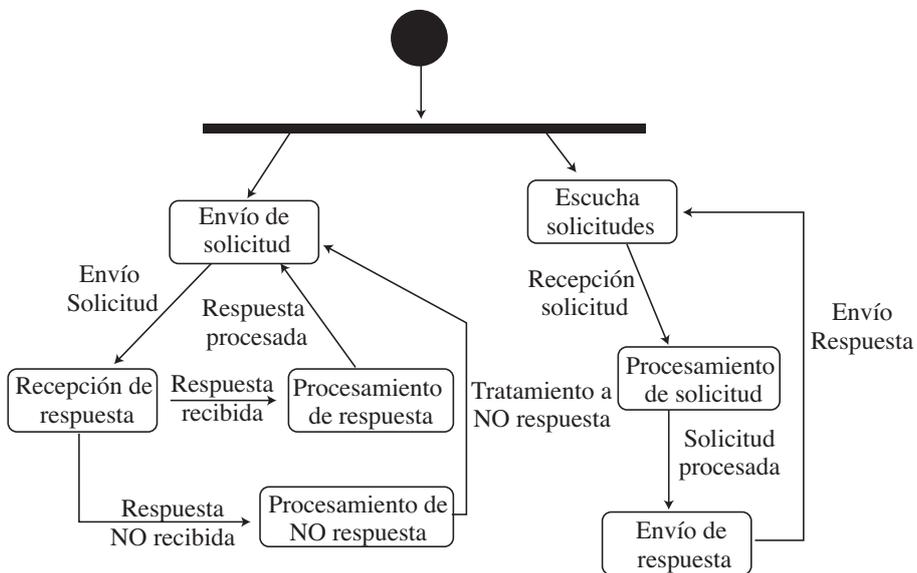


Figura 6. Procesos asociados con la operación de un nodo.

### C. Rol de hormiga reina

En este apartado se presentan todas las acciones ejecutadas por la hormiga reina una vez ha asumido este rol. Entre las solicitudes que debe “escuchar” se encuentran: a) la solicitud que realiza un nodo en proceso para adquirir una dirección permanente; b) la solicitud de asignación de una dirección permanente que hace un nodo actuando en calidad de intermediario entre la hormiga reina y un nodo en proceso de adquirir la dirección; c) las consultas efectuadas por los nodos vecinos que tienen una dirección permanente; d) la solicitud de una hormiga obrera para verificar el estado de la hormiga reina.

Entre las solicitudes que debe responder figuran: a) la respuesta a un nodo en proceso de adquirir la dirección; b) la respuesta a la solicitud de un nodo que está actuando como intermediario y c) la respuesta a la solicitud de dirección de un nodo cuando el espacio de direcciones se encuentra agotado. Entre los mensajes que debe generar se encuentran: a) la consulta que realiza a los nodos vecinos para verificar su existencia; b) la generación del mensaje de muerte de la reina y c) la respuesta a una hormiga obrera que ha solicitado conocer el estado de la hormiga reina. Igualmente, la hormiga reina debe también estar en capacidad de realizar la gestión de los eventos especiales: la mezcla y la partición de redes y es además responsable por la administración y el mantenimiento de la tabla de direcciones.

### D. Rol de hormiga obrera

En este apartado se presentan todas las acciones ejecutadas por la hormi-

ga obrera una vez ha asumido este rol. Entre las solicitudes que debe “escuchar” se encuentran: a) la consulta que realiza un nodo en proceso para adquirir la dirección permanente; b) la selección que hace el nodo en proceso sobre una hormiga obrera para que ésta se convierta efectivamente en su intermediario; c) las consultas efectuadas por los nodos vecinos que tienen una dirección permanente y d) el mensaje de muerte de la reina de la colonia que se difunde en broadcast. Entre las solicitudes que debe responder o generar se encuentran: a) la respuesta a la solicitud para que el nodo se vuelva nodo intermediario; b) las consultas efectuadas por los nodos vecinos que tienen una dirección permanente y c) la consulta que debe efectuar para verificar la presencia de la hormiga reina. Igualmente, la hormiga obrera debe estar en capacidad de realizar la gestión de los eventos especiales: la mezcla y la partición de la red.

## VI. GESTIÓN DE EVENTOS

Una de las fortalezas de esta propuesta frente a otras que han sido formuladas es el tratamiento integral al problema de la administración de las direcciones en redes móviles ad hoc. La propuesta considera, detecta y resuelve todos los posibles eventos que pueden ocurrir, y que es necesario gestionar, como consecuencia de la naturaleza dinámica y cambiante de la topología de la red.

### A. Consulta de vecinos

La consulta de vecinos es un evento clave dentro de la propuesta. A través de él: a) Un nodo en proceso de adquisición de una dirección encuentra otro ya configurado dentro de la red para

que haga las veces de intermediario y le permita obtener una dirección permanente y b) Un nodo ya configurado reconoce y ratifica (si el vecindario no ha cambiado) o rectifica (si existen nuevos vecinos a su alrededor) el conocimiento que tiene de los nodos que se encuentran a su alrededor.

### **B. Mezcla de redes**

En la propuesta, cada red se cualifica a través de un identificador de red (NETID). Este identificador es propagado en el proceso de reconocimiento de vecinos. Cuando un nodo detecta la presencia de un identificador de red diferente al propio, debe hacer frente a un evento de mezcla de redes. Por consiguiente, el método para la detección de este evento está basado en el identificador de red y debe ser ejecutado de forma distribuida. Igualmente, se propone un mecanismo “*mezcla gradual*” para resolver la mezcla de redes. Este mecanismo se implementa como un proceso distribuido que no depende de un sitio central y que se ejecuta gradualmente en los lugares en los cuales se va detectando la presencia de dos o más identificadores de red diferentes. Como consecuencia de la alta movilidad que pueden experimentar los nodos en este tipo de ambientes, resulta necesario desencadenar el evento de mezcla de redes solo después de haber garantizado, con cierto nivel de certeza, la ocurrencia del evento. Para hacerlo, es necesario detectar sucesivamente durante dos rondas de consulta de vecinos la presencia de un identificador de red diferente al de la colonia. Después de transcurrido este intervalo se puede considerar como estable y permanente el enlace entre las dos colonias e

ineludiblemente el paso siguiente debe estar encaminado a resolver el evento de mezcla de redes.

### **C. Partición de la red**

La partición de una red es detectada por una hormiga obrera. Periódicamente una hormiga obrera envía hormigas exploradoras (unidades de información) que buscan ratificar la presencia de la hormiga reina. Cuando se ejecuta el procedimiento anterior, y la hormiga reina no responde, las causas de esta falta de respuesta pueden ser: a) un colapso de la hormiga reina y b) la partición de la red. Independientemente de la causa, el evento que se asume es la partición de la red. La gestión de una partición de red implementada en la presente propuesta tiene un carácter distribuido y es ejecutado con una visión parcial de la red y con información disponible incompleta e imprecisa. Para evitar las inestabilidades que pudieran generarse como consecuencia de la alta movilidad de los nodos en este tipo de redes, es necesario declarar la ocurrencia del evento solo después de haber detectado la partición en sucesivas consultas del entorno y no haber detectado la presencia de nodos vecinos que pertenecen a la misma colonia.

### **D. Administración de direcciones**

La hormiga reina se encarga de la administración y del mantenimiento de la tabla de direcciones. Para cada una de las hormigas obreras que pertenecen a la colonia, la hormiga reina mantiene una entrada en la tabla. Dicha entrada almacena la cantidad de feromona que representa el vínculo existente entre la hormiga obrera

y la colonia. Para que una hormiga obrera efectivamente haga parte de una colonia, la cantidad de feromona almacenada debe ser mayor o igual que cero. Periódicamente, la obrera notifica su presencia a la reina. Cada vez que esto ocurre, se produce un depósito de feromona y la entrada en la tabla de direcciones se incrementa (el incremento utilizado en la propuesta es 1). Igualmente, una vez ha transcurrido un tiempo, la hormiga reina procede a realizar la evaporación de la feromona en cada una de las entradas activas de la tabla (el decremento utilizado en la propuesta es 1). Para aquellas entradas de la tabla cuyo valor de feromona se haga inferior a cero, la hormiga reina procede a declarar la “muerte” de la hormiga obrera. A partir de este instante, declara la dirección como disponible. El razonamiento que gobierna esta acción es el siguiente: si durante un tiempo significativo la hormiga reina encuentra que alguna(s) obrera(s) no han notificado su presencia es porque dichas obreras (nodos móviles) han dejado de pertenecer a la colonia (red móvil ad hoc). En este caso, la hormiga reina puede asumir que la dirección se encuentra disponible para ser nuevamente asignada a una nueva hormiga obrera (nodo en proceso). De esta forma, a través del depósito y evaporación de la feromona, la hormiga reina puede recuperar y reasignar direcciones.

## VII. RESULTADOS OBTENIDOS

La verificación experimental del modelo, la presentación y el análisis de los resultados obtenidos suponen la evaluación de tres aspectos fundamentales: el primero, orientado a verificar la funcionalidad del modelo,

el segundo, dirigido a comprobar la eficiencia de la solución, y el tercero, orientado a valorar el impacto que sobre el desempeño de las aplicaciones del usuario tiene el modelo propuesto.

Con respecto de la valoración funcional del modelo, los eventos que se verificaron fueron los siguientes: a) la inicialización de la colonia; b) la capacidad de un nodo (hormiga reina u hormiga obrera) para verificar la existencia de sus vecinos; c) la capacidad de una hormiga obrera para consultar y para verificar la presencia de la hormiga reina en la colonia; d) la capacidad de una hormiga de la colonia para detectar y para gestionar un evento de mezcla de redes; e) la capacidad de una hormiga de la colonia para detectar y para gestionar un evento de partición de red; f) la capacidad de las hormigas obreras para detectar y para gestionar el evento de muerte de la hormiga reina y g) la capacidad del modelo para ejecutar, de forma cooperativa y distribuida, la asignación de una dirección permanente a un nodo que aspira a convertirse en hormiga obrera de la colonia. A todos estos aspectos colectivamente se los denominó transacciones básicas del modelo.

Con respecto de la valoración de la eficiencia de la solución. Es necesario instituir un conjunto de métricas de desempeño que permitan establecer su adecuada y objetiva valoración. Las métricas seleccionadas para tal efecto fueron: a) la latencia para la autoconfiguración de direcciones. Esta medida representa el tiempo promedio que le toma a un nodo obtener una dirección IP única dentro de la red y b) la escalabilidad de la solu-

ción propuesta. Esta medida valora la capacidad del modelo propuesto para comportarse de forma relativamente estable en la medida en que se incrementa el número de nodos que hacen parte de la red.

Igualmente, se hace necesario evaluar el impacto que sobre una aplicación del usuario tiene el modelo propuesto. Para hacerlo, se utilizará una aplicación cliente/servidor típica que implementa un servicio de eco y un conjunto de nodos que ejecutan el modelo propuesto. En las evaluaciones se utilizaron: 1) los protocolos TCP y UDP en el nivel de transporte; 2) diferentes tamaños para la unidad de información que intercambian el cliente y el servidor. Los tamaños que fueron utilizados para verificar este aspecto fueron: 38 Bytes (que corresponde exactamente con el tamaño de los mensajes que se intercambian los nodos que ejecutan el modelo en el escenario de simulación), 64 Bytes, 128 Bytes, 256 Bytes, 512 Bytes y 1024 Bytes y 3) diferentes escenarios, con distinta cantidad de nodos en él. Estos escenarios permiten adicionalmente valorar la escalabilidad del modelo propuesto. El número de nodos dispuestos en el escenario de simulación se hizo variar entre 2 y 100 nodos.

El modelo propuesto tiene dos diferentes fases de comportamiento que corresponden con estados del ciclo de vida de la colonia: la fase de inicialización y la fase de operación en estado estable. Por tal motivo, se han propuesto tres diferentes escenarios de verificación: a) evaluación del modelo propuesto en la fase de inicialización; b) evaluación del modelo propuesto en un tiempo representativo de un

ciclo de operación típico en estado estable y c) evaluación del modelo en diferentes instantes puntuales durante el tiempo de simulación. El conjunto general de verificaciones que se realizaron considera: a) tres variables: el tamaño de la unidad de información, el número de nodos que participan en el escenario de simulación y el tipo de protocolo bajo el cual se realiza el intercambio y b) tres perspectivas diferentes del tiempo: la fase de inicialización, la fase de operación en estado estable y el muestreo puntual en diferentes instantes de la simulación.

El proceso de activación de un nodo en el escenario de simulación desencadena la ocurrencia de tres eventos principales que se encuentran relacionados y que determinan una de las métricas de desempeño propuestas para valorar la eficiencia del modelo propuesto: la latencia para la auto-configuración de una dirección. Dichos eventos son: a) el tiempo necesario para que el nodo adquiera una dirección temporal; b) el tiempo requerido para la elección de la hormiga reina y c) el intervalo promedio requerido por un nodo en proceso para la adquisición de una dirección permanente, una vez la hormiga reina ha sido elegida en el escenario de simulación. Los resultados del comportamiento del modelo al inicializar masiva y simultáneamente un número  $n$  de nodos (el escenario de peor caso para el modelo) se muestran en la Figura 7. Respecto del primer evento (Dirección Temporal): en la Figura se puede observar que el intervalo requerido para la adquisición de una dirección temporal se incrementa lentamente en la medida que lo hace el número de nodos. Al efectuar una

regresión lineal se puede establecer que la presencia de cada nodo adicional en el proceso de generación y de verificación de una dirección temporal única, impone una sobrecarga de 0,61 milisegundos. Respecto del segundo evento, el intervalo requerido para la elección de la hormiga reina (Elección Hormiga Reina): la gráfica refleja el periodo de contienda entre los nodos que, habiendo adquirido una dirección temporal, pugnan por convertirse en la hormiga reina de la colonia. En la Figura se puede observar una relación lineal con una pendiente positiva mayor que la del evento anterior que se incrementa un poco más cuando el número de nodos participante supera los 35/40.

Respecto del tercer evento, el intervalo requerido para la adquisición de una dirección permanente (Dirección Permanente): la figura representa la carga de procesamiento a la que se somete a la hormiga reina durante el proceso de inicialización masiva de los nodos y la congestión de tráfico generada a su alrededor. Su compor-

tamiento es muy similar al descrito en el evento anterior. Sin embargo, la pendiente de la curva se hace mayor a partir del instante en el cual el número de nodos se hace mayor a 35/40. Es importante señalar aquí que a medida que se incrementa el número de nodos, lo hacen los retardos asociados con la adquisición de la dirección temporal, la elección de la reina y la dirección permanente. Esto se debe fundamentalmente a un incremento en la carga del canal y a un incremento en la carga de procesamiento a que es sometido el nodo que ejerce el rol de hormiga reina. Sin embargo, vale la pena también señalar que los resultados presentados ocurren en el escenario límite, aquel en el cual los  $n$  nodos que constituyen el escenario de simulación se encuentran todos dentro del rango de cobertura mutuo y se inicializan de forma simultánea. Sin embargo, resulta evidente que cuando el número de nodos se aproxima a los cuarenta, el canal se satura y la pendiente de la curva necesariamente se incrementa.

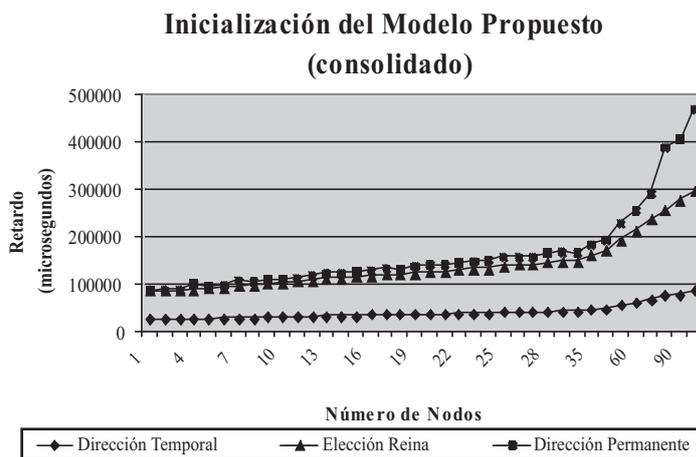


Figura 7. Eventos en la fase de inicialización

La sobrecarga (“overhead”) que impone la solución propuesta es otro de los aspectos que fueron evaluados para verificar su eficiencia. Como se mencionó anteriormente, para hacerlo se propuso un escenario en el cual dos nodos intercambian unidades de información utilizando como intermediarios un conjunto de nodos en los que se ejecuta el modelo de administración de direcciones propuesto. Se utilizó un servicio de eco, una aplicación con arquitectura cliente/servidor. En las pruebas se usaron los protocolos UDP y TCP para efectuar este intercambio. Igualmente, se emplearon diferentes tamaños para las unidades de información que intercambian los nodos y se hizo variar sucesivamente el número de nodos que ejecutaban el modelo de administración de direcciones. Estas verificaciones se hicieron una vez la red había superado la fase de inicialización y la colonia había sido establecida y tenía un comportamiento estable. Los resultados, para el protocolo TCP, se muestran en la Fi-

gura 8. En ella, se puede observar que el retardo permanece relativamente estable para un tamaño de trama fijo y se incrementa ligeramente en la medida que el tamaño de la unidad de información lo hace. Se puede entonces concluir que la sobrecarga impuesta por la solución propuesta sobre la red es baja y permanece estable para los diferentes escenarios. Este comportamiento fue una de las premisas de diseño impuestas al modelo propuesto y aquí se la ratifica experimentalmente. Los resultados obtenidos para el protocolo UDP fueron similares.

Para evidenciar la diferencia en el volumen de tráfico generado en las fases de inicialización y de estado estable del modelo propuesto se utilizó un escenario de prueba constituido por 50 nodos y se verificó el retardo que tenía un intercambio cliente/servidor en los instantes de inicialización y de estado estable de la colonia para diferentes tamaños de trama. Los resultados obtenidos para la fase de

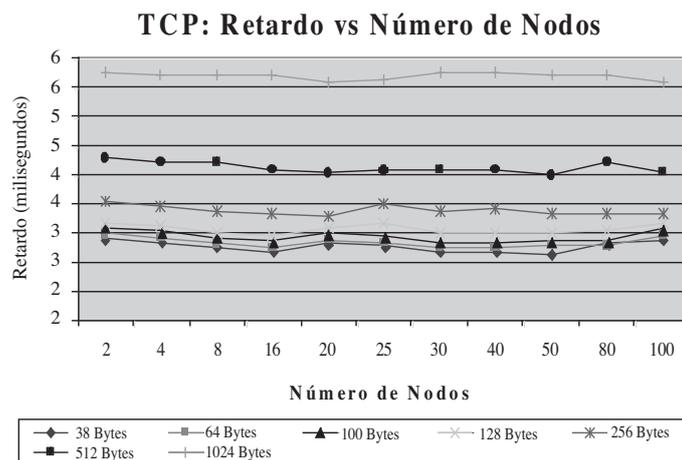


Figura 8. Retardo vs. Número de Nodos- TCP.

inicialización, para el protocolo TCP, se muestran en la Figura 9 (se obtuvo un comportamiento similar para el protocolo UDP).

En la Figura se observa un pico muy alto en el retardo en los primeros instantes de operación del modelo y después un comportamiento relativamente constante durante la fase de operación de estado estable. El efecto indeseable de alta sobrecarga en la fase de inicialización queda confinado en un tiempo relativamente corto. Vale la pena señalar también

que estas verificaciones han tenido lugar en el escenario de peor caso (inicialización simultánea y masiva de todos los nodos del escenario). Los resultados para la fase de operación estable (un ciclo típico de operación del modelo propuesto) se muestran en la Figura 10.

En ella, se puede evidenciar que no existe un impacto sustancial sobre el retardo que experimenta una aplicación cliente/servidor típica durante la fase de operación de estado estable del modelo salvo por un pico temporal,

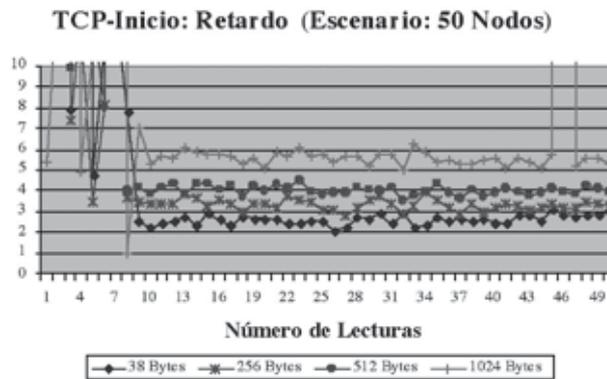


Figura 9. Retardo en Fase Inicialización-TCP.

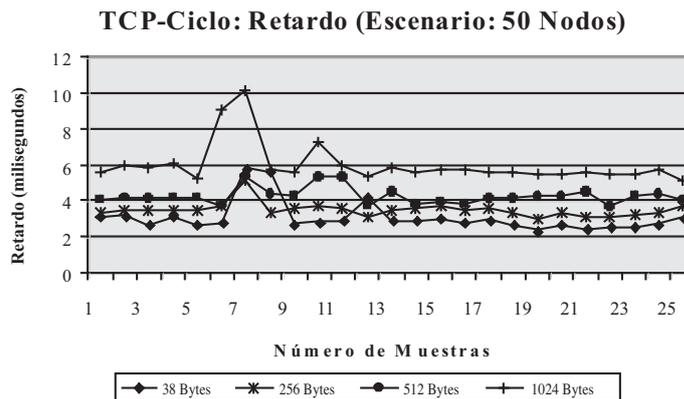


Figura 10. Retardo en Operación Estable- TCP.

un poco mayor, cuando la unidad de información intercambiada se incrementa notablemente (1024 Bytes). Existe, eso sí, un ligero incremento en el retardo en la medida que el tamaño de la unidad de información intercambiada se incrementa. Se realizaron pruebas adicionales en otros escenarios (se incrementó el número de nodos a 80 y 100). En ellos, se evidenció un comportamiento similar al descrito.

Igualmente, se verificó la capacidad del modelo para regresar a un estado estable (aquel en el cual existe una sola hormiga reina en cada una de las colonias desplegadas en el escenario de simulación) después de haber provocado la muerte de la hormiga reina o la inicialización de algún nodo que genera eventos masivos de mezcla de redes cuando éste se encuentra dentro del rango de cobertura mutuo de varias colonias involucradas en el evento. Este aspecto permite valorar una de las características más preciadas de los sistemas auto-organizados, su capacidad para converger hacia estructuras benéficas deseadas, mientras intenta evitar otras indeseables. El modelo propuesto fue ejecutado en múltiples escenarios, con diferente población de nodos dispuestos en él. Indistintamente, la secuencia de

eventos que tuvo lugar en todos los casos fue: a) inicialización simultánea del conjunto de nodos; b) elección de la hormiga reina de la colonia; c) muerte de la hormiga reina (a través de la desactivación del escenario de simulación del nodo que cumple dicho rol); d) elección de una nueva reina en el escenario; e) operación en estado estable de la colonia; f) muerte de la hormiga reina; g) elección de una nueva reina en el escenario y h) operación en estado estable de la colonia. En la Tabla 1 se muestran estos escenarios así como los tiempos de muerte de las hormigas reinas y el tiempo de convergencia del modelo en cada caso. Los tiempos se expresan en segundos. Como puede observarse, el tiempo de convergencia del modelo ante el evento de muerte de la hormiga reina permanece prácticamente constante en la medida que el número de nodos dispuestos en el escenario de simulación se incrementa. Sólo al final, cuando el incremento en el número de nodos es significativo, de cincuenta a cien, el tiempo de convergencia se incrementa.

Se realizaron verificaciones adicionales en otros escenarios de inicialización, en múltiples escenarios de movimiento para evaluar la capacidad del modelo para detectar, gestionar y

**Tabla 1.** Evaluación de la convergencia del modelo.

Número de nodos	Muerte de la primera hormiga reina	Tiempo de convergencia del modelo	Muerte de la segunda hormiga reina	Tiempo de convergencia del modelo
3	10	t<2	-	-
5	5	t<1	25	t<1
10	5	t<2	25	t<2
15	5	t<2	25	t<2
25	5	t<2	20	t<2
30	5	t<2	20	t<2
40	5	t<2	20	t<2
50	5	t<2	25	t<2
100	5	t<2	30	t<7



**Tabla 2.** Sensibilidad temporal del modelo.

Simulación	Velocidad (m/seg)	Velocidad (Km/h)	Sensible
1	10.0000000	36.0000000	SI
2	55.0000000	198.0000000	SI
3	56.4062500	203.0625000	SI
4	57.1093750	205.5937500	SI
5	57.4609375	206.8593750	SI
6	57.5488281	207.1757813	SI
7	57.6367188	207.4921875	NO
8	57.8125000	208.1250000	NO
9	60.6250000	218.2500000	NO
10	66.2500000	238.5000000	NO
11	77.5000000	279.0000000	NO
12	100.0000000	360.0000000	NO

tarlo adecuadamente. En la Tabla se puede observar que, cuando el nodo móvil se desplaza a una velocidad de 57,63 m/s (207,49 km/h), el modelo es incapaz de detectar los eventos que se generan como consecuencia de su movimiento en el escenario de simulación.

#### **VIII. OTRAS APLICACIONES**

El modelo propuesto puede tener otros múltiples campos de aplicación. Su capacidad para generar de forma espontánea y única un nodo en el cual pueda residir una funcionalidad requerida para la red le hacen viable para ser explotado en otras aplicaciones. Por ejemplo, en el área de seguridad para la asignación de claves de sesión, certificados digitales, etc. El carácter distribuido de su gestión, le permite realizar una re-configuración rápida de su conducta utilizando exclusivamente la información local. Estas características lo facultan para operar en ambientes como los de las redes ad hoc, en los cuales las condiciones tienen un carácter dinámico y cambiante.

#### **IX. CONCLUSIONES**

Con base en la evidencia experimental obtenida, se pudo comprobar

que el modelo propuesto fue capaz de identificar, gestionar y resolver, adecuada y eficientemente, todos los eventos relacionados con la administración del espacio de direcciones en una red móvil ad hoc, no todas las propuestas existentes lo hacen. A partir de los principios de auto-organización fue posible hacer emerger, esto es generar, la conducta global del sistema. Los eventos que alteraron parcialmente la estabilidad de la colonia fueron detectados y resueltos de forma localizada sin afectar a los otros nodos de la colonia. En cada escenario de verificación propuesto, el modelo fue capaz de elegir, en un tiempo razonable, una única hormiga reina para la colonia y de asignar, en un tiempo aceptable, una dirección permanente para cada uno de los nodos de la red móvil ad hoc. El modelo propuesto fue capaz de llevar nuevamente el escenario de simulación a un estado estable una vez se produjo el evento de mayor impacto sobre la operación de los nodos: la muerte de la hormiga reina. El tiempo de convergencia del modelo ante este evento permaneció prácticamente inmodificable en la medida que el número de nodos dispuestos en

el escenario de simulación se incrementó. Experimentalmente también se pudo evidenciar que la sobrecarga impuesta por el modelo propuesto sobre la red es baja y permanece prácticamente estable para escenarios en los cuales se incrementó el número de nodos y el tamaño de la unidad de información.

## BIBLIOGRAFÍA

1. R. Siva Ram Murthy y B.S. Manoj, B.S. *Ad Hoc Wireless Networks : Architectures and Protocols*. Prentice Hall. Mayo 2004. Capítulo 5.
2. Di Caro, Gianni. "*The Ant Colony Optimization (ACO) Metaheuristic: A Swarm Intelligence Framework for Complex Optimization Tasks*". IDISIA, USI/SUPSI. Lugano. Disponible en: <http://www.cs.unibo.it/~fioretti/AC/AC2005/docs/>
3. F. Dressler. "Self-Organization in Ad Hoc Networks: Overview and Classification". *Computer Communications, IEEE*. Volume 31, Issue 13, Agosto 2008. pp 3018-3029.
4. C. Prehofer, C. Bettstetter. "Self-Organization in Communication Networks: Principles and Design Paradigms". *Communications Magazine, IEEE*. Volume 43, Issue 7, Julio 2005. pp. 78-85.
5. Ch. Perkins, R. Waikaka; J. Malinen, E. Belding-Royer, Y. Suan, Y. "IP Address Autoconfiguration for Ad Hoc Networks". INTERNET DRAFT. Noviembre de 2001. Disponible en: <http://www.cs.ucsb.edu/~ebelding/txt/autoconf.txt>
6. RFC 2462. Thomson S.; Narten, T. "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration". Diciembre 1998. Disponible en: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2462.txt>
7. I. Jeong, J.M. Hyunjun, "Study on Address Allocation in Ad-Hoc Networks". *Computer and Information Science*, 2005. Forth Annual ACIS International Conference on Volume, Issue, 2005, pp 604-609.
8. "NCTUns 5.0 Network Simulator and Emulator". Disponible en: <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>

## CURRÍCULOS

**Álvaro Pachón.** Ingeniero de Sistemas de la Universidad Icesi, Especialista en Redes y Comunicaciones de la Universidad del Valle, D.E.A. y candidato a doctor en tecnologías de información de la Universidad de Vigo, España. Actualmente es jefe del departamento de Tecnologías de Información y Comunicaciones de la Universidad Icesi.

**Manuel Fernández Veiga.** Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad de Vigo, España. Doctor Ingeniero de Telecomunicación de la Universidad de Vigo, España. Actualmente es profesor titular del departamento de ingeniería telemática de la Universidad de Vigo. Es co-autor de dos libros sobre teoría de la información y de varios artículos en revistas especializadas. ☀