

# Red de Comunicaciones para Enjambre de Robots Reflexivo: Arquitectura, Protocolos y Aplicaciones

Fabian Rubilar Jamén, 2721012-0

**Resumen**— El problema de intercomunicar un enjambre de robots no es menor. En ese contexto, surge la necesidad del diseño de una red de comunicaciones que entregue confiabilidad, robustez y control sobre cada uno de los robots integrantes del enjambre, ya sea por parte de un usuario o un ente artificial. En esta publicación se analizan los desafíos en cuanto a **Arquitectura, Protocolo y Aplicaciones** que existen al diseñar una red de comunicaciones aplicada en robótica de enjambre, para posteriormente analizar cómo implementar una red de estas características en un enjambre reflexivo de robots. Finalmente se entrega una propuesta de red y se comprueba si cumple con los requisitos planteados de **Arquitectura, Protocolo y Aplicación**.

## I. INTRODUCCIÓN

EL estudio de la robótica de enjambre ha presentado un auge en las últimas dos décadas. Motivadas por aplicaciones en donde la colaboración entre robots se torna importante, varias publicaciones se han realizado tratando sobre tópicos relacionados con el tema. Una de estas publicaciones ha sido [1]. Esta publicación se centra en el diseño de una red de comunicaciones para robótica de enjambre, motivados por la implementación de un enjambre de robots para tareas de vigilancia de fronteras. Dentro de su estudio, los autores identifican tres grandes áreas a diseñar:

**Diseño de la arquitectura.** Implica el diseño algoritmos que permitan la comunicación en enjambre, el diseño de software de monitoreo, así como también el diseño de la red mesh que debe asegurar calidad de servicio (QoS) debido a la naturaleza de la aplicación en la que se desea utilizar el enjambre de robots (vigilancia).

**Diseño del protocolo.** El diseño del protocolo de comunicación está fuertemente relacionado con la arquitectura de la red mesh, por lo que se tratan en conjunto. Por otro lado, también es tarea del protocolo el permitir una coordinación distribuida del enjambre de robots, donde sea el mismo protocolo el que aporte información y permita que cada robot pueda tomar decisiones por su cuenta en cuanto a su navegación para así mantener la cohesión del enjambre y

permitir así el trabajo colaborativo.

**Diseño de las aplicaciones.** Consiste en diseñar el software necesario para asegurar control, coordinación, y disponibilidad de información en tiempo real con el fin de tenerla siempre disponible para el usuario final o para la inteligencia artificial que se hará cargo del enjambre.

Como se ha revisado, cada una de estas áreas plantea desafíos a resolver, para los cuales los autores proponen una arquitectura basada en WMN (wireless mesh networks). Sin embargo, ellos tampoco resuelven todos los desafíos propuestos, sobretodo los relacionados con el aseguramiento de la QoS para el streaming de video en tiempo real por parte de cada robot.

Por otro lado, un enjambre reflexivo es un tipo especial de enjambre de robots en el cual el coordinador de la red es una inteligencia artificial que es capaz de evaluar su propio desempeño. Se basa en el análisis descrito en [2]. En este análisis se postula que la inteligencia humana se puede dividir en capas, desde la más instintiva hasta la autorreflexiva en donde incluso se incluyen juicios éticos y morales. También se intenta dar explicación a los procesos mentales que llevamos a cabo cotidianamente a través de la utilización del concepto de *recursos*, los cuales activamos o desactivamos de manera inconsciente en cada proceso mental. Este enfoque es el que permite que luego se puedan reproducir en software cada uno de estos recursos para que así interactúen y se puedan desarrollar sistemas inteligentes deliberativos.

Así, en esta publicación se pretende tomar los desafíos que se plantean en [1] en cuanto al diseño de la red de comunicaciones para enjambres de robots y darles una solución, al menos particular, a través de la implementación de una red de comunicaciones para un enjambre reflexivo de robots. Por una parte, se usan las ideas expuestas en [2] para cubrir los desafíos en cuanto a diseño de aplicación. Los desafíos en cuanto a arquitectura y protocolo por otra parte, se pretenden superar utilizando la ya existente tecnología XBee [3], que a través del protocolo ZigBee cubren parte importante de estos desafíos. Aquellos que no son cubiertos, se darán estrategias adicionales para así cubrirlos.

Las secciones se desarrollarán como sigue:

Manuscrito enviado el 7 de diciembre de 2012, dentro del contexto de la asignatura Seminario de Redes de computadores (IPD438).

Fabian Rubilar Jamén, estudiante de Ingeniería Civil Electrónica mención Computadores, rol 2721012-0; e-mail: fabian.rubilar@alumnos.usm.cl

- La sección II tratará sobre el trabajo previo realizado en [1], identificando y describiendo cada uno de los desafíos planteados por los autores.
  - La sección III tratará sobre la descripción de un enjambre reflexivo, así como la manera en la que las ideas expuestas en [2] pueden satisfacer las necesidades de Aplicación expuestas en [1].
  - La sección IV tratará sobre la descripción de la tecnología XBee S2, y cómo se pretende utilizar, en conjunto con otras técnicas, para cubrir los desafíos en cuanto a Protocolo y Arquitectura.
  - Finalmente, la sección V tratará sobre los desafíos pendientes y el trabajo por realizar, por parte del autor, para llevar a cabo lo expuesto en las secciones anteriores.
- Los coordinadores suelen ser quienes inicializan la infraestructura, o quienes se encargan de recibir la información proveniente de cada uno de los robots. No necesitan estar presentes físicamente cerca del lugar de operación del enjambre, por lo que también se considera la inclusión de gateways que permitan dirigir la información a través de internet.
  - Los routers WMS se colocan en las cimas de los edificios, murallas o torres. Cada router consiste en múltiples antenas y pueden operar a través de múltiples canales para mejorar la capacidad y rango de la red.
  - Existen uno o más robots con uno o más adaptadores wireless que pueden comunicarse con un router mesh o con otros robots, con cámaras digitales o gps. Cada uno mantiene la conectividad por sí mismo y periódicamente actualizan la lista con los recursos que tienen a su disposición (imágenes, video, posición) para mantenerlas disponibles para cualquier usuario (o administrador) dentro de la red.
  - Finalmente los usuarios pueden entrar y salir de la red, y pueden estar presentes dentro de ella así como también poder acceder a través de los dispositivos coordinadores que acumulan la información de cada robot.

## II. TRABAJO PREVIO

### A. Robot Swarm Communication Networks.

En [1] se introduce el concepto de Robot Swarm Communication Network (RSCN). Es una arquitectura donde:

- Grupos de robots se organizan en uno o múltiples equipos o enjambres.
- Se integra además el monitoreo de usuarios móviles que usen laptops o PDAs (entre otros) para tomar decisiones a partir de los datos obtenidos con los robots.

Los autores motivan el uso de RSCNs como remplazo de los actuales sistemas de seguridad fronteriza, por lo que ellos además establecen una serie de ventajas por sobre los métodos actuales (que involucran guardias, robots aislados y/o sensores de visión nocturna solamente):

- Ventaja al enfrentar situaciones complejas, como variedad de obstáculos o ambientes complicados de explorar. En definitiva toda tarea donde el humano no pueda resultar competente o donde el uso de un solo robot no sea suficiente.
- Tolerancia a fallas. Si se usa solo un robot (o robots individuales aislados) y este falla, presentará una debilidad de la seguridad desde el punto de vista de la vigilancia fronteriza. Esto también incluye el agotamiento de las baterías del robot.
- Excelentes en tareas de vigilancia debido a su bajo coste y flexibilidad. Es flexible ya que permite la colaboración entre robots que no están físicamente unidos, y es de bajo costo ya que el costo del desarrollo de robots ha bajado considerablemente con el transcurso de los años.
- Poderosa combinación con las WMN (wireless mesh networks), ya que el uso de estas redes provee comunicación efectiva e interactiva entre robots y coordinador.

### B. La arquitectura.

La arquitectura propuesta está compuesta por dispositivos coordinadores (administrador), routers, usuarios y robots.

El desarrollo de esta arquitectura tiene asociado los siguientes desafíos:

- *Sobre el diseño de algoritmos swarm.* Relacionados con la coordinación de los robots, y de cómo se relacionan unos con otros físicamente (trabajo colaborativo, hardware para engancharse, etc).
- *Sobre la arquitectura del software de monitoreo.* Esto incluye la elección de un lenguaje de programación que sea el más adecuado para realizar las tareas de monitoreo requeridas, además de la gestión de la inteligencia artificial así como también del protocolo de comunicación.
- *Sobre la inclusión de calidad de servicio (QoS) en las redes mesh.* Esto trae consigo una serie de desafíos a cubrir, los cuales se revisarán dentro de los desafíos referentes al protocolo ya que se tratan de características que se relacionan tanto con la arquitectura como el protocolo que corre sobre ella.

### C. El protocolo

El protocolo abarca la manera en la que los integrantes de la red se comunican entre ellos. Este debe asegurar:

- *Una coordinación distribuida del enjambre de robots.* El desafío clave es asegurar conectividad sin tener previo conocimiento del patrón de exploración del robot, es decir, pueden moverse libremente basados en su propia inteligencia. Esto plantea los siguientes desafíos:
  - o Coordinación del enjambre basada en el movimiento. Cada nodo determina su velocidad y dirección para evitar rompimiento del link de comunicación.

- Recuperación del particionado del enjambre. Basado en el historial de conectividad, cada robot debería poder recuperar su conectividad con sus vecinos anteriores.
- Organización del enjambre energéticamente eficiente. Coordinar el enjambre para reducir movimiento y minimizar la energía necesaria para mantener conectividad.
- Despliegue en enjambre. Se debe maximizar el área de cobertura, así como evitar obstáculos. Todo mientras no se pierde conectividad.
- Fusión de datos y reconocimiento colaborativo de objetos. Es imprescindible que los robots compartan información y colaboren para reconocer objetivos (personas, lugares, etc). Debe existir un selector de datos que seleccione y transmita la cantidad de información importante para los robots vecinos.

- *Soporte de QoS en redes mesh.*

El desafío es diseñar protocolos eficientes para soportar streaming de voz/video en redes multi salto, multi canal y multi frecuencia. Similar al WLAN, las redes WMN sufren de interferencia significativa de canal y por lo tanto no son capaces de alcanzar su máxima capacidad y soportar la suficiente QoS para aplicaciones multimedia. Desafíos que aún son temas a investigar para saber cómo incluirlos dentro del diseño de un protocolo de comunicaciones para enjambres de robots son los siguientes:

- Reconfiguración de la red. Direccionamiento dinámico de cada robot al cambiar entre router mesh.
- Integración de QoS. Cómo diseñar la red de tal manera de incluir soporte para usuarios provenientes de internet.
- Balanceo de carga. Asegurar principios de uso eficiente de recursos y de admisión de llamadas.

*D. La aplicación.*

Una aplicación orientada a redes inalámbricas de enjambres de robots debe incorporar soporte para tareas de control, coordinación e información en tiempo real. A la fecha de publicación de [1], ninguna ofrece todo lo anterior, o simplemente sólo son utilizados en entornos de simulación.

### III. DESCRIPCIÓN DE ENJAMBRE REFLEXIVO

Para entender la idea de un enjambre reflexivo es necesario en primera instancia entender a qué se refiere el término de inteligencia reflexiva. Según [2], el cerebro se puede descomponer en una serie de recursos, que se activan y desactivan continuamente con el fin de realizar determinadas acciones. El concepto de recurso es bastante abstracto y puede ir desde “levantar un brazo” a “sentir temor”. Sin embargo, ayuda a que la mente pueda ser organizada y dividida en

recursos disponibles para su uso. El realizar una determinada acción, conduce al proceso de activación y desactivación de recursos, lo que en algunos casos lleva a contradicciones. Un ejemplo de esto es por ejemplo la reacción al sentir que alguien nos atacará. Por un lado, podría sentirse miedo y prepararse para correr, por el otro se podría sentir rabia y prepararse para golpear. Ante este tipo de situaciones, se producen contradicciones que llevan a que la persona se paralice por unos instantes antes de tomar la decisión.

Para romper con estas contradicciones es que el cerebro posee jerarquías del pensamiento, lo cual consiste en procesos que tienen mayor nivel de acción y ejercen cierto poder sobre los otros niveles más bajos. Esto también permite establecer estrategias de activación y también niveles de complejidad sobre algunas acciones. Así, problemas difíciles se resuelven a través de mecanismos basados en la discriminación y la selección. Los más simples de estos son reglas if-then los cuales son rigurosos e inflexibles (más instintivos), mientras que los más elevados sugieren deliberar reflexivamente, incluyendo en el análisis valores aprendidos y resultados previos obtenidos.

Las divisiones jerárquicas que se plantean, ordenadas de la más primitiva a la más sofisticada son las siguientes:

- Reacciones instintivas. Instintos básicos que vienen con nosotros al nacer.
- Reacciones aprendidas. Aprendemos cómo reaccionar a ciertas condiciones.
- Pensamiento deliberativo. Para visualizar diferentes alternativas de solución.
- Pensamiento reflexivo. Reacciones acerca de qué está pasando dentro del cerebro.
- Pensamiento autorreflexivo. Para pensar sobre los planes hechos por nosotros mismos.
- Emociones autoconscientes. Para evaluar acciones versus ideales.

Éstas a su vez se separan en tres grandes grupos de acción [4].

- A-Brain. Cerebro Reactivo. Reacciona al mundo exterior sin tener consciencia sobre el significado de sus reacciones.
- B-Brain. Cerebro Deliberativo. Controla el buen desempeño del A-Brain. Sí tiene consciencia sobre las acciones realizadas, sobretodo basándose en el éxito anterior de una determinada estrategia. Así puede elegir desde un set de posibles estrategias la más adecuada para una situación.
- C-Brain. Cerebro Reflectivo. Este grupo es una especie de *manager* de los otros dos. Si la descripción del problema entregada por B-Brain es vaga, C-Brain le pedirá más detalles. Si B-Brain al contrario está arrojando muchos detalles innecesarios, C-Brain le sugiere una descripción más abstracta. Ahora, si B-Brain está tardando mucho en conseguir un resultado o una resolución, C-Brain le pedirá que cambie la estrategia.

El utilizar un esquema como el planteado como la

inteligencia artificial a cargo del enjambre es lo que da origen a un enjambre reflexivo de robots. Este enjambre, tendrá la capacidad de poder tomar decisiones instintivas a nivel de cada robot (ya que por limitaciones de procesamiento de los microcontroladores no se puede aspirar a más), pero también podrá tomar decisiones más complejas gracias a la inteligencia artificial coordinadora. De esta manera, las decisiones más simples se podrán realizar a una alta velocidad en cada robot sin necesidad de contar con la conexión con el servidor (lo que permite por ejemplo que un robot pueda regresar al grupo en caso que se separe de éste), mientras que decisiones que involucren a todo el grupo o que representen una complejidad mayor podrán ser tomadas por el coordinador.

El usar esta inteligencia reflexiva cubre en su cabalidad con los desafíos propuestos en cuanto a aplicación:

- Permite controlar el comportamiento del enjambre, gracias a la capacidad de tomar decisiones, e incluso juzgar su desempeño a través de la observación de los resultados, presumiblemente a través de una cámara en perspectiva cenital sobre los robots.
- Permite la coordinación de los robots, a partir de la información que es recolectada desde ellos gracias a la comunicación siempre activa entre la inteligencia artificial y el nodo coordinador de la red (ver sección IV para más detalles). Es más, se plantea la posibilidad de que sean un mismo ente, un servidor central que posea su propio nodo coordinador XBee y una cámara de video que haga tracking del comportamiento de los robots.
- Se podrá acceder a la información en tiempo real, y actuar también en tiempo real. De no ser posible un comportamiento en tiempo real (dadas posibles limitantes en la capacidad de cálculo que se necesitará para implementar la inteligencia artificial), se espera que sean lo suficientemente rápidas para la aplicación en la que se desea desplegar el enjambre de robots.

Por otro lado, el uso de una inteligencia reflexiva también permite poder enfrentar el desafío del diseño de algoritmos de comportamiento en enjambre, como fue descrito dentro de los desafíos relacionados con la arquitectura de la red. La idea de recursos puede ser extendida para tratar a cada robot como un set de recursos disponibles para la inteligencia artificial, no así para el propio robot. Cada robot tendrá su propio A-Brain, pero todos los robots compartirán el mismo B-Brain. De esta manera las tareas de comportamiento en enjambre, consideradas de mayor complejidad que las tareas propias de cada robot, estarán a cargo del B-Brain.

#### IV. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA XBEE S2

Como transmisor y receptor de las señales de radio que intercomunicarán a la red que soportará el funcionamiento del enjambre de robots, se pretende utilizar los sensores XBee S2 de Digi International. La principal razón es su protocolo de comunicación que da soporte a muchos de los desafíos

planteados en el diseño del protocolo de comunicación. Cabe destacar, que para esta aplicación en particular de enjambre reflexivo, en etapas tempranas del proyecto se definió la arquitectura de cada robot, y debido a que como principal objetivo de diseño es reducir al máximo posible el tamaño físico y el costo de fabricación del dispositivo, es que se optó por prescindir de una cámara de video en los robots. De esta manera, ya no son necesarias las capacidades de transmisión de video que según [1] debería tener la transmisión. Eliminando este requerimiento, también se eliminan las necesidades de QoS para streaming multimedia.

##### A. El dispositivo.

Las características más importantes de un dispositivo XBee S2 son las siguientes [3]:

- Posee 8 pines de I/O digitales.
- Posee 5 conversores ADC.
- Se puede lograr velocidades de transmisión serial de hasta 250[kbps], utilizando baud rates no estándar.
- Cumple con el estándar ZigBee para la transmisión de datos, lo que permite la interoperatividad del dispositivo con otros sensores de distinto tipo/marca.
- Permite el funcionamiento a través de comandos enviados serialmente como caracteres, o a través de de una API desarrollada por Digi que permite el envío de paquetes de datos a cualquier nodo presente en la red. Este modo permite configuraciones remotas de sensores, así como también obtener el máximo provecho de las capacidades de cada sensor para trabajo en red.
- Implementa redes mesh, usando Ad-hoc On-Demand Distance Vector (AODV) para calcular las rutas. Este vector de distancia se calcula sólo cuando se produce la ruptura de un enlace. Por esta razón, existe cierta latencia cuando se produce este evento entre que se reconozca la ruptura y se establezca una nueva red.
- Usa diferentes perfiles de acuerdo al servicio prestado por el transmisor. Un módulo XBee puede ser utilizado como coordinador (quien inicia una red mesh), como router (quien se conecta a una red iniciada por un coordinador y permite el envío de paquetes a través de él), o como end device (que no puede retransmitir paquetes pero sí puede entrar en modos de bajo consumo).

##### B. Soporte de QoS a nivel de arquitectura y de protocolo.

El uso de las características que incluyen los transmisores XBee S2 permite satisfacer algunos de los desafíos vistos al momento de describir el soporte de QoS que debería tener una red de comunicaciones para enjambres de robots:

- Reconfiguración de red. Gracias al ruteo mesh de los paquetes, en la eventualidad de un cambio en la configuración y disposición física de los nodos de la red los paquetes se re-rutean hacia el destino, gracias a la ejecución del algoritmo AODV. Esto permite que nodos puedan entrar y salir de la red sin interrumpir o

destruir el canal de comunicación entre un par de nodos, siempre y cuando exista más de un camino para que los paquetes puedan transitar entre ellos. El criterio que utiliza AODV para asignar los costos de las rutas es la potencia de la señal recibida desde los nodos visibles para un determinado nodo. De esta manera se selecciona la ruta que tenga una señal con mayor intensidad. Cabe destacar también que AODV es asimétrico, por lo que la ruta de transmisión hacia un nodo puede ser distinta que la ruta de recepción de ese mismo nodo.

- Balance de carga en redes WSN. Como se mencionó anteriormente, al no necesitar de las capacidades de streaming de video para la red, se pudo utilizar WSN en vez de WMN. Y gracias a que XBee soporta la construcción de redes mesh, se consigue un resultado similar en cuanto a robustez. Ahora, con respecto al balanceo de carga, si bien no se utiliza la red de manera intensiva bajo este funcionamiento de los robots, el módulo coordinador tiene la capacidad de elegir el canal menos congestionado al momento de iniciar la red. Esto lo realiza a través de un Channel Scan, en donde mide la energía de cada canal. Aquellos canales con más alta energía (y por lo tanto mayor cantidad de nodos presentes transmitiendo) son tomados como última opción.

### C. Cobertura de los desafíos de diseño de protocolo por parte de la tecnología XBee

Para satisfacer necesidades de protocolo se pretende que el nodo coordinador, así como cada microcontrolador conectado a cada transmisor se encarguen de gestionar la información entregada por los transmisores para así cumplir con cada característica:

- Coordinación del enjambre basada en movimiento. Consulta periódica de la intensidad del enlace inalámbrico con sus vecinos y establecer criterios de “peligro de interrupción”.
- Recuperación y particionado del enjambre. El microcontrolador debe tener la capacidad de registrar los últimos pasos de su ruta para así regresar al grupo y reincorporarse al enjambre en caso de que éste se pierda.
- Organización energéticamente eficiente y despliegue de enjambre. Se pretende utilizar el algoritmo planteado en [5] para la cobertura de una red robusta, es decir utilizando el concepto de dos fuerzas opuestas que tienen como objetivo controlar la cantidad de nodos adyacentes: por un lado  $F_{cover}$  hace que los nodos se alejen, y por el otro lado  $F_{degree}$  hace que los nodos se acerquen, para que de esta manera siempre hayan  $K$  vecinos, con  $K$  número arbitrario. ya que de esta manera se permite controlar su organización y despliegue (área de cobertura).
- Fusión de datos y reconocimiento colaborativo de objetos. Esta tarea queda dependiente de la inteligencia reflexiva, debido al bajo poder de procesamiento de cada robot. En otras palabras, es el coordinador quien suma los esfuerzos individuales de

cada robot para identificar los objetos, y toma las decisiones necesarias para enfrentar grupalmente el desafío al cual se enfrenta el enjambre (como podría ser mover una piedra o cruzar un puente, por ejemplo).

## V. DESAFÍOS PENDIENTES

Si bien se mencionan formas de enfrentar los desafíos planteados en [1], no todos han sido desarrollados en concreto. Es más, el desarrollo de la inteligencia reflexiva aún no ha sido iniciado y por lo tanto, es posible que no sea capaz de cubrir y enfrentar exitosamente los desafíos propuestos. Sin embargo, es un buen inicio de cara a un desarrollo de tema de magister el tener ciertos parámetros a considerar y cubrir con el desarrollo de una aplicación propia. El posible aporte al estado del arte consistirá por sobre todo en el diseño de la inteligencia artificial y cómo ésta permitirá que múltiples robots puedan ser controlados como si fuesen parte de un solo ente. Esta suerte de *desdoblamiento* de la mente humana será el desafío personal a la hora de la implementación del enjambre en general.

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a María José Escobar por su aporte en conocimientos (y también financiero) para hacer posible esta investigación y posterior desarrollo.

## REFERENCIAS

- [1] Ming Li; Kejie Lu; Hua Zhu; Min Chen; Shiwen Mao; Prabhakaran, B. “Robot swarm communication networks: Architectures, protocols, and applications”. Third International Conference on Communications and Networking in China, 2008. ChinaCom 2008.
- [2] Minsky, Marvin. “The Emotion Machine”. Simon & Schuster 2006. ISBN 0-7432-7663-9.
- [3] Faludi, Robert. “Building Wireless Sensor Networks – a practical guide to the ZibBee mesh networking protocol”. O’Reilly Media Inc., 2011.
- [4] Escobar, María José. “Reflective Swarm Robotics”. Presentación en Seminario de Softcomputing, primer semestre 2012.
- [5] Poduri, S. and Sukhatme, G. S. (2004). Constrained Coverage for Mobile Sensor Networks. IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, USA.