



## Sistema de transporte y embalaje utilizando robótica cooperativa basada en teoría de colonias de hormigas mediante plataforma Mindstorm de LEGO®

### Transportation and Packaging System Using Cooperative Robotics Based on Theory of Ants Colonies Using Platform LEGO® Mindstorm

Julián Rolando Camargo López<sup>1</sup> Nélide Johanna Hernández Suárez<sup>2</sup>  
Ana del Pilar Rodríguez Tibaduiza<sup>3</sup>

**Para citar este artículo:** Camargo, J., Hernández, N. y Rodríguez, A. (2015). Sistema de transporte y embalaje utilizando robótica cooperativa basada en teoría de colonias de hormigas mediante plataforma Mindstorm de LEGO®. *Redes de Ingeniería*, 6(1), 60-71.

**Recibido:** 22-abril-2015 / **Aprobado:** 29-mayo-2015

#### Resumen

En este artículo se presenta una propuesta que sugiere el siguiente paso evolutivo de la automatización (y más aún de la ejecución manual): la robótica cooperativa, aquí se muestra un sistema enfocado a la selección y embalaje, etapa final de la mayoría de procesos industriales. El problema fue abordado con agentes robóticos con diferentes características que trabajan emulando la organización de una colonia de hormigas, haciendo de estas etapas un proceso eficiente, eficaz y de gran flexibilidad ante los cambios de la producción.

**Palabras clave:** Bluetooth®, colonia de hormigas, robot autónomo, robótica cooperativa, sistema multiagente.

#### Abstract

This article presents a proposal that suggests the next evolutionary step of automation (and even more of manual execution): the cooperative robotics. In the next pages is presented a system of selection and packaging, which is part of the final stage of almost any industrial process. The problem was addressed with robotic agents with different features that work emulating the organization of a colony of ants making these stage efficient, effective and highly flexible in the face of production changes.

**Keywords:** ant colony, autonomous robot, Bluetooth®, multiagent system, robotics cooperative.

1. Ingeniero electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, especialista en Diseño y Construcción de Soluciones Telemáticas, Universidad Autónoma de Colombia, docente de planta, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, miembro del grupo de investigación LASER (Laboratorio de Automatización, Sistemas Embebidos y Robótica)-Universidad Distrital Francisco José de Caldas. [jcamargo@udistrital.edu.co](mailto:jcamargo@udistrital.edu.co)
2. Ingeniera Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, ingeniera de implementación y soporte, Soluciones Avanzadas de Ingeniería S.A.S. (Solaing S.A.S). [johanna.hernandez@solaing.com](mailto:johanna.hernandez@solaing.com)
3. Ingeniera electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. [adrodriquezt@correo.udistrital.edu.co](mailto:adrodriquezt@correo.udistrital.edu.co)

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Estado del arte

Aunque la generación de soluciones de ingeniería bioinspiradas no inició en una fecha puntual, el trabajo más relevante con respecto al aquí desarrollado apareció en 1956, año en que el biólogo francés Pierre-Paul Grassé creó la teoría de Stigmergy [1], la cual modela el comportamiento de nidificación de las termitas. Gracias a este modelamiento la comunidad científica ve la posibilidad de generar soluciones a procesamientos computacionales y a sistemas robóticos y se inicia la investigación de más insectos que se organizan en colonias.

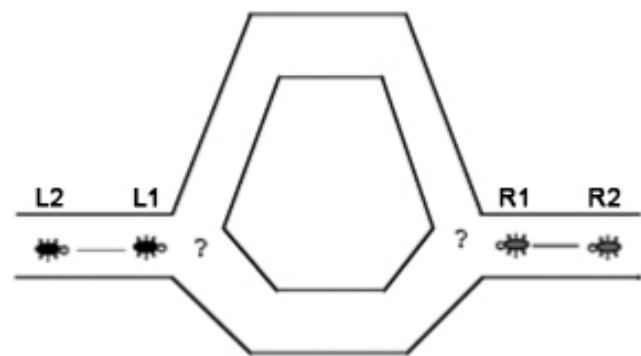
En 1991 M. Dorigo propone en su tesis doctoral [2] el primer algoritmo basado en colonias de hormigas. Fue a partir de este trabajo que se generó un interés particular por una de las características más llamativas de la organización de las hormigas: la habilidad de generar caminos con feromonas, los cuales son completamente comprensibles para toda la especie pero no significa una barrera física para otras. Inspirado en esta cualidad se pone de manifiesto en [3] una simulación de una tarea de búsqueda y recolección de elementos ejecutada por pherobots; algo relevante de este trabajo es la inclusión de algoritmos de sensación de pánico y reducción de interferencia espacial.

Otra característica importante que es emulada es la forma en la que las hormigas cooperan para construir su nido, dicho trabajo se evidencia en [4] donde tres robots cooperan para adecuar un terreno utilizando algoritmos bioinspirados. En [5] se presentan algunos algoritmos y comparaciones entre procesos realizados por estructuras que simulan el comportamiento de colonias de hormigas demostrando su eficiencia en diversas tareas, tales como encontrar el mejor camino (basado en el rastro de feromonas dejado por hormigas) y la extrema eficiencia a la hora de cargar objetos de grandes pesos relativos.

### 1.2. Descripción general del comportamiento de las colonias de hormigas

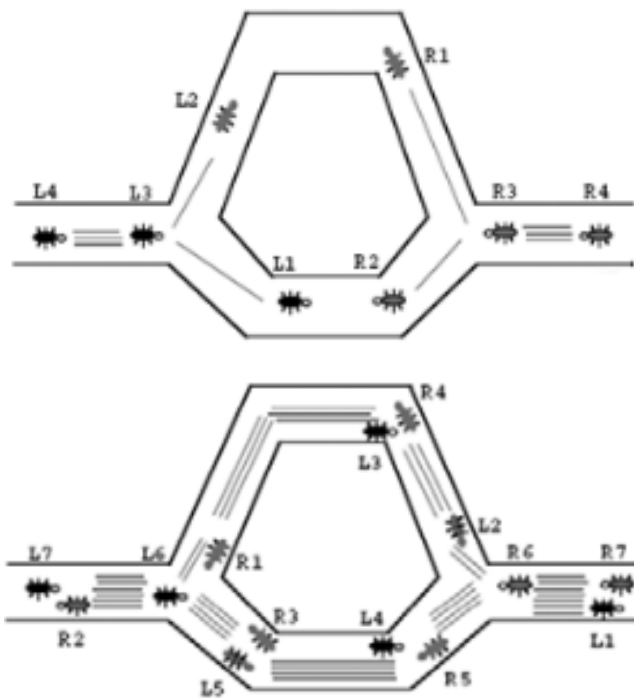
Inicialmente las hormigas salen de sus nidos a explorar de forma aleatoria el área cercana a su nido hasta encontrar alimento, luego evalúan la cantidad y la calidad de este tomando una muestra que será llevada hasta el nido; mientras se devuelve a su nido con la muestra, esta segrega una sustancia química en el aire llamada feromona, la cantidad de la feromona segregada dependerá de la cantidad y calidad del alimento e indica a las otras hormigas cuál es el camino que deben seguir para encontrar el alimento, para así llevarlo por completo al nido. El proceso se ha estudiado y se ha concluido que esta manera de comunicación de las hormigas les permite encontrar la ruta más corta desde el nido hasta el alimento [6].

Para que se entienda el comportamiento descrito anteriormente y la razón por la cual las hormigas toman finalmente el camino más corto, se ilustra con el siguiente ejemplo: Imagine que usted es una hormiga y sale de su nido en busca de alimento pero usted llega a un punto en que debe tomar la decisión de girar a algún lado, ya sea derecha o izquierda, como usted no siente presencia de feromona en el aire, la elección del lado al que debe girar se hace aleatoriamente. Se nombrarán R a las que se desplazan de derecha a izquierda y L a las que se desplazan de izquierda a derecha, como en la figura 1.



**Figura 1.** Hormigas a punto de tomar una decisión.

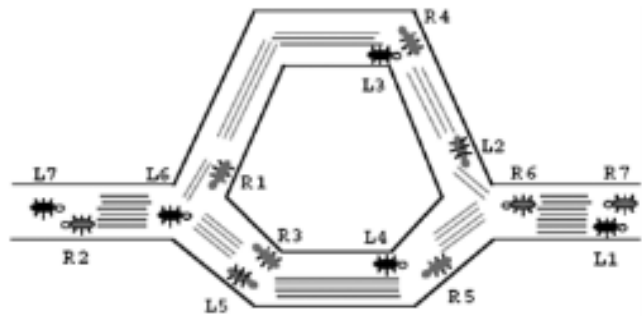
A continuación, si se supone que usted lleva la misma velocidad de todas las hormigas, en la figura 2 muestran lo que ocurre en los siguientes instantes. Si observa detalladamente las figuras, notará que se observan unas líneas punteadas en los caminos, las cuales indican la cantidad de feromonas que tanto usted como las demás hormigas han segregado.



**Figura 2.** Elección de forma aleatoria del camino y efectos de la cantidad de feromonas que segregan las hormigas a su paso.

En la figura 2 se nota que el camino inferior es más corto que el superior, ya que muchas más hormigas transitarán por este durante el mismo periodo de tiempo, por tal motivo, en el camino más corto se acumula más feromona mucho más rápido. A medida que transcurre el tiempo, la diferencia en la cantidad de feromonas de los caminos es muy grande, por lo cual, cuando se devuelva al nido y vuelva a tomar camino hacia el alimento encontrado, ya no tendrá que tomar una decisión basado en la aleatoriedad, sino que sentirá la cantidad de feromona en el aire y tomará sin duda el camino que contenga

la mayor cantidad de feromona, que es el camino más corto hacia su alimento, como se muestra en la figura 3. Dicho fenómeno se incrementa como un efecto de retroalimentación positiva en el cual todas las hormigas utilizarán el camino más corto.



**Figura 3.** Acumulación de feromonas en el camino más corto.

## 2. LEGO MINDSTORM NXT 2.0

LEGO Mindstorm NXT es la segunda generación de productos robóticos fabricados por el grupo LEGO™, quien lanzó al mercado su primera generación en 1998, bajo el nombre de “Robotic Invention System” [7]. El impacto de esta herramienta fue tal que se incorporaron categorías de “LEGO” en reconocidas competencias a nivel mundial, como la “RoboCup” en su versión junior [8], FLL (FIRST LEGO League) y la WRO (World Robot Olympiad) [9], y se generaron diferentes simposios [10], foros y publicaciones [11] a fin de compartir resultados y diversos modelos logrados con NXT.

### 2.1. Unidad de procesamiento (Brick)

- Procesador principal: Atmel 32-bit ARM, AT91SAM7S256.
- Coprocesador: procesador Atmel 8-bit tipo AVR, ATmega48.
- Cuatro puertos de entrada: interfaz digital de seis hilos, soporta señales analógicas y digitales.
- Tres puertos de salida: interfaz de usuario digital de seis hilos (6-wire).

- Módulo de comunicación inalámbrica Bluetooth: CSR BlueCore™ 4 v2.0 +EDR System, soporta SPP (Serial Port Profile).
- Módulo de comunicación USB 2.0: velocidad de puerto total (12 Mbit/s).
- Pantalla: pantalla LCD de 100 x 64 píxeles monocromática.
- Parlante: canal de salida de sonido con resolución de 8 bits.

## 2.2 Sensores

Para comunicarse con su entorno, la CPU recibe datos de sensores tanto analógicos como digitales. Los sensores analógicos dependen de un generador de corriente incorporado en el Brick, a fin de proporcionar compatibilidad con los sensores previamente desarrollados para el ladrillo RCX. Este generador de corriente provee energía al sensor por 3 ms y luego mide el valor analógico durante los siguientes 0.1 ms. Dado que el muestreo de los sensores del LEGO Mindstorms NXT utilizando el conversor analógico/digital es simultáneo, el tiempo de muestreo de estos últimos sensores debe contener el tiempo requerido por los sensores del RCX. Por esta razón, el sensor de tacto, el sensor de luz, el sensor de sonido y el sensor de temperatura (todos provenientes del NXT) son muestreados cada 3 ms. Por otro lado, los sensores digitales (incluyen un microcontrolador externo encargado del muestreo de la variable a medir) se comunican mediante el protocolo I<sup>2</sup>C. A esta categoría pertenecen la gran mayoría de sensores utilizados en el desarrollo de este trabajo.

## 2.3 Software

LEGO, en trabajo conjunto con National Instruments (quien a su vez desarrolla LabView), crearon un ambiente de programación llamativo y de fácil aprendizaje llamado NXT-G, que utiliza un lenguaje computacional llamado G (basado en flujo visual de datos). Es así como por medio de la unión

de bloques que representan motores, sensores y operaciones, se pueden crear programas básicos. Sin embargo, el limitado desempeño del NXT-G no permite crear y diagnosticar determinados algoritmos en tiempo real. Con el fin de mejorar el desempeño del control del robot, un número de herramientas software han sido desarrolladas y se encuentran disponibles. A continuación se enlistan algunas de ellas:

- LabVIEW Toolkit para LEGO
- BricxCC:
- pbLau
- leJOS NXJ
- Urbi

## 3. PROTOTIPO

Luego de múltiples pruebas se estableció que para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema, el prototipo del sistema debe estar compuesto por los siguientes elementos:

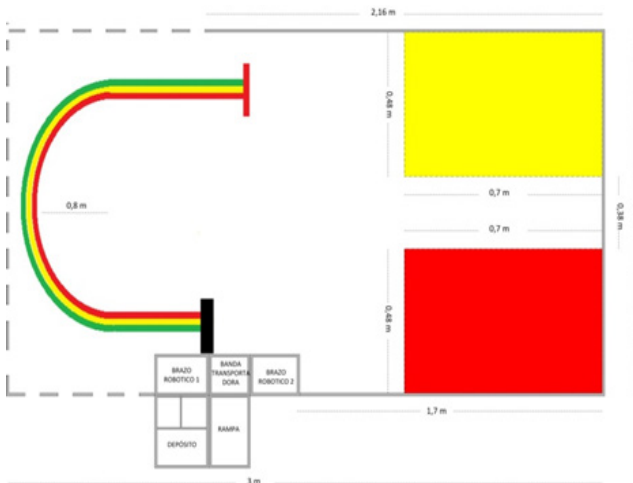
- Maqueta (entorno de trabajo).
- Agentes robóticos:
  - Agentes robóticos fijos.
  - Agentes robóticos móviles.
- Computador (HMI).

### 3.1. Maqueta

Es el ambiente en el cual se encuentran las unidades robóticas para desempeñar los procesos de selección, empaque y sellado de las cajas, así como su transporte y posterior ubicación. La figura 4 muestra el plano de la maqueta, en la que se resaltan seis componentes:

- Piso: garantiza un suelo plano, firme y de un color uniforme.
- Paredes: rodean la mayor parte de la maqueta y cumplen un papel fundamental para la localización de los agentes móviles.

- Almacenes: son el destino final de las cajas previamente empacadas, el robot diferencia un almacén del otro por el color del piso, ya que mientras uno es amarillo el otro es rojo.



**Figura 4.** Plano de la maqueta del prototipo.

- Línea: garantiza que el robot adopte una posición inicial precisa y exacta, va desde la salida del área del transporte hasta la posición inicial compuesta por tres colores.
- Rampa: es la encargada de alimentar las pelotas que la banda transportadora seleccionará para empacar la caja.
- Depósito: es el lugar donde se ubican los productos finales que no fueron utilizados en la caja a transportar.

### 3.2. Agentes robóticos

Los agentes robóticos son los encargados de prestar servicios para garantizar el cumplimiento de cada una de las labores que se deben realizar durante los procesos de selección, transporte, embalaje y almacenamiento de objetos. Se crearon dos tipos de agentes robóticos: unidades robóticas fijas y móviles, ambas emplean las partes incluidas en el kit educativo Mindstorms de Lego®. Todos los agentes incluyen: sensores, una unidad de procesamiento y actuadores (motores).

#### 3.2.1. Acondicionamiento de sensores

##### 3.2.1.1. Sensor de ultrasonido

Los sensores de ultrasonido permiten al robot medir la distancia a un objeto, además de detectar posibles obstáculos. Al hacer pruebas, algunas características no coincidieron con las especificadas en el manual de usuario, tales como:

- Rango: no es posible medir una distancia inferior a 7cm. Cuando se ubica un objeto a menos de 7cm el sensor retorna el valor 255, que se genera cuando no se tiene obstáculo.
- Interferencia: la interferencia se presentaría cuando dos robots se encuentren uno en frente del otro, situación que no es factible en este sistema.
- Comportamiento en movimiento: si el sensor se somete a niveles medios o altos de vibración la medida se ve afectada, en especial cuando un objeto se encuentra entre 40 y 50 cm de distancia. Esto se solucionó ubicando los sensores en una plataforma que les proporcionó una mayor estabilidad. Adicionalmente se realizó el promedio de varias mediciones para eliminar momentos en los que los sensores no detectaron objetos.
- Variación con respecto a la forma de los objetos: la exactitud de la medición se reduce si los objetos con los que calcula su distancia poseen curvas tales como esferas o conos. Objetos muy pequeños del mismo tamaño del sensor generan alto error en la medición.

##### 3.2.1.2. Sensor de color

Mientras que para los agentes fijos, el sensor de color permite realizar la selección de productos, para los agentes móviles es una herramienta fundamental para explorar y entender su entorno. El sensor de color utilizado fue el NXT Color Sensor V2 (NCO1038) producido por HiTechnic® para los

robots NXT. Este sensor utiliza un único LED para iluminar un objetivo y así analizar las componentes de rojo, azul y verde presentes en la luz reflejada. El sensor retorna un número entre 0 y 17 representando un color. Al realizar pruebas se comprobó un comportamiento eficiente, y muy preciso, luego de esto, se seleccionaron los colores indicados para utilizar en el prototipo (tabla 1).

### 3.2.1.3. Brújula

Tanto los agentes móviles como los fijos deben obtener información de su posición para efectuar movimientos. La brújula digital NXT (NMC1034) mide el campo magnético de la tierra y retorna un valor representando hacia donde apunta el sensor. El norte magnético es representado por 0° y el ángulo con respecto a este se da como un valor entre 0° y 359°. La brújula fue el sensor que mayor acondicionamiento requirió, puesto que su comportamiento no es lineal, por lo que se realizó una medición desde 0° ( Norte Magnético) hasta 345° con intervalos de 15°. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 2.

A partir de estos datos se obtuvo la curva característica del sensor, y con la ayuda de Excel™ la ecuación de la curva que más se aproximaba a ese comportamiento obteniendo así la figura 5 y la ecuación (1):

$$y = 0.000005x^3 - 0,0044x^2 + 1,9108x - 4,1707 \quad (1)$$

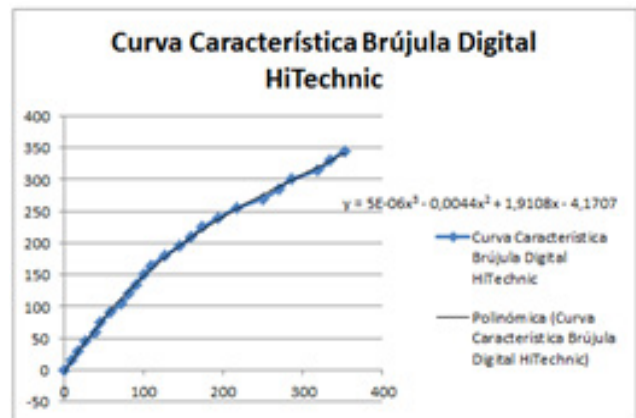


Figura 5. Curva característica para obtener la ecuación de la brújula HiTechnic.

Tabla 1. Número correspondientes a los colores utilizados en el prototipo.

Color	No.	Elemento	Color	No.	Elemento
Amarillo	6	Suelo almacén 1 y línea central.	Negro	0	Líneas de parada en zona de empaque de caja.
Azul	3	Pelotas tipo 1.	Rojo	8	Suelo almacén 2 y línea exterior izquierda.
Café	14	Piso.	Rosado	10	Pelotas tipo 2.
Naranja	7	Pelotas defectuosas.	Verde	4	Línea exterior derecha.

Tabla 2. Mediciones para obtener ecuación característica de la brújula.

Valor real	Valor medido	Valor real	Valor medido	Valor real	Valor medido	Valor real	Valor medido	Valor real	Valor medido
0	0	75	46	150	100	225	174	300	285
15	10	90	58	165	110	240	194	315	319
30	18	105	72	180	126	255	217	330	334
45	27	120	82	195	145	270	249	345	252
60	39	135	90	210	160	285	270		

Utilizando la ecuación (1) (donde  $x$  es el valor retornado por la brújula y  $y$  el valor acondicionado) se realizaron las mediciones del ángulo al que está apuntando el robot y se posibilitó realizar giros precisos; sin embargo, por la arquitectura física de las unidades móviles y fijas, se podrá girar a un ángulo determinado con una precisión de  $\pm 2^\circ$ .

#### 3.2.1.4. Acelerómetro

El sensor de aceleración/inclinación (NAC1040) producido por Hitechnic permite medir la aceleración e inclinación que experimenta el mismo en cada uno de sus ejes. El acelerómetro presentó un comportamiento satisfactorio. No obstante, para tomar una decisión basada en él se toman dieciséis muestras y se promedian para filtrar una posible medición errónea.

#### 3.2.2. Agentes fijos

Los agentes robóticos fijos cumplen con las funciones de selección y empaque de los objetos. Ellos trabajan cooperativamente para garantizar el cumplimiento de las dos tareas nombradas anteriormente. Estas unidades robóticas deben mantener una comunicación entre ellas para hacer correctamente su labor. Los agentes fijos presentes son dos brazos robóticos y una banda transportadora.

##### 3.2.2.1. Brazos robóticos

En términos generales, los brazos son los encargados de separar los objetos defectuosos de los que están en buen estado y de remover los objetos (pelotas plásticas) cuando ya se ha completado la cantidad requerida por el usuario. Estas dos tareas las cumple a medida que las pelotas pasan por la banda transportadora.

##### 3.2.2.2. Banda transportadora

Al igual que los brazos, la banda transportadora está hecha con partes del kit educativo Mindstorms de

Legó®. La banda transportadora cuenta con un sensor de color, gracias a esto es utilizada no solo para llevar las pelotas desde el almacén hasta las cajas ubicadas en el otro extremo de la banda; sino también para realizar el conteo de las pelotas que requiere el usuario y las pelotas defectuosas que pasan sobre ella.

#### 3.2.3. Agentes móviles

Los agentes robóticos móviles son los encargados de la búsqueda del camino óptimo para el transporte de las cajas y del transporte de estas cuando ya se encuentran con la cantidad de objetos requeridos por el usuario. Trabajan colectivamente con los agentes fijos comunicándose con ellos para garantizar el cumplimiento de todo el proceso de transporte y embalaje de las cajas. Cada uno de los agentes móviles está equipado con:

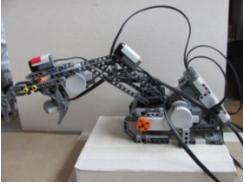
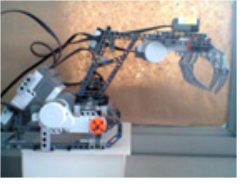
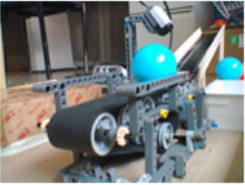
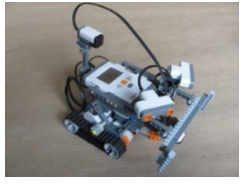

- 1 Unidad de Procesamiento Central (Brick).
- 2 servo-motores.
- 2 sensores de Ultrasonido para Legó®.
- 1 HiTechnic NXT Color Sensor Version 2 para LEGO MINDSTORMS NXT.
- 1 HiTechnic NXT Compass Sensor for LEGO Mindstorms NXT (tabla 3).

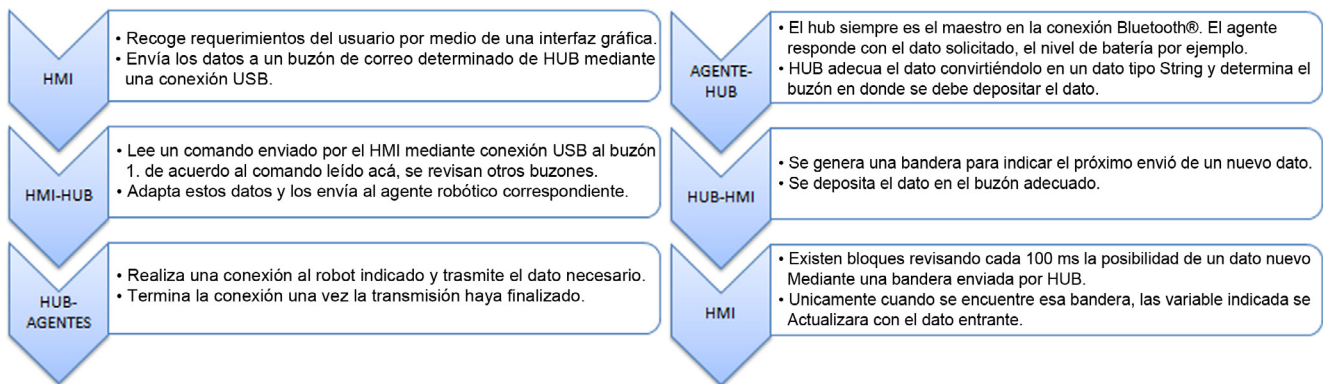
#### 3.2.4. Interfaz Humano Máquina (HMI)

El sistema no tendría ningún sentido de ser si no existiese una forma mediante la cual comunicarse con él y establecer los requerimientos que el usuario tenga. Esta interacción es posible mediante un software que permite transmitir las necesidades del usuario a los agentes robóticos para su ejecución. Se incluyó una CPU NXT de Legó® como enrutador y conversor de medio mediante conexión USB.

Cada CPU NXT tiene diez "Mailbox" o buzones de correo que le permite intercambiar mensajes, ya sea con otra CPU o con un computador. Cuando los mensajes se intercambian por medio de Bluetooth® se realizan transmisiones de tipo "Remote",

**Tabla 3.** Integrantes robóticos del sistema total.

Robot	Categoría	Tarea asignada	Imagen
ARM1	Agente Fijo	Selección de pelotas	
ARM2	Agente Fijo	Sellado de cajas	
BANDA	Agente Fijo	Llenado de caja	
NXTON/SALLY	Agente Móvil	Búsqueda de almacén y transporte	
HUB	HMI	Comunicación	



**Figura 6.** Secuencia de tx de datos desde HMI hacia agentes robóticos y viceversa.



permitiendo enviar al buzón de una CPU remota (no cableada) un dato de tipo numérico, booleano o de texto.

Cuando una CPU NXT se encuentra comunicada con un dispositivo, en este caso un computador, por medio de una conexión tipo USB solo es posible intercambiar mensajes de tipo String. En la figura 6 se muestran las secuencias de envío de mensajes desde el HMI hacia HUB y desde HUB hacia el HMI.

El HMI fue programado utilizando LabView. Una de las grandes razones por las cuales se decidió programar en esta herramienta, y no en un código basado en C o en Java, es que LabView posee un Toolbox para programar robots NXT.

## 4. ALGORITMOS IMPLEMENTADOS

El algoritmo implementado contiene una alta complejidad no por su costo computacional si no por la cantidad de entidades en las que se ejecuta simultáneamente. El objetivo total del algoritmo del sistema se divide en cinco procesos, que son:

- Exploración del entorno.
- Cálculo de ruta.
- Transporte de cajas.
- Selección y empaque de productos.
- Sellado de cajas.

### 4.1. Exploración del entorno

Una de las características destacables de este sistema es el alto grado de autonomía. Son pocos los datos que el usuario debe seleccionar para que este funcione; por ejemplo, la ubicación de los almacenes no está determinada por el usuario si no que es uno de los datos a descubrir, como lo hacen las hormigas verdaderas. El algoritmo tiene dos estados aleatorios:

- Dirección inicial: una vez el robot avanzó lo suficiente como para alejarse de la zona de

sellado de caja, sortea un número de 0 a 2 que determinará el primer paso a seguir (avanzar hacia la derecha, avanzar hacia la izquierda, seguir derecho).

- Ángulo de giro: cuando el robot enfrenta un obstáculo, retrocede y gira activando sus motores por un tiempo aleatorio. De no ser así, al llegar a una esquina el robot quedaría en un ciclo infinito ya que ejecutaría las mismas acciones ante los mismos estímulos.

### 4.2. Cálculo de ruta

Una vez encontrado el almacén es necesario hallar el camino menos costoso (distancia y número de giros) para transportar las cajas. La ruta más eficiente se determina por la cantidad de feromonas puesta en ellas que se refuerza entre más hormigas la transiten. La implementación de ese método para determinar la mejor ruta requería de múltiples iteraciones en las que las "hormigas" buscaran el camino y compararan las rutas estipuladas hasta construir la ruta total. Este comportamiento imita el comportamiento real de una hormiga, pero es inadecuado para un proceso industrial en el que el tiempo es un factor importante. Por lo anterior, se realizó un algoritmo adicional que le permitiera a una sola hormiga entender el recorrido que hizo y cómo podría ser simplificado para distribuir solamente la ruta más eficiente hacia el almacén correspondiente. No siendo necesario indicar un camino, bastará con indicar una coordenada para que la otra hormiga llegue al almacén requerido.

### 4.3. Transporte de cajas

Cuando una hormiga es informada de que una caja está lista para ser transportada, esta se encarga de conducir la caja hasta el área de sellado. Mientras la caja se sella, la hormiga verifica si conoce la ubicación del almacén requerido, de no ser así se conecta por medio de Bluetooth® a la otra hormiga exploradora preguntándole sobre la ubicación del

almacén. Hasta que la hormiga exploradora informe la posición del almacén, la hormiga encargada del transporte no sale de la zona de sellado. En la naturaleza, la hormiga seguiría la ruta que la otra hormiga generó mediante la feromona dejada, en nuestro caso la hormiga descubridora no entrega una ruta si no el punto final al cual debe llegar. Así, las hormigas están programadas para recorrer una distancia X y luego girar 90° para recorrer una distancia Y.

#### 4.4. Selección y empaque de productos

La selección y empaque de pelotas es un proceso que se lleva a cabo por dos robots, es en esta parte

donde más se necesita de la cooperación para lograr empacar una caja. Uno de ellos es el encargado de depositar las pelotas deseadas en la caja o retirar las que para ese caso específico no sean requeridas, el otro robot es la banda transportadora inteligente que se encarga de mover y detener las pelotas en el momento adecuado.

#### 4.5. Sellado de cajas

Sellar una caja llena de pelotas es un proceso sencillo por la fisionomía de la caja. Para sellar la caja el robot empuja la tapa y ejerce presión para asegurarla.

**Tabla 4.** Sincronización final.

Tiempo	Proceso 1	Proceso 2
0	Usuario ingresa requerimientos al HMI.	
1	HMI (HUB) envía datos sobre # de pelotas de cada color, y almacén a BANDA.	
2	SALLY informa a BANDA que está en la posición inicial y pide información sobre el almacén a buscar.	
3	SALLY abandona zona de empaque y sellado.	
4	SALLY solicita a NXTON que ponga caja en la posición inicial.	
5	NXTON lleva caja a posición inicial (marca negra).	
6	SALLY busca almacén.	BANDA y ARM1 llenan caja e informan a NXTON cuando esté completa.
7	SALLY encuentra almacén y retorna hasta la salida de la zona de transporte (marca roja).	
Ambos procesos deben haber concluido para continuar		
8	NXTON avanza y solicita a ARM2 sellar la caja.	
9	NXTON pide a SALLY coordenadas del almacén.	
10	NXTON lleva caja al almacén.	SALLY sigue la línea para llegar al punto inicial.
11	NXTON deja caja y se estaciona en la marca roja.	
Se esperan nuevas indicaciones de HMI		

## 5. SINCRONIZACIÓN FINAL

El resultado final de la implementación es la unión de todos los procesos explicados hasta este punto. Algunos de ellos pueden presentarse simultáneamente. En la tabla 4 se muestra en función del tiempo los procesos que transcurren para lograr una caja empacada, sellada y transportada al almacén requerido por el usuario.

## 6. CONCLUSIONES

A la hora de diseñar los algoritmos que permitieron el correcto desempeño del sistema, fue notorio el alto costo computacional y el tiempo requerido para la convergencia del mismo en algunos procesos de la implementación. Por ejemplo, fue inviable la implementación rigurosa de la feromona al momento de encontrar el almacén ya que requería de múltiples iteraciones para establecer un camino eficiente. Sin embargo, las características de los movimientos aleatorios y pseudo-dependientes del entorno hacen de la ubicación del destino final de las cajas un proceso dinámico y autónomo.

La comunicación como característica fundamental de la robótica cooperativa y como evolución de la automatización, fue el factor más importante. La sincronización total del sistema depende de la eficiencia de la comunicación, así que al no escatimar recursos (batería, costo computacional, etc.) se garantizó la correcta conexión entre los agentes robóticos.

Una de las grandes herramientas que permitió optimizar los procesos de comunicación y cálculo de rutas fue el uso del software NXC, que brindó la posibilidad de realizar funciones remotas, además de calcular las rutas, por el hecho de manejar variables en punto flotante y operar arreglos, entre otros. El HMI fue implementado en un computador utilizando LabView® y en una CPU NXT simultáneamente. La inclusión de la CPU adicional optimizó

la comunicación Bluetooth® de las CPU NXT con el computador y además brindó la oportunidad de incluir información adicional, como los niveles de batería de los robots.

Finalmente, se generó un sistema eficiente, dinámico, autónomo y sin duda alguna un modelo viable extrapolable con pequeñas modificaciones a escala real.

## 7. REFERENCIAS

- [1] P. Grassé, «La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la Stigmergie : Essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs». *Insectes Sociaux*, no. 6, pp. 41-80, 1959.
- [2] M. Dorigo, *Optimización, Learning and Natural Algorithms*. PhD thesis, 1992.
- [3] C. Garzón, *Métodos de búsqueda y recolección para un sistema de pherobots simulado utilizando algoritmos de rastreo LCH, sensación de pánico y reducción de interferencia espacial*. Trabajo de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2011.
- [4] M. García, Implementación de un prototipo de sistema robótico colectivo para adecuación de un terreno inspirado en algoritmos de comportamiento biológico. Tesis, Especialización en Informática Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2011.
- [5] J. Paciello, H. Martínez, C. Lezcano y B. Barán, "Algoritmos de Optimización multi-objetivo basados en colonias de hormigas". *Proceedings of CLEI'2006*. Santiago de Chile, Latin-American Conference on Informatics (CLEI), 2006.
- [6] S. Alonso, *La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques*. Granada, Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial, e.t.s. Universidad de Granada., 2004.
- [7] Lego®. LEGO® MINDSTORMS® NXT 2.0, 2013, [en línea]. Consultado en noviembre de 2013,

disponible en: <http://shop.lego.com/en-US/LEGO-MINDSTORMS-NXT-2-0-8547>

- [8] RoboCup Junior. RoboCup junior, 2013, [en línea]. Consultado en octubre de 2012, disponible en: <http://www.robocupjunior.be/robocup/>
- [9] World Robot Olympia, World Robot Olympia España, 2015, [en línea]. Consultado en abril de 2015, disponible en: <http://www.wroboto.es/>

- [10] Lego. (2010, junio), Lego Engineering Symposium, 2012, [en línea]. Consultado en octubre de 2013, disponible en: <http://www.legoengineering.com/lego-engineering-symposium-2010/>
- [11] Daniel Benedettelli. Danny's Lab, 2014, [en línea]. Consultado en mayo de 2014, disponible en: <http://robotics.benedettelli.com/>

