

Optimización por Colonia de Hormigas para la Asignación Dinámica de Recursos en una Plataforma de Experimentación de Temperatura Multizona

Mario A. Muñoz, Jesús A. López, Eduardo F. Caicedo

Abstract—En este trabajo, un algoritmo basado en el *Ant System* fue utilizado para la asignación dinámica de recursos en una plataforma de experimentación con múltiples entradas y salidas. Esta plataforma, que emula una grilla de temperatura, está compuesta por múltiples sensores y actuadores organizados en zonas. El uso de hormigas en esta aplicación permite encontrar el mejor actuador en cada periodo de muestreo. Esto permitió obtener una temperatura uniforme sobre la plataforma. Se observó un comportamiento adecuado del algoritmo implementado sobre la plataforma.

Index Terms—Cooperative systems, Intelligent control, Optimization methods, Resource management

I. INTRODUCCIÓN

LAS HORMIGAS son insectos sociales que viven en colonias y cuyo comportamiento está dirigido a la supervivencia de la colonia en lugar de los individuos. Estos insectos han atraído la atención de los científicos debido al alto nivel de complejidad que las colonias exhiben comparado con la simplicidad de sus individuos. Un comportamiento particular de las hormigas es su capacidad de encontrar el mejor camino entre sus fuentes de alimento y sus nidos. Para lograr este propósito, las hormigas utilizan una forma de comunicación basada en una sustancia química llamado feromona. Esta sustancia, depositada por la hormiga cuando avanza sobre un camino, representa información que es utilizada por las siguientes hormigas para escoger el camino correcto, que corresponde al que posee mayor concentración de feromona. Esto permite que las hormigas encuentren la ubicación de fuentes de alimento al igual que su nido. Se ha demostrado que los rastros de feromona permiten una optimización lenta y distribuida en la cual cada individuo simple provee una pequeña contribución en la búsqueda de la mejor solución. Este es un ejemplo de una propiedad asociada a la colonia que no es mostrada por el individuo [1].

Este trabajo fue parcialmente financiado por la Universidad del Valle y Ciencias bajo una beca por investigación otorgada a M. A. Muñoz y una pasantía por investigación a J. A. López. Este trabajo fue presentado en el Tercer Congreso de Electrónica, Robotica y Mecánica Automotriz – CERMA 2006, en Cuernavaca, Morelos, Mexico.

M. A. Muñoz es estudiante de Maestría en Electrónica de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. (e-mail: andremun@univalle.edu.co)

J. A. López es Candidato a Doctorado en Ingeniería de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. (e-mail: jesuslop@univalle.edu.co)

E. F. Caicedo es Profesor Titular de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. (e-mail: ecaicedo@univalle.edu.co)

Se ha desarrollado un modelo basado en este comportamiento y su mecanismo de comunicación para un sistema multi-agente aplicado a la solución de problemas combinatorios discretos como el problema del agente viajero (*Traveling Salesman Problem* — *TSP*) y el problema de asignación cuadrática (*Quadratic Assignment Problem* — *QAP*) [1]. En la actualidad la comunidad científica está interesada en extender y aplicar los algoritmos basados en hormigas para diferentes problemas de optimización discreta. Otras aplicaciones implican problemas como el enrutamiento de vehículos, el ordenamiento secuencial, la coloración de gráficos, enrutamiento en redes de comunicación, etc. [1].

En este artículo, se utiliza un algoritmo basado en el *Ant System* para asignar dinámicamente el tiempo de encendido de un actuador en la plataforma de experimentación de temperatura multizona (MuTEP) para lograr una temperatura uniforme sobre una área en particular. La plataforma (MuTEP), presentada en [2], es una planta de múltiples entradas/salidas que emula el funcionamiento de un sistema usado para controlar la temperatura sobre una superficie.

El artículo está organizado de la siguiente manera: Primero se muestran los conceptos principales del *Ant System*, a continuación se describe la plataforma de experimentación utilizada para la prueba del algoritmo, luego se continua con la explicación del algoritmo para la asignación dinámica de recursos en la plataforma de experimentación; finalmente, se muestran algunos resultados cuando el algoritmo fue aplicado a la plataforma.

II. EL *Ant System*

El *Ant System*, desarrollado por Colomi, Dorigo y Maniezzo [3], fue el primero de varios algoritmos basados en hormigas en ser desarrollado; además, es prototipo de varios algoritmos que conforman el paradigma de la optimización por colonia de hormigas (*Ant Colony Optimization* – *ACO*). El *Ant System* posee un grupo de agentes computacionales concurrentes y asíncronos que se mueven por los estados de un problema que corresponden a soluciones parciales. Los agentes se mueven aplicando una política local de decisión estocástica basada en dos parámetros llamados el rastro de feromona (τ) y el atrayente (η). Al moverse, cada hormiga construye una solución al problema de manera incremental. Cuando una hormiga completa una solución, o durante la etapa de

construcción de la misma, la evalúa y modifica el valor del rastro de feromona en los componentes usados en ella.

Adicionalmente, se implementa una lista tabú que contiene todos los movimientos que no son factibles para las m hormigas. Por otra parte, la probabilidad de transición de un movimiento ρ_{ij}^k para la k -ésima hormiga es calculada por la siguiente ecuación,

$$\rho_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \text{permitido}_k} [\tau_{ik}]^\alpha [\eta_{ik}]^\beta} \quad (1)$$

Donde permitido_k corresponde a los próximos estados factibles para la k -ésima hormiga. Al final de la búsqueda, los valores de la feromona son actualizados por las ecuaciones 2 y 3.

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (3)$$

El *Ant System* simplemente realiza iteraciones sobre un ciclo principal donde m hormigas construyen en paralelo sus soluciones, a continuación se actualizan los niveles de feromona. El desempeño del algoritmo depende de la correcta sintonización de varios parámetros ($\alpha, \beta, \tau_{ij}(0), m$, entre otros), y la correcta selección de una función de costo.

III. PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

El algoritmo de hormigas fue probado en la Plataforma de Experimentación de Temperatura Multizona (MuTEP) [2], la cual está compuesta de dos partes, una etapa de proceso y una etapa de adquisición de datos.

La etapa de proceso es una emulación de una grilla de temperatura, que corresponde a un sistema que exhibe efectos difíciles de modelar, especialmente fuertes interacciones entre las zonas y perturbaciones severas del medio. Por lo tanto, requiere el uso de estrategias particulares de control. Este tipo de sistema es principalmente utilizado en la industria de los semiconductores para la elaboración de cristales y la generación de capas foto resistivas. Estos procesos requieren mantener una temperatura constante sobre la superficie.

La etapa de adquisición de datos está compuesta por cuatro módulos basados en un micro controlador de bajo costo. Cada módulo controla un cuadrante del proceso y permite la comunicación con un computador maestro, el cual contiene el algoritmo de administración y control. La estructura básica del sistema se muestra en la Fig. 1 y la etapa de proceso se muestra en la Fig. 2.

IV. ALGORITMO DE HORMIGAS PARA LA ASIGNACIÓN DINÁMICA DE RECURSOS EN MUTEP

Se diseñó un algoritmo de hormigas basado en la estrategia mostrada por Quijano en [4] y [5]. Esta estrategia encuentra la zona con la menor temperatura y le asigna el recurso. Asignar el recurso implica encender el bombillo de la zona y, como consecuencia, se incrementa la temperatura de la zona.

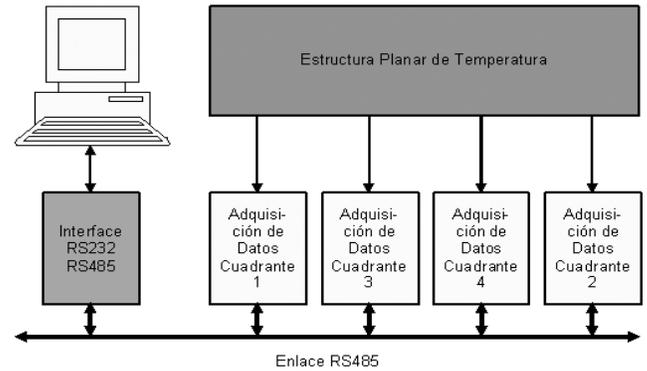


Fig. 1. Arquitectura de la Plataforma de Experimentación de Temperatura Multizona (MuTEP) para administración desde un solo Computador

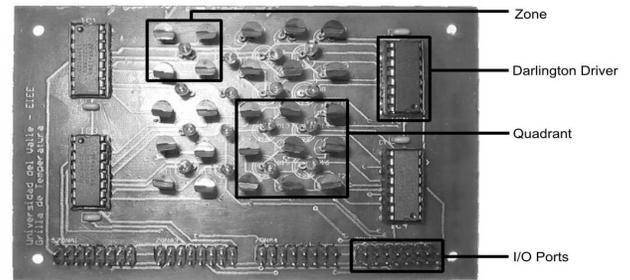


Fig. 2. Etapa de proceso de la Plataforma de Experimentación de Temperatura Multizona (MuTEP)

Ésta es una aproximación centralizada donde un solo agente computacional toma una decisión basada en el conocimiento global.

Las búsquedas realizadas por el *Ant System* son usualmente en espacios discretos. En esta aplicación los estados (los bombillos en cada zona) son discretos. Esto permite relacionar los estados del *Ant System* a las zonas en la planta.

La función objetivo utilizada en las pruebas pretende obtener una máxima temperatura uniforme sobre la superficie del proceso usando un número limitado de actuadores en un periodo de tiempo. La cantidad de actuadores depende del número de hormigas (agentes) usados en el algoritmo. Se realizaron pruebas con una, dos y cuatro hormigas. Esto produce que en cada instante de muestreo se enciendan uno, dos o cuatro bombillos respectivamente.

En nuestro algoritmo la forma en que la hormiga selecciona el siguiente bombillo a encender es similar a la forma en la cual una hormiga selecciona la siguiente ciudad a visitar en la implementación de ACO para resolver el TSP. En la implementación del TSP, la siguiente ciudad a ser visitada es seleccionada encontrando la ciudad más cercana o la ciudad con mayor cantidad de feromona. En nuestro algoritmo, la próxima zona a visitar es escogida seleccionando la zona más cercana (aquella con menor temperatura) o la que posea mayor concentración de feromona.

La feromona inicial para todas las zonas está definida como el promedio de la temperatura de las zonas. En este caso se

tiene dieciséis zonas y la feromona inicial es calculada usando la siguiente ecuación:

$$\tau_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{16} T_i}{16} \quad (4)$$

La actualización de la feromona es realizada usando un factor que es inversamente proporcional a la temperatura de la zona. Las ecuaciones de actualización de la feromona son:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{T_{ij}^\beta} \quad (6)$$

Donde $\beta = 2$.

Nótese que en el algoritmo solamente se utiliza la actualización local de la feromona. La actualización global no es necesaria ya que no existe un recorrido como en el TSP.

El algoritmo es similar al ACO para resolver TSP en el que son utilizadas probabilidades para explorar o explorar el conocimiento [6]. Una explotación del conocimiento selecciona el siguiente estado a aquel con máximo valor de feromona y la exploración de conocimiento utiliza una selección basada en lotería donde la probabilidad de selección de un estado está basada en la cantidad de feromona.

En cada instante de muestreo las hormigas seleccionan la siguiente zona a ser visitada. Cuando una hormiga visita una zona enciende el bombillo correspondiente incrementando la temperatura de la zona. Una hormiga finaliza un circuito cuando ha visitado seis zonas. Se determinó experimentalmente que el uso de seis zonas balancea el efecto producido por la selección aleatoria generada al inicio del algoritmo, con la selección secuencial realizada al visitar todas las zonas. Para evitar la repetición de estados en un circuito, y restringir las colisiones entre agentes, se utiliza una lista tabú. La lista es llenada con las zonas que la hormiga ha visitado.

Con estas consideraciones, el algoritmo desarrollado es [7]:

- 1) La feromona inicial es evaluada como el promedio de las temperaturas iniciales. Ecuación 4.
- 2) Al inicio de un circuito las listas tabú son inicializadas en cero. Cada hormiga es posicionada aleatoriamente en una zona. El número de hormigas por zonas es restringido a uno.
- 3) Para cada zona se obtiene un vector de temperatura con los valores actuales de todas las zonas excepto la actual donde se coloca cero.
- 4) La probabilidad de transición se calcula por medio de la ecuación 1.
- 5) Se realiza la selección entre explotación y exploración. Esto determina el siguiente movimiento de la hormiga.
- 6) Si se selecciona la explotación el próximo estado sera aquel con máxima feromona que no sea utilizado por otra hormiga. De lo contrario se realiza una selección por lotería.
- 7) La lista tabú se actualiza para evitar la repetición de estados.
- 8) La actualización de la feromona se realiza usando las ecuaciones 5 y 6. En esta implementación $\rho = 0.8$.

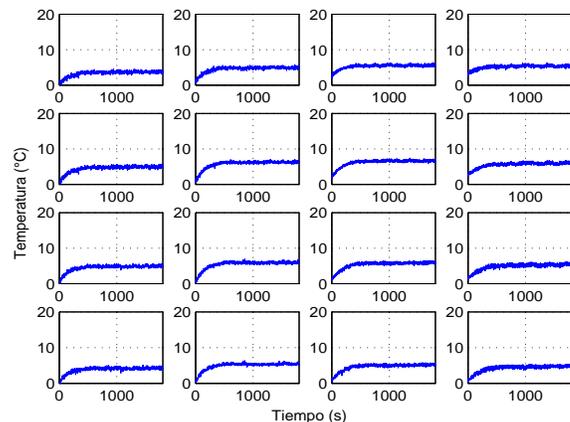
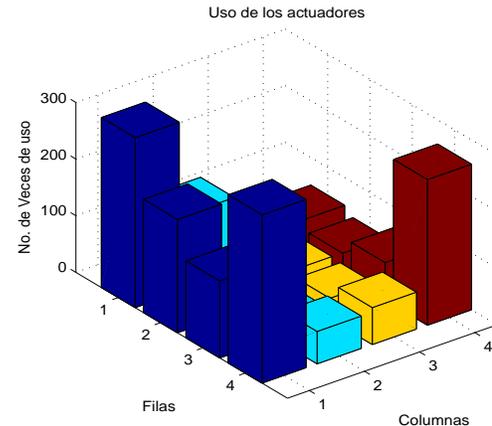


Fig. 3. Resultados del experimento con una sola hormiga. (a–superior) muestra el numero de veces un actuador es usado durante el experimento, (b–inferior) muestra las temperaturas de las zonas durante el experimento

- 9) Cada hormiga repite los pasos 3 a 8 hasta completar su circuito.
- 10) Se repite todo el proceso desde el paso 2.

V. RESULTADOS

Para la ejecución del algoritmo se usaron diferentes tamaños de la población. Primero, tomando en cuenta que cada hormiga enciende un actuador, se restringe el máximo tamaño de la población a cuatro hormigas. Los experimentos realizados usaron poblaciones de uno, dos o cuatro hormigas. Los resultados para una hormiga se muestran en la Fig. 3, para dos hormigas en la Fig. 4, y para cuatro hormigas en la Fig. 5.

Este método utiliza más los actuadores en las esquinas de la superficie. Esta situación es similar a la descrita en [5]. Aparte, el incremento de la temperatura está relacionado con la cantidad de agentes utilizados. Puede verse en las figuras 3a, 4a y 5a que hay una tendencia a seleccionar más los actuadores de la primera columna. Aunque los actuadores centrales son usados en una proporción similar, que puede ser relacionado al componente aleatorio del algoritmo. Las figuras 3b, 4b and 5b muestran que hay un menor incremento de la

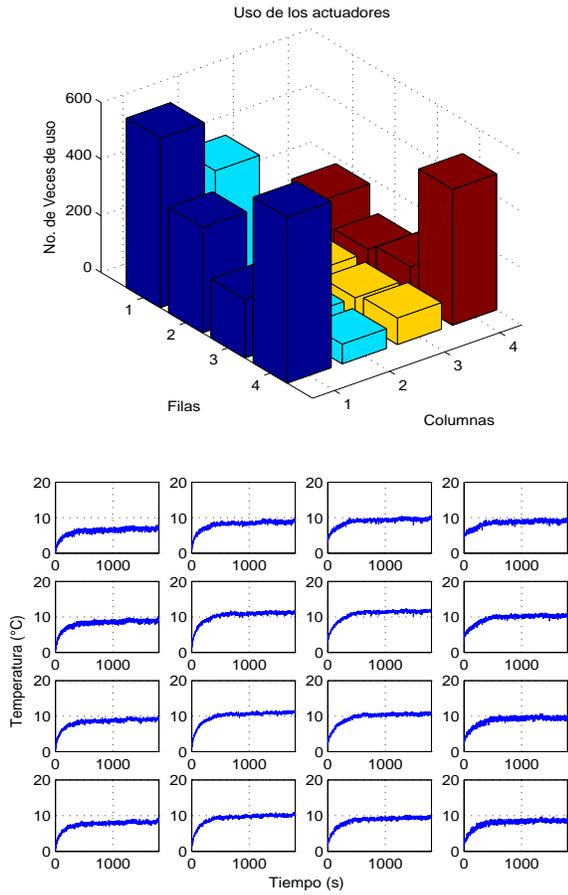


Fig. 4. Resultados del experimento con dos hormigas. (a–superior) muestra el numero de veces un actuador es usado durante el experimento, (b–inferior) muestra las temperaturas de las zonas durante el experimento

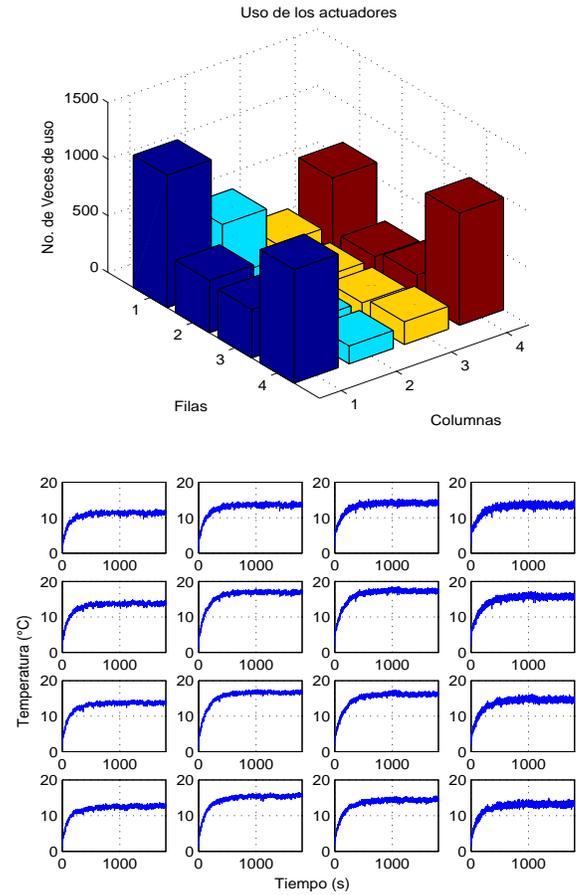


Fig. 5. Resultados del experimento con cuatro hormigas. (a–superior) muestra el numero de veces un actuador es usado durante el experimento, (b–inferior) muestra las temperaturas de las zonas durante el experimento

temperatura sobre los bordes de la superficie, y se obtiene una rápida estabilización de la temperatura. Para las poblaciones multiagente, la temperatura muestra una mayor dispersión.

Para la evaluación de resultados, se usan una serie de parámetros para verificar si la superficie de temperatura obtenida alcanza el objetivo, estos son:

- Máxima temperatura promedio ΔT : Corresponde a la máxima variación de la temperatura promedio de la superficie. Con $t_p(0)$ la temperatura promedio en 0 y $t_p(t_{fin})$ la temperatura promedio al final del experimento ΔT esta definido por la ecuación 7. Los resultados son mostrados en la Fig. 6.

$$\Delta T = t_p(t_{fin}) - t_p(0) \quad (7)$$

- Tiempo de Establecimiento t_{est} : Corresponde al tiempo tomado en lograr la máxima temperatura promedio. Los resultados son mostrados en la Fig. 6.
- Dispersión de la temperatura de establecimiento σ : Corresponde al error de la superficie con respecto a la temperatura promedio. Los resultados se muestran en la Fig. 7.

- Porcentaje de Dispersión $\% \sigma$: Corresponde a la comparación entre la dispersión y la temperatura promedio obtenida. Los resultados se muestran en la Fig. 7.
- Promedio de la acción de Control CA : Corresponde al número promedio de actuadores usados en una muestra. Permite la identificación del esfuerzo de control usado para elevar la temperatura y se calcula por la ecuación 8. Los resultados se muestran en la Fig. 8.

$$CA = \frac{1}{t_{fin}} \sum_{i=0}^{t_{fin}} \sum_{j=1}^{16} u_j(i) \quad (8)$$

VI. CONCLUSIONES

En este artículo, se presenta la implementación y prueba de un algoritmo de hormigas para la asignación dinámica de recursos en la plataforma MuTEP. Las hormigas presentaron un comportamiento inteligente que les permite alcanzar buenos resultados, aunque no óptimos, utilizando los actuadores más adecuados.

El experimento mostró que una mayor población incrementa la variación de la temperatura. El análisis de los resultados

Método	ΔT	t_{est}	σ	$\% \sigma$	CA
Secuencial	5,1808	699	1,2579	24,28	1,0000
Aleatorio	4,8320	388	1,1621	24,05	0,9339
Simple	5,2275	609	0,3568	6,83	1,0000
Distribuido	12,4800	482	0,5748	4,61	3,1189
1 Hormiga	4,4483	534	0,7532	16,93	1,0000
2 Hormigas	8,2744	831	1,2089	14,61	1,9872
4 Hormigas	13,5954	448	1,6402	12,06	3,7740

TABLE I
PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL EXPERIMENTO

muestra que el algoritmo de hormigas permitió un establecimiento más rápido que los algoritmos mostrados en [2].

Un trabajo futuro incluirá la construcción de un controlador basado en modelo para cada zona o para todo el sistema, usando un algoritmo de hormigas para optimización en espacios continuos. El desarrollo de este controlador incluirá restricciones en el número de actuadores usados, magnitud de la acción de control y operación continua, diferente a la aproximación ON-OFF usada en este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Profesor Kevin Passino por inspirar este trabajo y a sus estudiantes de postgrado Nicanor Quijano, Jorge Finke y Alvaro Gil por sus valiosos aportes.

REFERENCES

- [1] M. Dorigo, G. D. Caro, and L. M. Gambardella, "Ant algorithms for discrete optimization," *Artificial Life*, vol. 5, no. 3, pp. 137–172, 1999.
- [2] M. A. Muñoz, J. A. López, and E. F. Caicedo, "Implementation of a distributed control experimentation platform," in *IEEE 2005 Conference on Industrial Electronics and Control Applications*, 2005.
- [3] V. Maniezzo, L. M. Gambardella, and F. de Luigi, *Ant Colony Optimization*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004, ch. 1, pp. 101–117.
- [4] N. Quijano, "Experiments and technologies for decentralized temperature control," 2002.
- [5] N. Quijano, A. E. Gil, and K. Passino, "Experiments for dynamic resource allocation, scheduling and control," *IEEE Control Systems magazine*, pp. 63–79, 2005.

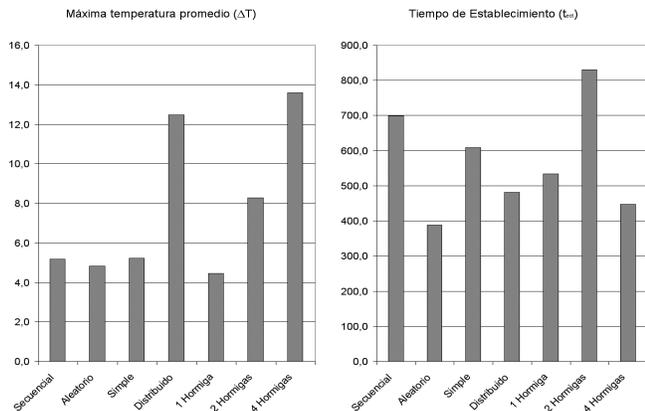


Fig. 6. Temperatura Máxima Promedio ΔT (izquierda) y Tiempo de Establecimiento t_{est} (derecha) con el algoritmo de hormigas y los algoritmos descritos en [2]. Las gráficas muestran que un incremento de la población permite una mayor temperatura, mientras que el tiempo de establecimiento se mantiene alrededor de un rango determinado.

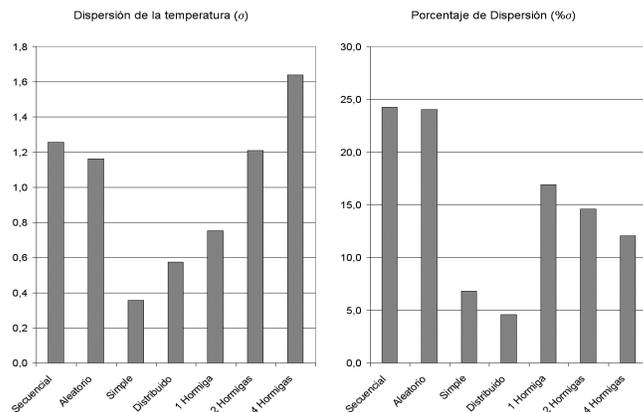


Fig. 7. Dispersión de la temperatura de establecimiento σ (izquierda) y porcentaje de dispersión $\% \sigma$ (derecha) con el algoritmo de hormigas y los algoritmos descritos en [2]. Las gráficas muestran que el incremento en la población aumenta la dispersión de la temperatura.

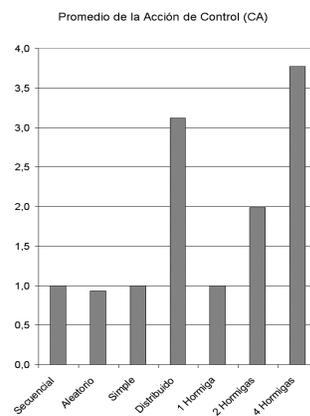


Fig. 8. Promedio de la Acción de Control CA con el algoritmo de hormigas y los algoritmos descritos en [2].

- [6] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53–66, 1997.
- [7] M. A. Muñoz, "Asignación dinámica de recursos con técnicas bio inspiradas para un sistema de control de temperatura mimo," 2005.



Mario A. Muñoz Recibió su grado de Ingeniero Electrónico de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 2005. Actualmente se encuentra estudiando para su grado de M.Sc. en Ingeniería Electrónica y participa del proyecto de investigación "Plataforma de Procesamiento Distribuido, con Acceso Remoto Multiusuario y Emulación de Sistemas Dinámicos, para la Investigación y Educación en Ingeniería" financiado por Colciencias y la Universidad del Valle.

Sus intereses incluyen el uso de técnicas de Inteligencia Computacional para la solución de problemas en identificación, optimización y control, en particular las técnicas de Inteligencia de Enjambres.



Jesús A. López Recibió su grado de Ingeniero Electricista y M.Sc. en Automática de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 1996 y 1998 respectivamente. Actualmente es candidato a Doctorado en Ingeniería con énfasis en Eléctrica y Electrónica en el grupo de Percepción y Sistemas Inteligentes de la Universidad del Valle. Adicionalmente es profesor auxiliar de la Universidad del Valle.

Sus áreas de interés son el control automático, los sistemas no lineales y la Inteligencia Computacional y sus aplicaciones a la identificación y control de

sistemas.



Eduardo F. Caicedo Recibió su grado de Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, Cali, Colombia, en 1984; y sus grados de Master en Tecnologías de la Información en Fabricación y Doctor Ingeniero en Informática Industrial, de la Universidad Politécnica de Madrid, España, en 1993 y 1996 respectivamente. Actualmente es Profesor Titular de la Universidad del Valle.

Sus áreas de interés son la Inteligencia Artificial, Robótica y la Inteligencia Computacional aplicada a la problemas de Automatización.