

Planeamiento de caminos y trayectorias mediante algoritmos genéticos y campos de potencial para un robot móvil

Diego A. Tibaduiza Burgos

MSc. en Ingeniería área Electrónica,
Universidad Industrial de Santander
Investigador Grupo CEMOS,
Universidad Industrial de Santander UIS
Bucaramanga, Colombia
diego.tibaduiza@upc.edu

Jaime G. Barrero Pérez

MSc. en Potencia eléctrica,
Universidad Industrial de Santander
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo CEMOS,
Universidad Industrial de Santander UIS
Bucaramanga, Colombia
jbarrero@uis.edu.co

Roberto Martínez Ángel

PhD en Ingeniería
Universidad Industrial de Santander
Docente Emérito, Investigador Grupo CEMOS,
Universidad Industrial de Santander UIS
Bucaramanga, Colombia
rmangel@uis.edu.co

Resumen— El planeamiento de caminos y la generación de trayectorias son dos aspectos relevantes al momento de dotar a un robot móvil de independencia para su movimiento en un espacio de trabajo. La utilidad de estas técnicas radica en la inclusión de variables como el tipo de sensores usados, la configuración física del robot y su entorno, este último, puede ser fijo o cambiante entre otros aspectos, con las cuales es posible obtener soluciones que brindan robustez al trabajo de dotar de autonomía a los robots.

En este artículo se presentan dos algoritmos para el planeamiento de caminos en un robot móvil de configuración diferencial, aunque como se verá es posible generalizarse a otras configuraciones. La primera de estas técnicas está basada en una emulación de la metodología conocida como campos de potencial y la segunda hace uso de los algoritmos genéticos para la obtención de los caminos. En la evaluación de las estrategias planteadas se muestran los resultados de la implementación en software basadas en un entorno físico en el que interactúan un sistema de visión artificial, transmisión inalámbrica y uso de robots móviles tipo diferencial.

Palabras clave— algoritmos genéticos, campos de potencial, planeamiento de caminos, robots móviles.

Abstract— The path planning and the trajectory generation are two important aspects for provide autonomy to a mobile robot. Adding variables as the type of sensors used, the physical configuration of the robot and its environment either fixed or changing and other is possible to provide robust solutions that work to provide autonomy to the robots. This article presents two algorithms for path planning in a mobile robot with differential configuration, although as will be shown can be generalized to other configurations. The first of these techniques is based on an emulation of the methodology known as potential fields and the second makes use of genetic

algorithms for obtaining the paths. For the evaluation of the strategies was designed a platform that include an artificial vision system, wireless communication and mobile robots with differential configuration.

Keywords— Genetic algorithms, potential fields, path planning, mobile robots.

I. INTRODUCCIÓN

La robótica es un campo de amplias perspectivas para el desarrollo industrial que en un tiempo relativamente corto, podría permitir a los países en desarrollo apropiarse de técnicas que los hagan más competitivos. En este sentido las universidades por medio de sus centros de investigación juegan un papel importante tanto en el desarrollo de prototipos como de algoritmos. De manera general, a nivel industrial, el concepto de robot se aplica en mayor medida a los robots manipuladores que desde hace ya varios años realizan tareas en procesos repetitivos que demuestran su eficacia en aspectos tales como precisión, funcionamiento ininterrumpido y manejo de cargas de gran peso.

Otro tipo de robots un poco menos conocido pero cuya presencia y uso van en aumento, lo constituyen los robots móviles autoguiados o como son conocidos por sus siglas en inglés AGV [1] [2] [3], los cuales son, entre muchas aplicaciones [4], capaces de mover elementos de gran peso dentro de un entorno que puede ser cambiante.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en una tesis de maestría [6], en la que se implementaron dos algoritmos para el planeamiento de trayectorias de un robot móvil en un ambiente cambiante. En esta plataforma se encuentra otro robot, el obstáculo móvil y la presencia de varios obstáculos fijos. El objetivo es llevar al móvil desde el punto origen hasta el punto destino dentro del área de trabajo y evitar todo tipo de colisiones. El lazo de realimentación lo constituye una cámara de video que permite determinar en todo instante la posición de los dos robots y la de los obstáculos estacionarios.

II. PLANEAMIENTO DE TRAYECTORIAS

Una de las tareas más importantes en robótica móvil es el planeamiento de la trayectoria, ya que esta le confiere al robot la capacidad de movimiento autónomo para ejecutar sus tareas.

La programación del movimiento del robot se descompone en dos partes: el planeamiento de caminos y la de trayectorias.

El planeamiento de caminos consiste en generar una ruta libre de colisiones en un ambiente con obstáculos y su optimización con base en algún criterio. El planeamiento puede realizarse *off-line* cuando el ambiente es estático, es decir, cuando el espacio de trabajo permanece sin variaciones para toda la trayectoria, mientras que cuando el espacio de trabajo cambia continuamente y obliga al algoritmo a generar respuestas ante estos cambios la planificación debe realizarse *on-line*.

La planeación de trayectorias consiste en fijar el movimiento de un robot móvil a lo largo de un camino planeado. Existen numerosos métodos para la planeación del movimiento de un robot móvil en ambientes estacionarios, pero pocos se han desarrollado para planeamiento del movimiento *on-line* en un escenario variante o en un terreno desconocido. En este artículo se describen dos algoritmos para planeamiento *on-line*, uno de ellos basado en algoritmos genéticos y el otro en campos de potencial.

A. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos forman parte de lo que se conoce como inteligencia artificial, y están fundamentados en la teoría de la evolución. Esta se basa en los mecanismos de selección que uti-

liza la naturaleza, en donde los individuos más fuertes de una población son los que sobreviven. De la genética se sabe que la manera mediante la cual estas adaptaciones al medio se transmiten de un individuo a su descendencia son los genes; los cuales son una estructura biológica que contiene información acerca del medio y las habilidades desarrolladas por sus ancestros.

La implementación de un algoritmo genético simple implica tener presente características tales como la reproducción, cruce y mutación.

Para realizar estas etapas el algoritmo debe ser codificado en cadenas que se llaman cromosomas, cada una conformada por elementos característicos denominados genes.

- Codificación

Si se piensa en una trayectoria, lo primero que se debe realizar es acotarla en términos de sus componentes fundamentales (genes). Para lograr esta tarea se debe definir una codificación binaria, de forma tal que permita ordenar, como cromosomas, cualidades tales como su dirección en el plano cartesiano y la distancia que le tomaría para ir de un punto a otro.

Los cromosomas escogidos [16][17],[19] representan: monotonía de la trayectoria en x y y: cromosoma α ; dirección: cromosoma β ; y distancia: cromosoma δ . La estrategia de codificación de los genes para los cromosomas es la que se observa en la Tabla I.

TABLA I
Codificación de cromosomas

Cromosoma	Codificación	Característica que representa
a	0	Monótono en X (MX)
	1	Monótono en Y (MY)
β	00	Vertical para MX y horizontal para MY
	01	Diagonal superior para MX Diagonal izquierda para MY
	10	Horizontal para MX Vertical para MY
	11	Diagonal Inferior para MX Diagonal derecha para MY
δ	Según ecuación (1)	

Fuente: [6],[17] y [19]

El número de genes del cromosoma δ , está dado por la ecuación (1).

$$l + \log_2 N = GenesCromosoma_{\delta} \quad (1)$$

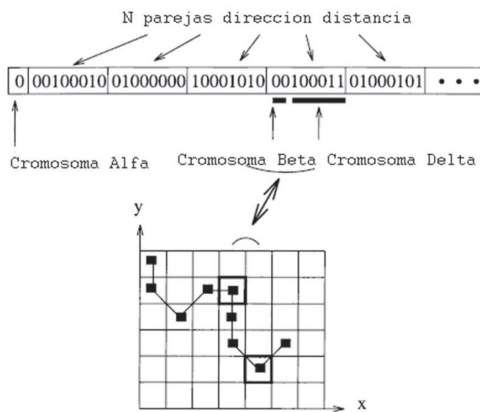
Donde N es el número de celdas que representan el territorio a cubrir por el robot móvil. Cada pareja dirección-distancia, representa pasos de distancia variable (parejas $\beta - \delta$).

Cuando el cromosoma de dirección es codificado en "00" el cromosoma δ puede ser positivo o negativo, es decir, el primer gen de este cromosoma es 0 para positivo o 1 para negativo.

Si es positivo y el individuo es MX representará una vertical positiva hacia arriba seguida de una diagonal superior derecha, si es negativo representará una vertical hacia abajo seguida de una diagonal inferior derecha.

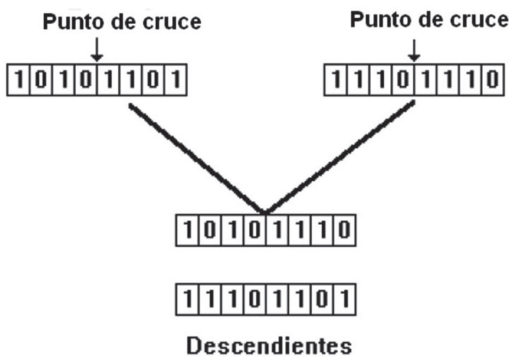
Si es positivo y el individuo es MY representará una horizontal positiva hacia la derecha seguida de una diagonal inferior derecha, si es negativo representará una horizontal negativa hacia la izquierda seguida de una diagonal inferior izquierda. La Figuras 1 y 2 muestran la distribución de cada cromosoma.

FIG. 1. EJEMPLO DE TRAYECTORIA CODIFICADA



Fuente: [6], [19]

FIG. 2. MÉTODO DE CRUCE



Fuente: [6], [19]

B. Campos de Potencial

Esta metodología ha sido ampliamente aplicada en robótica durante varios años con éxito [5],[6],[8-13]. Esencialmente, esta metodología trata a todos los elementos del área de trabajo como elementos sometidos a fuerzas de atracción y de repulsión.

El objetivo o punto de llegada se considera como una carga o el polo de un imán con polaridad contraria a la del móvil, es decir, que tiene una fuerza de atracción, mientras que los obstáculos se comportan como cargas o imanes de igual polaridad que generan, por tanto, fuerzas de repulsión. Con esta definición del área de trabajo, se procede a llevar al móvil sobre el escenario según un gradiente hacia el objetivo y evita los obstáculos [13].

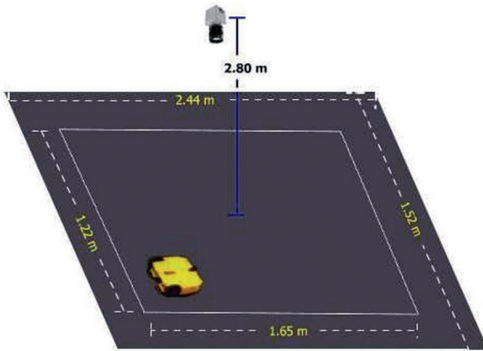
Normalmente esta metodología se realiza con funciones que involucran el uso de funciones gradientes, las cuales hay que programar en el momento de su utilización y que deben estar de acuerdo con las características propias de la aplicación. Como se verá la metodología que se propone en este artículo es una forma alternativa de generar campos de potencial de manera simple y de gran utilidad y que puede ser adaptable tanto al planeamiento *on-line* como al *off-line*, sin necesidad de realizar cambios significativos en la programación, pues únicamente va a depender de las coordenadas actuales o instantáneas de los obstáculos. En este trabajo la obtención de las coordenadas sólo se va a ver afectada por el tiempo de actualización de los datos obtenidos del procesamiento de las imágenes mediante el algoritmo de visión artificial.

Para su implementación, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Existe una "discretización" del terreno.
- Cada punto de la pista se considera afectado por un valor numérico que indica la relación de este con el punto de llegada. De esta manera cada celda definida posee un potencial que determina si la trayectoria puede pasar o no por allí.
- De acuerdo a la distribución numérica asignada, la trayectoria se hace de acuerdo a un potencial descendente
- El algoritmo puede ser *on-line* si se actualizan periódicamente los valores detectados,

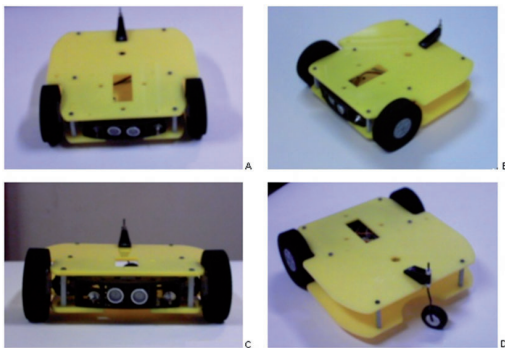
involucraron 2 robots móviles tipo diferencial [18], ver Figura 5, uno de ellos para realizar el planeamiento y el otro utilizado como obstáculo y cuyo movimiento se programó de manera aleatoria sobre el área de trabajo.

FIG. 4. PLATAFORMA DE PRUEBAS



Fuente:[6]

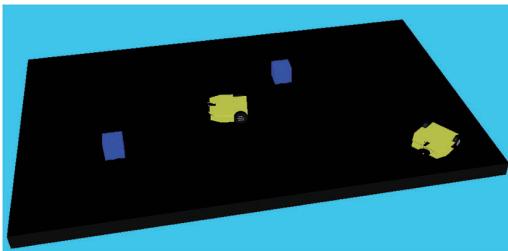
FIG. 5. ROBOTS MÓVILES USADOS



Fuente:[6]

La plataforma usada es de madera y fue pintada con color negro mate para evitar brillos o sombras que puedan dar falsas lecturas al algoritmo de visión artificial (ver Figura 6).

FIG. 6. VISTA DEL ÁREA DE TRABAJO



Fuente:[6]

Para determinar la posición y orientación de los robots y los obstáculos se utilizó una cámara ubicada dos metros por encima de la plataforma de madera para cubrir todo el entorno de trabajo.

Las imágenes captadas por la cámara son digitalizadas mediante una tarjeta de compresión de video PCI de 32 bits DFG/Compress y posteriormente procesadas mediante un algoritmo de visión artificial, el cual permite determinar la posición de cada objeto dentro de la pista. Estas coordenadas son enviadas a los algoritmos de planificación para el cálculo de las trayectorias.

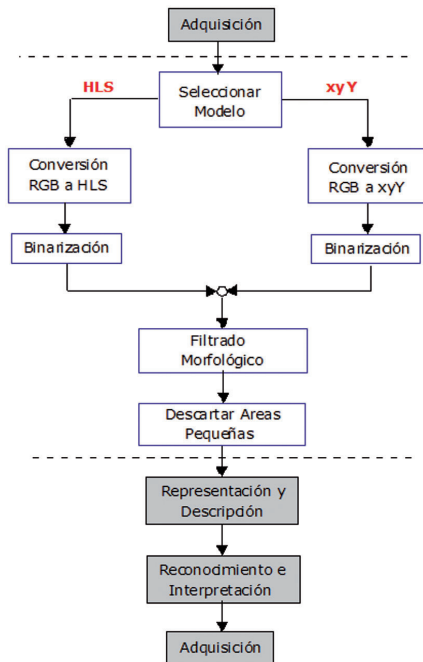
- Método basado en Color

Los algoritmos de detección y segmentación de movimiento basados en el reconocimiento del color, distinguen el color de los objetos de interés presentes en la escena para realizar su segmentación.

Se implementaron dos modelos de color el xyY y HLS [14] para realizar la detección [6], [15], [20]. La principal razón para elegir estos modelos radica en que tanto la información cromática como la de brillo son separadas en componentes distintas, lo cual hace a estos modelos robustos ante los cambios de iluminación que se presentan en el escenario. Además, al realizar detección solamente en las componentes que contienen la información cromática, el tiempo en la segmentación disminuye, lo cual disminuye también el tiempo total de procesamiento.

De manera general la metodología para el cálculo de los objetos en la escena se muestra en la Figura 7.

FIG. 7. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ALGORITMO DE COLOR



Fuente:[6]

- -Comunicación

La trayectoria calculada con los algoritmos de planificación de trayectorias son codificadas para su envío al móvil mediante radiofrecuencia [6],[18]. Se usan paquetes de 8 bits, 3 para definir la dirección y 8 para definir la distancia movilizada (ver Tabla IV).

III. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se presentan algunos de los resultados obtenidos mediante los algoritmos desarrollados y que fueron ejecutados en la plataforma de pruebas.

A. Planeamiento con Algoritmos Genéticos

En las Figuras 8, 9 y 10 se presenta una serie de trayectorias generadas por el Algoritmo Genético con 3 obstáculos en diferentes posiciones y con diferentes tamaños de matriz para la emulación del área física de trabajo.

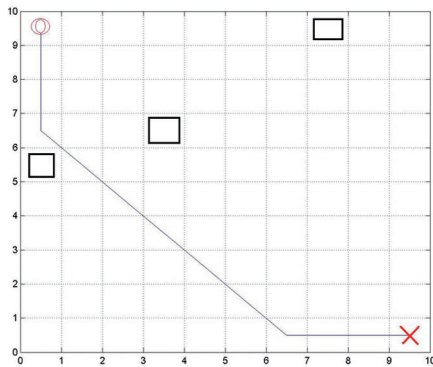
TABLA IV

Codificación para el envío por radiofrecuencia

Byte	Descripción
000XXXXX	Horizontal derecha
001XXXXX	Diagonal inferior derecha
010XXXXX	Vertical inferior
011XXXXX	Diagonal inferior izquierda
100XXXXX	Horizontal izquierda
101XXXXX	Diagonal superior izquierda
110XXXXX	Vertical superior
111XXXXX	Diagonal superior derecha

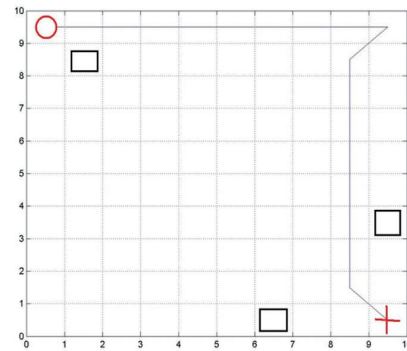
Fuente:[6]

FIG. 8. CAMINO EXITOSO SIN ZONAS DE RIESGO EN LOS OBSTÁCULOS, GENERACIÓN 20



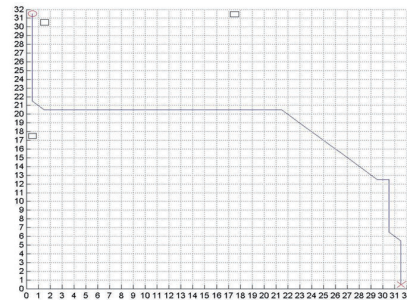
Fuente:[6],[19]

FIG. 9. CAMINO EXITOSO SIN ZONAS DE RIESGO EN LOS OBSTÁCULOS



Fuente:[6],[19]

FIG. 10. CAMINO EXITOSO CON GRILLA DE 32 CELDAS, CONSIDERANDO ZONAS DE RIESGO, GENERACIÓN 205

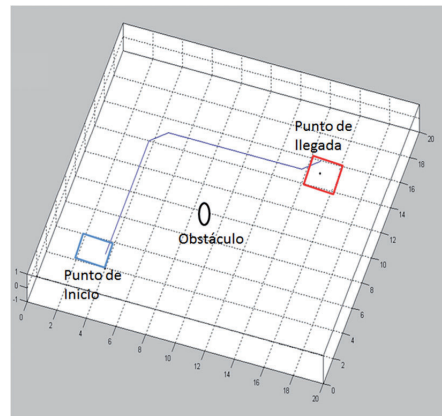


Fuente:[6],[19]

B. Planeamiento con Campos de Potencial

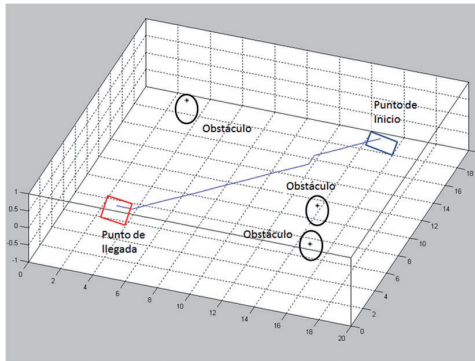
Para el algoritmo de campos de potencial se presenta en las Figuras 11, 12 y 13 los resultados al incrementar el número de los obstáculos desde 1 hasta 6. En este caso el tamaño del área de trabajo se mantuvo constante.

FIG. 11. ALGORITMO DE CAMPOS DE POTENCIAL CON UN OBSTÁCULO



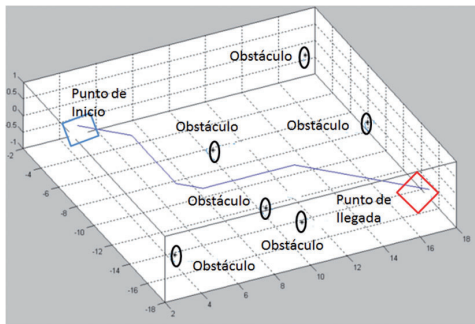
Fuente:[6]

FIG. 12. ALGORITMO DE CAMPOS DE POTENCIAL CON TRES OBSTÁCULOS



Fuente:[6]

FIG. 13. ALGORITMO DE CAMPOS DE POTENCIAL CON SEIS OBSTÁCULOS



Fuente:[6]

C. Análisis comparativo de los algoritmos

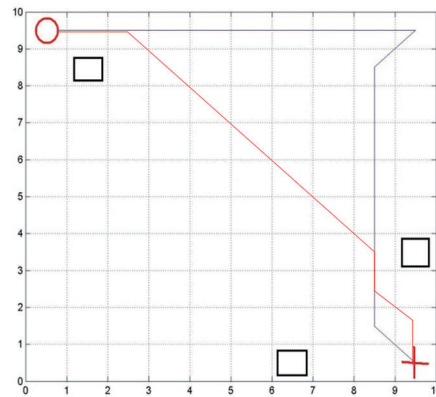
Como pudo apreciarse en las Figuras anteriores, ambos algoritmos permiten realizar el planeamiento de trayectorias de manera satisfactoria. Al comparar las dos técnicas se pueden resaltar los siguientes aspectos, el primero de ellos tiene que ver con la repetitividad de la trayectoria obtenida. Este aspecto es bastante relevante puesto que, por ejemplo, para el caso de un área de trabajo estática es posible obtener siempre la misma trayectoria mediante el algoritmo de campos de potencial acá presentado, mientras que con algoritmos genéticos dada la aleatoriedad del proceso se tienen resultados diferentes cada vez que se calcula la trayectoria con los mismos parámetros de entrada. El resultado, a su vez, depende de la configuración que se defina en los parámetros del algoritmo genético, obteniéndose trayectorias aceptables en diferentes números de generaciones para cada ejecución del programa.

Otro aspecto relevante corresponde al tiempo de cálculo de la trayectoria. En el caso del algoritmo genético se debe buscar un equilibrio entre

el número de generaciones y el tiempo de cálculo computacional. Esta relación permite usar el algoritmo genético en escenarios *on-line* para permitir una respuesta adecuada que permita al móvil responder ante cambios en el espacio de trabajo. En este sentido, encontrar la mejor trayectoria suele requerir en algunos casos de elevados tiempos de procesado (del orden de minutos), mientras que campos de potencial requiere siempre el mismo tiempo de procesado para una configuración de espacio de trabajo definida.

Finalmente, para realizar una comparación entre las trayectorias obtenidas con los dos algoritmos se muestra en la Figura 14 el resultado de los algoritmos para una configuración con tres obstáculos. Como puede observarse, ambos algoritmos logran ir de la posición de inicio a la posición final esquivando los obstáculos. La diferencia radica en el número de pasos definidos para llegar al objetivo, en este caso en particular campos de potencial presenta una trayectoria más corta.

FIG. 14. PLANEAMIENTO CON LOS DOS ALGORITMOS PARA UNAS MISMAS CONDICIONES DE ENTORNO (EN ROJO: CAMPOS DE POTENCIAL, EN NEGRO: ALGORITMOS GENÉTICOS)



Fuente:[6]

IV. TIEMPO DE LATENCIA

Puesto que los algoritmos planteados para el caso de los entornos dinámicos recalculan la trayectoria de acuerdo a los cambios que se encuentran en el espacio de trabajo, es importante, para mostrar la viabilidad de su implementación, tener en cuenta los tiempos de procesamiento tanto del sistema de visión artificial como el de los algoritmos

mos de transmisión inalámbrica serial, ver Tablas V, VI y VII.

Los datos de la Tabla V, VI y VII fueron obtenidos mediante un PC con las siguientes características:

Sistema Operativo: Microsoft Windows XP Profesional versión 2002.

Procesador: Pentium 4 de 1.50 Ghz.

Memoria RAM: 256 MB.

Para valorar los tiempos de ejecución de los programas basados en algoritmos genéticos y en campos de potencial en encontrar una trayectoria aceptable antes de su envío al robot móvil, se realizaron once ejecuciones de los algoritmos bajo las mismas condiciones. Las Tablas VI y VII muestran estos tiempos.

TABLA V
Tiempo de latencia del sistema de visión artificial

Método Tiempo de latencia (s)	Correlación		xyY	HLS	Gradientes	
	xyY	HLS			xyY	HLS
Adquisición	0.0735	0.0735	0.0735	0.0735	0.0735	0.0735
Procesamiento	0.8108	0.3018	0.9926	0.1661	0.7742	0.3000
Total	0.8821	0.3748	1.0643	0.2429	0.8515	0.3712

Fuente:[6],[20]

TABLA VI
Tiempos computacionales para el a.g.

TIEMPO POR GENERACIÓN EN SEGUNDOS	TIEMPO TOTAL PARA OBTENER UNA RESPUESTA ÓPTIMA EN SEGUNDOS
0.054	9.2
0.0071	4.3
0.0069	2
0.0067	4.7
0.0058	12.2
0.0063	5.1
0.0078	0.8
0.0076	4.6
0.0063	9.6
0.0065	7.9
0.0062	11.2

Fuente:[6],[19]

TABLA VII
Tiempos computacionales para campos de potencial

TIEMPO TOTAL PARA OBTENER UNA RESPUESTA ÓPTIMA EN SEGUNDOS
3.2

Fuente:[6]

Como puede verse en las Tablas, los tiempos de cálculo son relativamente altos y según la apli-

cación podrían detectar a tiempo si hay algún obstáculo en la trayectoria y recalcularla para llevar al móvil a su objetivo final.

V. CONCLUSIONES

Los algoritmos implementados, presentan buenos resultados en la búsqueda de trayectorias libres de colisión en un ambiente de trabajo previamente definido. Para esto la plataforma desa-

rollada y el algoritmo de visión jugaron un papel fundamental permitiendo comprobar que físicamente es posible implementar estos algoritmos y trabajar con ellos de manera *on-line* y *off-line* como se mostró con los tiempos de latencia.

El planeamiento con algoritmos genéticos dados su función de coste y la forma como se codifica la trayectoria brinda excelentes resultados aunque estos no siempre se obtienen en la misma generación. Debido a su naturaleza aleatoria, el número de iteraciones necesarios para encontrar una solución no sólo es diferente, incluso para el mismo escenario, sino impredecible, razón por la cual esta técnica no sería la más adecuada, especialmente si la velocidad del obstáculo móvil es elevada.

Por otra parte, el planeamiento de trayectorias basado en campos de potencial es una alternativa sencilla y eficiente, que aunque, en esta investigación, no usó métodos de optimización para encontrar la mejor trayectoria, si permite por su simplicidad una rápida y fácil implementación. Únicamente es necesario asignar unos pesos a toda el área de trabajo para seguir las celdas con valores numéricos más pequeños y encontrar el punto de llegada.

Es posible ejecutar el programa de planeamiento de trayectorias de campos de potencial para ambientes estáticos o para ambientes dinámicos, lo único que cambia en el algoritmo es la velocidad en la actualización de los datos y la velocidad del procesamiento por parte de los sensores.

El tamaño de la pista, el número de obstáculos, el punto de inicio y de llegada son ajustables en ambos algoritmos, lo que los hace más robustos y adaptables a cualquier terreno 2D.

El usar zonas de riesgo en ambos algoritmos permitió que las trayectorias obtenidas manejaran una distancia con respecto a los obstáculos para evitar choques. La trayectoria obtenida en los dos algoritmos depende básicamente de la definición de las zonas de riesgo y del tamaño del móvil.

Es posible hacer que cada elemento de la matriz represente un área dentro de la pista, así como también para el caso de terrenos pequeños hacer que cada coordenada (x,y) corresponda a un elemento de la matriz.

Cada vez que se evalúa hacia dónde se va a realizar el siguiente movimiento el algoritmo arroja la dirección para poder ser enviada al móvil donde se interpretará y se ejecutará.

REFERENCIAS

- [1] Corecon AGV Systems. Disponible: <http://www.coreconagvs.com/index.php>. Consultada: Septiembre 30 de 2011.
- [2] AMERDEN Inc. Disponible <http://amerden.com/index.html>. Consultada: Septiembre 30 de 2011
- [3] Robótica de Servicios. Disponible: http://www.roboticadeservicios.com/robots_transporte.html. Consultada: Septiembre 30 de 2011.
- [4] BBC News. Disponible: <http://www.bbc.co.uk/news/10344849>. Consultada: Septiembre 30 de 2011.
- [5] D.A. Tibaduiza, M. Anaya. "Campos de Potencial aplicados al planeamiento de caminos en robots móviles". Revista de Ingeniería. Vol. 1 No. 3, Ene 2007.
- [6] D.A. Tibaduiza. "Planeamiento de Trayectorias de un robot móvil". Trabajo de investigación de maestría. Directores: R. M. Ángel, J. Barrero. Universidad Industrial de Santander. 2006.
- [7] Anibal Ollero Baturone, Robótica, Manipuladores y robots móviles. Alfaomega, Marcombo, 2001.
- [8] R. Daily, D.M. Bevely. "Harmonic potential field path planning for high speed vehicles". Proceedings of American Control Conference, 2008. Seattle, WA. ISSN: 0743-1619.
- [9] C.W. Warren. "Global path planning using artificial potential fields". Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1989. Pp. 316-319. ISBN: 0-8186-1938-4.
- [10] H. Xiaoxi. "Path Planning Based on Grid-Potential Fields". Proceedings of International Conference on Computer Science and Software Engineering. 2008. Pp. 1114-1116.
- [11] Paul A. Vallejos, Javier Ruiz-del-Solar, Alan Duvost. "Cooperative Strategy using Dynamic Role Assignment and Potential Fields Path Planning". Proceedings of the 1st IEEE Latin American Robotics Symposium - LARS 2004, Mexico City, Mexico. October 28 - 29, 2004.
- [12] Laue, T., Röfer, T. (2005). Behavior Architecture for Autonomous Mobile Robots Based on Potential Fields". In: 8th International Workshop on RoboCup 2004 (Robot World Cup SoccerGames and Conferences), Lecture Notes in Artificial Intelligence. Springer, im Erscheinen.

- [13] D.A. Tibaduiza, N. Chio. "Metodologías de campos de potencial para el planeamiento de trayectorias de Robots Móviles". *Revista Colombiana de Computación*, 2008. Vol. 9. No. 2. Pp. 104-120.
- [14] G. Pajares, J. De la Cruz. "Visión por Computador: Imágenes Digitales y Aplicaciones". Editorial Alfaomega. 2002
- [15] D.A. Tibaduiza, R.M Ángel, Y. D. Amaya, J. Ruiz. "Localización Dinámica de Móviles y Obstáculos para Aplicaciones en Robótica". *Revista Colombiana de Computación*. Vol. 8 No. 1. Pp. 93-120.
- [16] K. Suguihara, J. Smith. "Genetic Algorithms for Adaptive motion planning of an autonomous mobile robot". *Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*. 1997.
- [17] K. Suguihara, J. Smith. "Genetic Algorithms for Adaptive Planning of Path and Trajectory of a Mobile Robot in 2D Terrain". *IEICE Transactions on Information and Systems*. Vol. E82-D No. 1 pp. 309-317. 1999.
- [18] C. H. Torres, E. Y. Mendoza. Control de dos móviles en un entorno dinámico. Trabajo de grado, Directores: R. M. Ángel, D.A. Tibaduiza. Universidad Industrial de Santander. 2006.
- [19] O. Navas, J. N. Ortiz. Algoritmos genéticos aplicados al planeamiento de trayectorias de un robot móvil. Trabajo de grado. Directores: R.M. Ángel, D.A. Tibaduiza. Universidad Industrial de Santander, 2006.
- [20] Y. Amaya, J. Ruiz. Localización Dinámica de Móviles y Obstáculos para Aplicaciones en Robótica. Trabajo de grado. Directores: R.M. Ángel, D.A. Tibaduiza. Universidad Industrial de Santander, 2005.