

Este artículo es producto del proyecto "Programa de fortalecimiento del grupo de investigación Sistemas Inteligentes Web- SINTELWEB" con fecha de inicio agosto de 2011 y fecha de terminación enero de 2013. Este proyecto es financiado mediante la Convocatoria Nacional de Investigación y de Creación Artística 2010-2012 de la Universidad Nacional de Colombia. La entidad que lo ejecuta es el Grupo de Investigación Sistemas Inteligentes Web- SINTELWEB de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Correo electrónico: jaguzman@unal.edu.co. Número telefónico/fax: (574) 4255378. Número de celular: 3006165271. Dirección de correspondencia: Carrera 80 No. 65-223, Facultad de Minas, Bloque M8A-306, Medellín- Colombia.

# MEJORANDO LAS ESTIMACIÓN DE LA POSICIÓN DE UN ROBOT MÓVIL QUE HACE USO DEL ALGORITMO DIST-BUG PARA LA NAVEGACIÓN

## IMPROVING THE ESTIMATION OF THE POSITION OF A MOBILE ROBOT THAT USES THE ALGORITHM DIST-BUG FOR NAVIGATION

Jaime A. Guzmán-Luna, PhD; Diego F. Márquez Betancur; Leidy Jiménez Pinzón

### RESUMEN

En este artículo, se presentan las mejoras realizadas en la tarea de localización de un robot móvil mediante el uso de sensores tales como, el compás electrónico y el tacómetro, con el fin de mejorar el desempeño de su navegación. Particularmente se muestra como se logra mejorar la precisión en los cálculos de la posición relativa y absoluta del robot. Estas posiciones son empleadas al interior del algoritmo de navegación Dist-Bug usado por el robot. Esto permite disminuir el error en la distancia recorrida y su localización final cuando termina la navegación.

### PALABRAS CLAVES:

Método de localización, Algoritmo Dist-Bug, robot móvil, incertidumbre en la medición, estimación de posición, integración de sensores.

### ABSTRACT

This paper presents improvements on the task of location of a mobile robot by using sensors such as electronic compass and tachometer in order to improve the performance of navigation. In particular, this article shows how we can improve the accuracy in calculations of the relative and absolute position of the robot. This positions are used in the navigation algorithm Dist-Bug used by the robot. This allows reducing the error on the distance traveled and its final location when the navigation has finished.

### KEYWORDS:

Location method, Dist-Bug Algorithm, Mobile Robot, measurement uncertainty, position estimation, integration of sensors.

## 1. INTRODUCCIÓN

La navegación es una de las tareas más desafiantes requeridas de un robot móvil. La navegación en el contexto de la robótica móvil, significa recorrer un camino que lo conduzca desde una posición inicial hasta otra final, pasando por ciertas posiciones intermedias o sub-metas. El éxito en la navegación requiere a su vez, del éxito en uno de sus componentes básicos, la localización, mediante la cual el robot debe determinar su posición y orientación respecto un cero u origen asociado al entorno en el que se desempeña [19].

En [10] se implementó el algoritmo Dist-Bug [1] para la construcción de rutas de navegación de un robot móvil implementado con el kit Lego Mindstorm 2.0, el cual hace uso de dos ruedas de tipo diferencial que implementan el movimiento del robot, al estar asociadas cada una a un servo motor y una rueda tipo castor para mantener el balance del robot. En este trabajo se encontró que existen diferencias al comparar los resultados teóricos y los experimentales en cuanto a la distancia que debía recorrer el robot, al igual que en cuanto a su posición final una vez terminada la navegación del robot implementado. Estas diferencias, que son consideradas errores, se le atribuyeron a factores no considerados, tales como, la fricción de las llantas y la propia geometría del robot, los cuales originaron errores en el algoritmo Dist-Bug implementado.

En este artículo, se pretende dar continuidad al trabajo en [10] buscando mejorar el desempeño de la navegación del robot móvil al obtener que su tarea de localización sea más precisa mediante el uso de sensores, tales como el compás electrónico, que permite obtener la dirección en que se desplaza el robot respecto a un eje de coordenadas

y el tacómetro, que permite obtener el valor de la distancia recorrida en un intervalo de tiempo. Particularmente, en este trabajo se muestra cómo al utilizar la información arrojada por los sensores anteriormente mencionados, se puede mejorar la precisión en los cálculos de la posición relativa y absoluta del robot empleados al interior del algoritmo Dist-Bug, lo cual, permite la disminución del error en la distancia recorrida y la localización final del robot al terminar su navegación [3].

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2, se realiza una breve descripción del algoritmo Dist-Bug y se trata de dos métodos de localización implementadas en este trabajo. En la sección 3, se muestran las nuevas características físicas y las mejoras en el cálculo de la localización del robot, implementado con el fin de mejorar la localización del robot durante la ejecución de su navegación. En la sección 4, se muestran los principales detalles de implementación del robot y del entorno experimental empleado en este trabajo. En la sección 5, se exponen los experimentos y el análisis de los resultados obtenidos. Por último, en la sección 6, se relacionan las conclusiones y trabajo futuro que se desprenden de este estudio.

## 2. EL ALGORITMO DIST-BUG Y LOS MÉTODOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE UN ROBOT DURANTE SU NAVEGACIÓN

El algoritmo Dist-Bug fue inventado por Kamon y Rivlinen 1997 [13]. Este algoritmo es una técnica simple que permite, en un ambiente controlado, la construcción de rutas de navegación de un robot móvil evitando obstáculos. El pseudocódigo básico de este algoritmo se muestra en la figura 1.

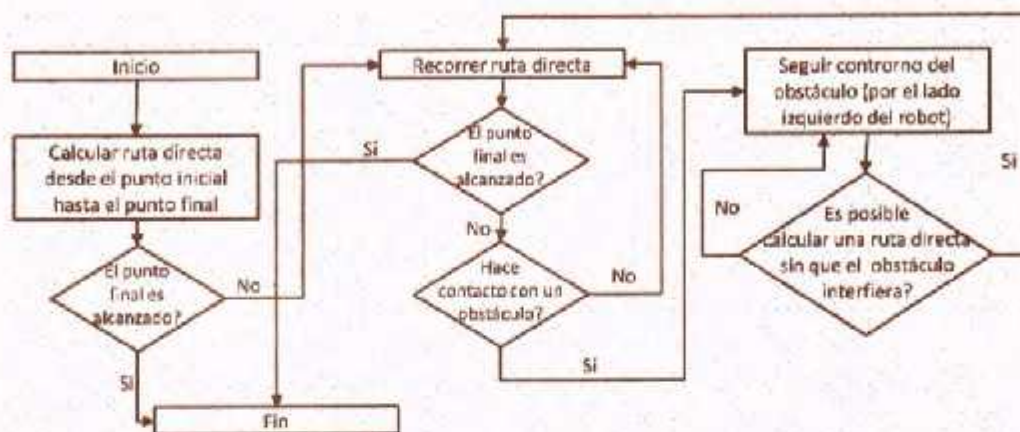


Fig. 1. Pseudocódigo del algoritmo Dist - Bug

Independiente del algoritmo empleado en la navegación de un robot móvil, existen diversos métodos asociados a la estimación de la posición de un robot [20]. A continuación se describen dos de los métodos de localización más utilizados en la literatura y que son aplicados en este trabajo.

#### A. La Odometría

La Odometría es el estudio de la estimación de la posición de vehículos con ruedas durante la navegación [8]. Esta estimación se realiza utilizando información sobre la rotación de las ruedas para estimar cambios en la posición a lo largo del tiempo. Esta técnica proporciona buena precisión a corto plazo, es de bajo costo computacional, y permite que las frecuencias de muestreo sean muy altas. Sin embargo, la idea fundamental de la odometría es la integración de la información del movimiento incremental con el tiempo, lo cual puede conducir inevitablemente a la acumulación ilimitada de errores [3]. A pesar de su amplia aceptación, esta técnica presenta diferentes fuentes de error. Una primera fuente de error, son los errores de orientación, los cuales causan errores de posición que aumentan proporcionalmente con la distancia recorrida por el robot (ver figura 2).



Fig. 2 Error de orientación en el cálculo de localización

Por otra parte, la odometría se basa en ecuaciones simples [8], que son válidas cuando las revoluciones de la rueda se pueden traducir con precisión en el desplazamiento lineal en relación con el suelo. Sin embargo, una segunda fuente de error en la localización ocurre en caso de deslizamiento de las ruedas, donde el cálculo de la rotación de la rueda no se puede traducir proporcionalmente en un movimiento lineal.

Por último, existen otras fuentes de error asociadas a la odometría. Algunas fuentes de error resultantes pueden ser clasificadas en dos grupos: fuentes de error sistemáticas y no sistemáticas [1]. Las fuentes de error sistemáticas son las que resultan de las imperfecciones en la cinemática del robot, por ejemplo, la desigualdad de diámetros de las ruedas o el error en la medición de la distancia

entre ejes. Las fuentes de error no sistemáticas son las que resultan de la interacción del suelo con las ruedas, por ejemplo los golpes y grietas. A pesar de estas limitaciones, la mayoría de investigadores coinciden en que la odometría es un buen método para la localización de un robot móvil y que los resultados de la tarea de navegación serán más exactos si la precisión de la odometría se puede mejorar. En las referencias [4, 6, 7], se proponen diferentes métodos de fusión de datos con las mediciones odométricas de posición absoluta para obtener una estimación de la posición más fiable.

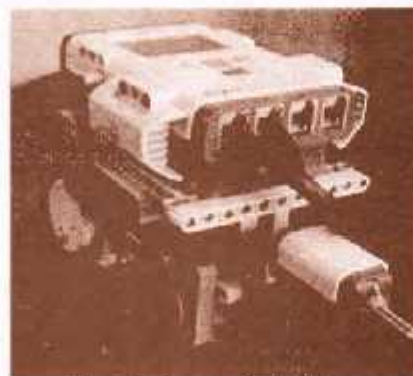
#### B. *Sistemas Basados en Referencias*

Un sistema basado en referencias consiste en un sistema fijo para la navegación que hace uso de un conjunto de sensores, los cuales proporcionan una medida absoluta de la posición del robot en un instante de tiempo dado [12]. Este tipo de sistemas tienen una acumulación de error mínima, lo que permiten que sean muy confiables. Un sistema basado en referencias por sí solo no tiene un valor agregado. Este se le brinda en el momento en que se integra con un método de navegación, donde se tenga que estimar la posición relativa del robot móvil haciendo uso de alguna técnica de fusión sensorial [17, 18]. Estas técnicas permiten integrar la información de la posición del robot obtenida de cada sensor para determinar la posición absoluta del robot. Algunas técnicas que valen la pena destacar, que hacen uso de la fusión sensorial son [2, 10]: la fusión Bayesiana, la fusión basada en la teoría de Dempster-Shafer y la fusión mediante filtros de Kalman.

### 3. CARACTERÍSTICAS DEL ROBOT MÓVIL PARA LA NAVEGACIÓN EN UN ENTORNO CON OBSTÁCULOS

El robot implementado en [10] se muestra en la figura 3. Este se caracterizaba por utilizar dos ruedas de tipo diferencial que implementan el

movimiento del robot en asocio, cada una, con un servo motor y una rueda tipo castor para mantener el balance del robot. Para detectar los obstáculos, se utilizaba un sensor de toque. Asimismo, se utilizaba un sensor ultrasónico para realizar el seguimiento del contorno de los obstáculos. Al aplicar el algoritmo Dist-Bug se asumía que el robot era un punto.



*Fig. 3. Robot empleado en [9]*

En [10] se identificaron tres fuentes principales de error asociadas a la localización del robot, que traían como resultados una diferencia entre la distancia real recorrida por el robot frente a la esperada teóricamente, al igual que un error en la posición final obtenida con el algoritmo de navegación empleado. La primera fuente de error era el uso del sensor de toque empleado para detectar los obstáculos, el cual generaba movimientos inesperados en el robot al chocar contra los obstáculos. Esto afectaba tanto la posición como la dirección en que se movía el robot. Adicionalmente, los giros del robot generaban errores de orientación como se describe en la sección 2. Por último, se detectó que cambios en las características de la superficie donde se realizaron las pruebas también afectaban los resultados.

Con el fin de mejorar la precisión de los resultados al aplicar el algoritmo Dist-Bug se modificó la arquitectura de este robot quitando el sensor de toque e incluyendo el uso de nuevos sensores. En la figura 4 se muestra la nueva arquitectura.

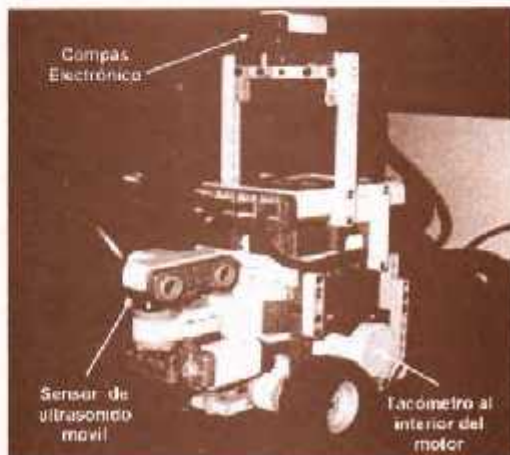


Fig. 4. La nueva arquitectura del robot móvil empleado

A continuación, se describen las características claves relacionadas con esta nueva arquitectura como son: los sensores utilizados, la geometría del robot considerada en los cálculos asociados al algoritmo Dist-Bug y como se realiza la localización del robot.

#### A. Sensores Utilizados

Una de las maneras para percibir el mundo y su entorno, es a través de sensores, estos son dispositivos capaces de detectar ciertas magnitudes físicas que se convierten en variables, las cuales, permiten obtener datos y procesarlos de acuerdo al interés que se tenga. En este caso, si se trata de una máquina o un robot, se tiene una variedad de sensores que permiten adquirir datos acerca de distancia, calor, velocidad, entre otros. En este trabajo es necesario conocer la distancia entre el robot móvil y el mundo exterior. También es necesario identificar si hay obstáculos en el espacio definido. Adicional a esto, se necesita conocer la posición y la dirección en donde se encuentra el robot móvil cuando se ejecuta el algoritmo de planificación Dist-Bug. Para satisfacer esto, en este trabajo se utilizaron tres tipos de sensores que pueden cumplir o satisfacer estas condiciones.

El primer sensor funciona a través de ultrasonido. Este dispositivo es capaz de detectar la proximidad de objetos, el cual emite impulsos ultrasonicos que se reflejan en un objeto,

recibiendo el eco producido y convirtiéndolo en una distancia. Las características técnicas que deben tenerse en cuenta en el momento de su aplicación pueden llevar a errores en la toma de datos y generar incertidumbre en los resultados. El segundo sensor es el compás electrónico. Este dispositivo utiliza el campo magnético que emite la tierra y puede convertirse en un sistema de referencia confiable. Sin embargo, este sensor puede generar incertidumbre, ya que si hay cerca un campo magnético diferente al del campo de la tierra, pudiendo arrojar datos incorrectos y generar errores en su medida [8]. Por último, el tacómetro es un sensor que a través de las revoluciones de las ruedas puede indicar cuánta distancia se ha desplazado el robot. Sin embargo, este es el sensor que más error genera en la medida, debido a que la rotación de la ruedas tiene un error acumulativo de forma creciente. Estos dos últimos sensores de manera combinada permiten corregir la localización del robot, con el fin de minimizar los errores encontrados en el modelo original referenciado en [9].

#### B. Modelado de la geometría del robot

Uno de los requisitos para estar dentro del espacio, es conocer la geometría y la forma que tienen los cuerpos para que exista un desplazamiento libre de colisiones. Esto se debe tener en cuenta, ya que el mundo real se encuentra lleno de objetos que pueden ser tratados como elementos geométricos. Así mismo, dentro de este contexto, se tiene que el robot móvil es un cuerpo que ocupa un espacio y tiene unas medidas específicas. Debido a esto, en este trabajo se modificó la consideración inicial tratada en [10] en la cual el robot era considerado un punto y se modeló el robot como una circunferencia, lo que permite tener en cuenta la geometría del robot cada vez que realice un giro o un desplazamiento con el fin de evitar la colisión del robot [16].

En la figura 5 se muestran las medidas asociadas a la geometría del robot implementado. Particularmente, se considera una circunferencia con un radio de 15 centímetros, la cual permite contener las medidas reales del robot implementado: 18 centímetros de largo y 14 centímetros de ancho.

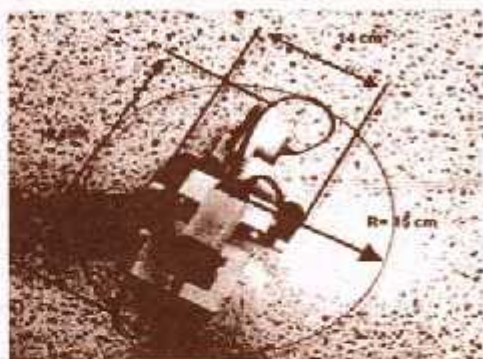


Fig. 5. Geometría empleada para modelar el robot móvil

### C. Método de localización para estimación de la posición

En este trabajo el método empleado para realizar la tarea de localización es la Odometría. Para calcular su desplazamiento y su rotación se emplea como modelo de referencia, el mostrado en la figura 6 y las siguientes ecuaciones:

$$\text{Desplazamiento lineal del robot en el sistema } R: \Delta s = \frac{\Delta s_r + \Delta s_l}{2} \quad (1)$$

$$\text{Desplazamiento del punto } P \text{ del robot en } X_f: \Delta x = \Delta s \cos(\theta + \Delta\theta) \quad (3)$$

$$\text{Desplazamiento del punto } P \text{ del del robot en } Y_f: \Delta y = \Delta s \sin(\theta + \Delta\theta) \quad (4)$$

Donde  $\Delta s_r$  es el desplazamiento lineal de la rueda derecha,  $\Delta s_l$  es el desplazamiento lineal de la rueda izquierda y  $b$  es la distancia entre las dos ruedas. El punto  $P$  es el punto de referencia del robot asociado al centro del eje de las dos ruedas diferenciales.

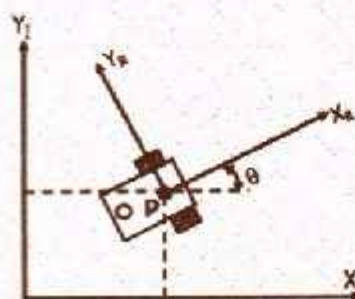


Fig. 6. Método de localización para estimación de posición.

Es importante señalar que en este trabajo se considera contrarrestar dos de los errores relacionados con la odometría, los cuales son: el error de orientación y el de desplazamiento por cambios en las características de la superficie en que se realizan las pruebas. Para esto se pretende utilizar la información obtenida por el compás electrónico y el tacómetro, haciendo uso de técnicas de fusión de datos para minimizar los errores en la localización del robot.

#### 4. DETALLES DE IMPLEMENTACIÓN DEL ROBOT Y DEL ENTORNO EXPERIMENTAL

La arquitectura del robot móvil de este trabajo contiene dos servomotores asociados a las ruedas de tipo diferencial que posee (en un mismo eje). La distancia entre el centro de cada rueda es de 10.5 cm y el diámetro de cada una de las ruedas es de 4.33 cm.

El área de trabajo que se implementó es un cuadrado de 2 m de lado. Este tiene dos obstáculos como parte del entorno el cual se puede observar en la figura 7.

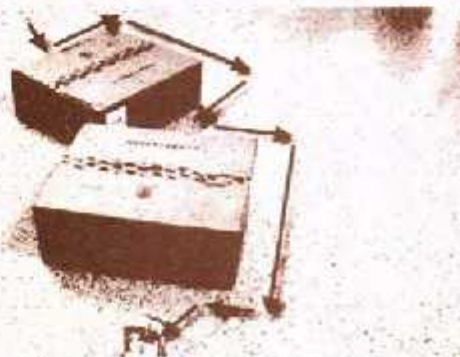


Fig. 7. Área de trabajo en mundo real con obstáculos para DistBug

Para realizar la navegación, el robot debe obtener los valores provenientes de los sensores. Para el tacómetro, debe obtener el valor de distancia y la dirección recorrida en un intervalo de tiempo. En el caso del compás electrónico, debe obtener la dirección absoluta hacia donde se desplaza el robot móvil. Por último, debe verificar con el sensor de ultrasonido si hay obstáculo para generar nuevos datos de la percepción.

##### A. Modelo para la estimación de la posición relativa y la posición absoluta del robot móvil.

En esta etapa se ejecuta el algoritmo Dist-Bug, mediante modelos geométricos claros que permitan seguir el comportamiento de este algoritmo. A su vez, se generan los puntos de localización obtenidos mediante los sensores que perciben el mundo generando datos. Cada método de localización, tanto la odometría (haciendo uso del tacómetro), como el sistema basado por referencia (haciendo uso del compás electrónico), se fusionan para obtener datos más confiables que permiten generar los puntos de localización, por medio de funciones programadas. En este proceso se hacen comparaciones entre direcciones y distancias recorridas, haciendo las respectivas correcciones para minimizar el error.

Después de realizar este tipo de funciones y obtener una localización corregida del robot móvil, el algoritmo Dist-Bug hace uso de estos datos para crear una nueva ruta para cumplir con su objetivo, que es desplazarse desde un punto inicial a un punto final, evitando los obstáculos existentes en el entorno.

##### B. Ejecutor del robot móvil.

En esta etapa se ejecutan los comandos bajo el ambiente Java-Lejos que coordinan los movimientos del robot móvil, permitiendo que se realicen las distancias y los ángulos de giro que admiten cumplir con la tarea que tenía el algoritmo Dist-Bug.

La programación se realizó en JAVA y java Lejos [15], lenguaje con el cual se programa la serie de robots lego MINDSTORM NXT 2.0 [14].

Inicialmente se ingresan los datos de usuario, como son los puntos inicial y final de la ruta que debe seguir el robot móvil. Para el modelo de posición relativa se utilizan diferentes métodos matemáticos y geométricos, que permiten cumplir con la lógica del algoritmo Dist-Bug y el cálculo de las coordenadas asociadas a su localización. En este modelo se deben calcular estas coordenadas a partir de los datos adquiridos por el robot móvil, haciendo uso de sus sensores para que el algoritmo Dist-Bug pueda tomar una decisión de cuál es la distancia más corta y así, generar la nueva trayectoria hacia la meta en términos de sus coordenadas.

Luego del cálculo de esta nueva trayectoria, se realiza una traducción de la misma en términos de ángulos y distancias, que son parámetros que interpreta el ejecutor sobre el robot móvil. Se hace uso de la librería *lejosrobotics.navigation* [16] que le permite al robot móvil girar los ángulos indicados o la distancia a recorrer (en centímetros).

## 5. EXPERIMENTOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se desarrolló una aplicación con el fin de evaluar el comportamiento y la incertidumbre al utilizar el algoritmo Dist-Bug en el nuevo robot móvil, utilizando de manera combinada los métodos de localización propuestos en este trabajo. El robot móvil en la superficie real 2D tiene un punto inicial *S* localizado en la coordenada (0,0) y un punto final localizado en la coordenada (200, 200).

Antes de realizar los experimentos, se realizaron dos actividades claves. La primera consistió en calcular la ruta ideal haciendo uso del algoritmo de navegación Dist-Bug. Esta ruta se trazó en la superficie utilizada para el experimento. La segunda actividad consistió en adicionarle al

robot móvil desarrollado, un marcador que permitía trazar sobre la superficie la ruta seguida por él. Luego de esto, se realizaron tres experimentos.

El primer experimento, consistió en ejecutar la aplicación desarrollada que implementa en el robot móvil el algoritmo Dist-Bug, con el fin de realizar el cálculo y la ejecución de la ruta ideal en el robot. Para esto, se utilizó la localización calculada a partir de la información proveniente de los tacómetros ubicados en los motores del robot durante dicha ejecución. Con la ruta real obtenida en la superficie del experimento mediante el uso del marcador, se realizó el cálculo del error en diferentes puntos de esta nueva ruta, frente a la ruta ideal trazada previamente. Los resultados de este primer experimento arrojaron un error promedio de 6.25 cm.

El segundo experimento, consistió en ejecutar nuevamente el algoritmo Dist-Bug en el robot de manera modificada para realizar el cálculo y la ejecución de la ruta ideal en el robot, teniendo en cuenta esta vez, la información del tacómetro de los motores y el compás electrónico para realizar el cálculo de la localización del robot durante dicha ejecución. Los resultados de este segundo experimento arrojaron un error promedio de 2.75 cm.

Los resultados de estos experimentos se resumen en la figura 8, donde se puede observar las diferentes rutas obtenidas en ambos experimentos, en comparación con la ruta ideal obtenida.



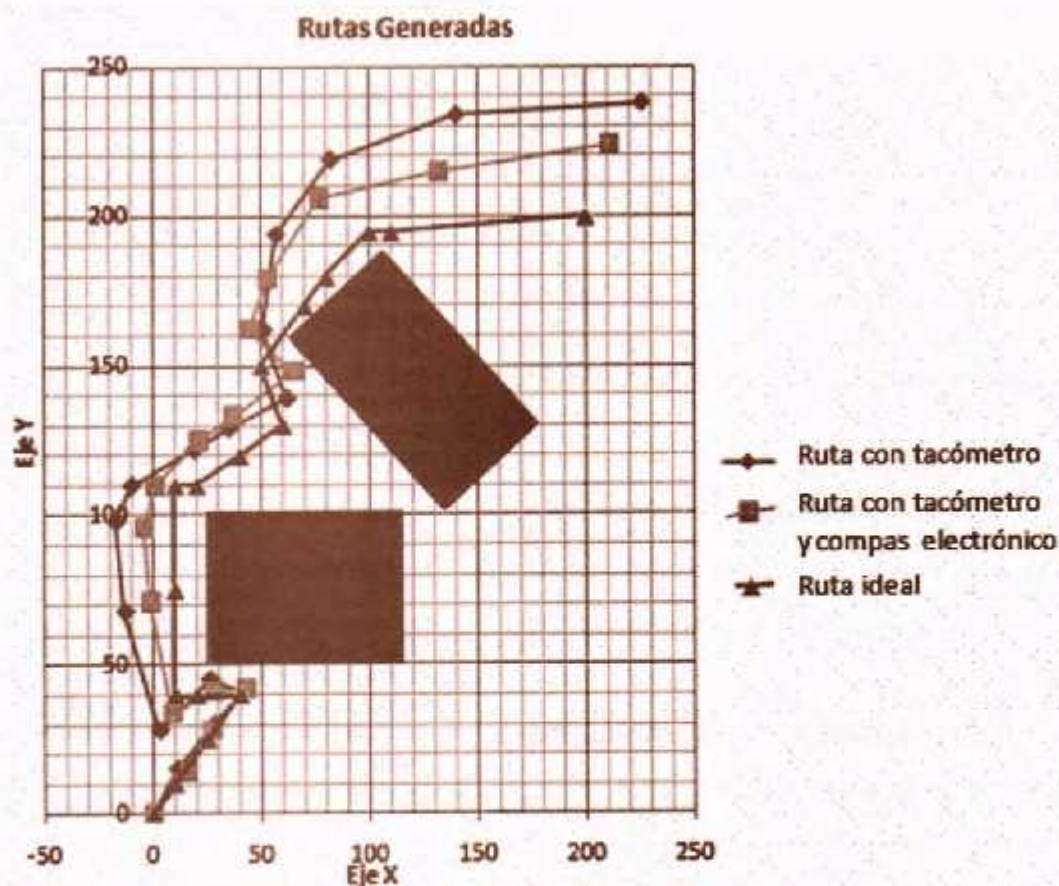


Fig. 8. Rutas generadas por Dist-Bug en los experimentos

Los resultados que se detallan en la figura 8, permiten observar que para la ruta obtenida con solo el tacómetro, se obtiene una gran diferencia en relación con los puntos obtenidos en la ruta ideal. Esto demuestra la existencia de factores que causan incertidumbre en la localización y por consiguiente en la navegación del robot. También se observa que la ruta que hace uso combinado del tacómetro y el compás electrónico, permite generar menos error que la anterior. Esto permite concluir que es necesario integrar métodos de localización, que hagan uso de diversos sensores orientados a determinar la posición del robot en un instante dado, con el fin de disminuir errores frente al cálculo ideal para la estimación de la posición.

Particularmente, se puede observar que en ambos casos (la ruta con solo tacómetro y la ruta combinada con tacómetro y compás), una de las principales causas de error, ocurre en los cambios de dirección del robot. En ambas rutas este error ocasiona diferencias frente a la dirección correspondiente en la ruta ideal del robot [8].

El tercer experimento que se realizó, consistió en tomar la medición de los errores asociados a los ángulos de giro en cada una de las rutas trazadas en los dos experimentos anteriores. Los resultados de este experimento se relacionan en la figura 9. El eje X representa cada uno de los vértices que compone las rutas y el eje Y representa en grados el error presentado al girar el robot en dicho vértice. En esta figura, se puede

observar que la orientación durante el desplazamiento presenta más errores en el caso en que sólo se utiliza el tacómetro (línea  $\epsilon_0$ ), que en el caso en que se utiliza de manera combinada el tacómetro y el compás electrónico (línea  $\epsilon_{0,c}$ ) para determinar la localización del robot. En esta figura, se observa cómo a lo largo de los diferentes ángulos de giro asociados a la ruta ideal, los ángulos realizados en la ruta con sólo el tacómetro, presentan una mayor dimensión del error frente a la ruta que combina el tacómetro y el compás.

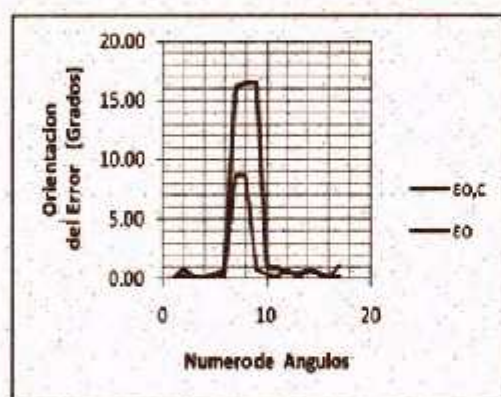


Fig. 9. Error en la orientación durante la generación de rutas

## 6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo, se identificaron dos métodos para la estimación de la posición de un robot durante su navegación, la odometría y los sistemas basados en referencias, los cuales pueden ser utilizados para mejorar los resultados al aplicar el algoritmo Dist-Bug.

Asociado a los métodos de estimación, en este trabajo se identificaron varias fuentes de error que afectan una adecuada estimación de la localización del robot, entre los que sobresalen las imperfecciones en la cinemática del robot y en la interacción del suelo con las ruedas. De lo anterior, se deduce que es necesaria la inclusión

de nuevos sensores para tener otros sistemas de referencia, que puedan disminuir la incertidumbre o el error en la ubicación del robot móvil en el espacio.

Con el fin de atacar los errores asociados a la localización durante la aplicación del algoritmo Dist-Bug, en este trabajo se realizaron dos experimentos donde se identificó que al integrar la odometría que hace uso de un tacómetro y un sistema basado en referencias, que hace uso de un compás electrónico, permite disminuir el error en la localización de un robot móvil y por consiguiente mejora la precisión del algoritmo Dist-Bug, que se utiliza en este trabajo para la navegación del robot.

Como trabajo futuro, se pretende enfocar los esfuerzos a elaborar un estudio más detallado de las variables que afectan el robot en su desplazamiento, teniendo en cuenta que estas variables son errores a los cuales se les debe brindar una solución propia de cada problema, para optimizar la ruta de navegación generada.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Alpaslan YUFKA and Osman PARLAKTUNA, Performance comparison of bug algorithms for mobile robots.
- [2] Bloch I. Information combination operators for data fusion: A comparative review with classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 26(1):52-67, 1996.
- [3] Borenstein, J. and Feng L., 1995a. 'Correction of Systematic Dead-reckoning Errors in Mobile Robots.' Proceedings of the 1995 International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '95), Pittsburgh, Pennsylvania, August 5-9, 1995, pp. 569-574.
- [4] Borenstein, J., Everett, B., and Feng, L., 1996a, "Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques." A. K. Peters, Ltd., Wellesley, MA, ISBN 1-56881-058-X.
- [5] Borenstein, J. and Feng, L., 1995, "UMBmark: A Benchmark Test for Measuring Dead-reckoning Errors in Mobile Robots." 1995 SPIE Conference on Mobile Robots, Philadelphia, October 22-26.

- [6] Byrne, R.H., 1993, "Global Positioning System Receiver Evaluation Results." Sandia Report SAND93-0827, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Sept.
- [7] Byrne, R.H., Klarer, P.R., and Pletta, J.B., 1992, "Techniques for Autonomous Navigation." Sandia Report SAND92-0457, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, March.
- [8] Chenavier, F. and Crowley, J., 1992, "Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry." Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, May 12-14, pp. 2588-2593.
- [9] Cox, I.J., 1991, "Blanche - An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Mobile Robot." IEEE Transactions Robotics and Automation, 7(3), pp. 193-204
- [10] D. Márquez, J. Guzmán, Torres Ingrid-Durley, "Planificación de movimiento de un robot lego basada en la aplicación del algoritmo Dist-Bug", Revista Avances en Sistemas e Informática, pp. 205-210. Medellín, Vol. 8 No. 2 Julio de 2011.
- [11] Everett, H.R., 1993, "Sensors for Mobile Robots," A K Peters, Ltd., Wellesley, MA.
- [12] J. Lumelsky, V.J., Stepanov, Dynamic path planning for a mobile automaton with limited information on the environment, IEEE Trans. Automat. Contr. 31, 1058-1063, 1986.
- [13] Kamon, I. Rivlin, E., Sensory-based motion planning with global proofs, IEEE Trans. Robot. Autom. 13, 814-822, 1997.
- [14] LEGO.com MINDSTORMS: Products - NXT 2.0 - 8547 [Online]. Disponible: <http://mindstorms.lego.com/en-us/products/default.aspx>
- [15] Lejos, Java for Lego Mindstorms [Online]. Disponible: <http://lejos.sourceforge.net/>.
- [16] M. Ghallab, D. Nau, P. Traverso, Automated Planning, theory and practice. San Francisco: Morgan Kaufman 2004, pp. 1-3.
- [17] Ng James and T. Braunl, Performance Comparison of Bug Navigation Algorithms, J Intell Robot Syst, Springer Science 50:73-84 DOI 10.1007/s10846-007-9157-6, 2007.
- [18] S. P. Bingulac, "On the compatibility of adaptive controllers (Published Conference Proceedings style)," in Proc. 4th Annu. Allerton Conf. Circuits and Systems Theory York, 1994, pp. 8-16.
- [19] Siegwart, R. Illah Nourbakhsh, 2004, "introduction to autonomous mobile robots", Massachusetts Institute of technology, Boston.
- [20] V. Lumelsky and Stepanov, Path-planning strategies for a point mobile automaton amidst unknown obstacles of arbitrary shape, in Autonomous Robots Vehicles, I.J. Cox, G.T. Willfong (Eds), New York, Springer, pp. 1058 - 1068, 1990.