

Desarrollo de Sistema de Orientación para Plataforma Robótica Móvil

Emilio Nicolas D'Olivo¹, Marcos Martin Privitera²

¹ Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional San Francisco), Av.
De la Universidad 501

emilio.dolivo@frsfco.utn.edu.ar

² Universidad Tecnológica Nacional (Facultad Regional San Francisco), Av.
De la Universidad 501

marcosprivitera@live.com.ar

Resumen. La propuesta de esta investigación está basada en la implementación de un sistema de orientación geográfica para plataformas robóticas móviles, donde la variable del proceso es la posición angular del robot con respecto al norte geográfico de la tierra. La tarea que este robot debe desempeñar, es la de seguir una coordenada establecida sin ser desviado por perturbaciones¹ externas. Para tal fin, se utilizó una brújula magnética como parte del lazo de realimentación de un control PID recursivo. Esto permite obtener mejores tiempos de respuesta. Es indispensable destacar que se utilizó el MATLAB con la placa de adquisición de datos (usb 6008 de National) para la obtención y validación de los modelos de la planta.

Palabras claves: robot móvil, compas magnético, ident, matlab, motores DC.

Introducción

Los sistemas convencionales de robots móviles utilizan diversas técnicas [1] para obtener la orientación y posición de un robot, se destacan: *la odometría*, basada en ruedas de medida y modelos de contacto, como por ejemplo los encoders y potenciómetros lineales; los *sensores inerciales*, como acelerómetros y giróscopos, estos sistemas estiman la posición y la orientación del robot empleando medidas de las aceleraciones y ángulos de orientación; el *posicionamiento absoluto* basado en *marcas o balizas*, necesita de varios elementos externos de referencia para poder brindar una coordenada aceptable y la posición no se calcula a partir del análisis del entorno, sino a partir del principio de triangulación; sistemas *radiogoniométricos* y

¹*Perturbaciones*: Son señales que afectan el comportamiento del sistema pero que no pueden ser controladas.

GPS, basado en el sistema de posicionamiento global de navegación por satélite. Todos estos métodos requieren conocer tanto los requerimientos del robot móvil como las propiedades del entorno.

Factores como el costo, el tamaño, la complejidad del hardware y la complejidad del software, entre otros, hacen que no todas las plataformas robóticas cuenten con un sistema de localización que les permita, a los investigadores, estudiar y validar, en un entorno real, los algoritmos de control de trayectoria.

La navegación en un robot móvil implica su interacción con el entorno y, en general, está ligada al cumplimiento de una serie de objetivos que le exigen conocer e interactuar con elementos no previstos. En esta investigación no se tiene en cuenta el entorno al cual se enfrenta el robot, más bien la “misión” del mismo es respetar una coordenada geográfica y que no se desvíe de su rumbo.

En la gran mayoría de aplicaciones se requiere contar con autonomía y libertad de movimientos. La *autonomía* de un robot móvil esta, ligada a su capacidad de navegación automática, lo cual incluye aspectos como la planificación, percepción y control. Para lograr cada uno de estos aspectos, es necesario conocer la localización de los robots, su cinemática, su capacidad de maniobrar y definir una técnica de posicionamiento.

Algunos aspectos de los cálculos realizados en el robot

Algo para tener en cuenta, es el cálculo de la cinemática del robot, la cual es necesaria para poder desarrollar el PID. En principio hay tres caminos para encontrar la cinemática [2] y dos emplean mínimos cuadrados.

El primero es considerar al robot como un sistema de segundo orden, como si fuera el modelo de un motor de dc. Este se usa cuando el robot es liviano, pequeño o la relación en la caja reductora de los motores filtra los efectos de la masa de la estructura. Básicamente la inercia total es la inercia de los motores. Este método anda bien cuando se necesita estimar de forma aproximada la inercia, por ejemplo para aproximar los parámetros PID. Este es el método que se utilizó en este trabajo.

El segundo es considerar un modelo matemático de parámetros conocidos (modelo dinámico). Este se utiliza en tareas que requieren alta velocidad y/o transporte de cargas pesadas.

El tercero es considerar un sistema de segundo orden como en el caso 1, pero ahora estimar los parámetros de la respuesta temporal a una entrada escalón (ω_n y coeficiente de amortiguamiento) asociando estos parámetros al modelo de segundo orden del motor y calculando la inercia.

Sistema de locomoción [3]

Los robots móviles emplean diferentes tipos de locomoción mediante ruedas que le confieren características y propiedades diferentes respecto a la eficiencia energética, dimensiones, cargas útiles y maniobrabilidad. La mayor maniobrabilidad se consigue en vehículos omnidireccionales. Un vehículo omnidireccional en el plano es capaz de trasladarse simultánea e independientemente en cada eje del sistema de coordenadas, y rotar según el eje perpendicular. A continuación se comentan brevemente las características más significativas de los sistemas de locomoción.

Ackerman: Es utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales. Fácil de implementar. Restricciones no *holonómas*².

Triciclo clásico: La rueda delantera sirve tanto para la tracción como para el direccionamiento. El eje trasero, con dos ruedas laterales, es pasivo y sus ruedas se mueven libremente. La maniobrabilidad es mayor, pero puede presentar problemas de estabilidad.

Direccionamiento diferencial: El direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales.

Pistas de deslizamiento u oruga: La impulsión como el direccionamiento se consigue mediante orugas. Las orugas actúan de forma análoga a ruedas de gran diámetro. La locomoción mediante orugas es útil en navegación o en terrenos irregulares.

Descripción del sistema

El robot “Viroch” es una plataforma móvil con tracción por orugas, las cuales se encuentran acopladas a dos motores DC. Una de las técnicas más utilizadas para el control de los motores de DC es la modulación por ancho de pulso (PWM), que consiste en enviar pulsos de frecuencia constante, variando su ciclo de actividad.

El robot se comanda por medio de un control remoto, este dispositivo es el encargado de generar una interfaz entre usuario y el robot, y es quien setea el ángulo a seguir.

El compas magnético es el encargado de censar el ángulo que se forma entre el robot y el norte geográfico de la tierra. Este componente es la realimentación del sistema con el cual se realizan los cálculos del error.

Finalmente, el controlador PID se implementa digitalmente mediante la utilización de un microcontrolador PIC16F887. El mismo se encarga de digitalizar la señal del compas magnético, calcular el error, y generar una señal de control para los motores.

A continuación, en la figura [1] se muestra el diagrama en bloques que describe el funcionamiento del sistema y las señales que intervienen en cada tramo.

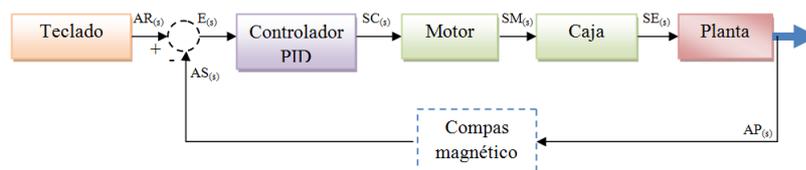


FIGURA. 1 Diagrama del control.

Ángulo de referencia $AR(s)$
 Ángulo del sensor $AS(s)$
 Error del sistema $E(s)$
 Señal del controlador $SC(s)$

El sistema de control pertenece a los denominados servosistemas. En su significado más amplio, el servosistema corresponde a un sistema de mando y control automático basado en la anulación de las desviaciones que existan entre el valor instantáneo de la magnitud a regular y el valor prescrito para la misma.

²No *holonómas*: moverse instantáneamente adelante o atrás pero no lateralmente por el deslizamiento de las ruedas.

Un caso particular de los servosistemas son los controladores o reguladores; en ellos la respuesta o señal de salida tiende fundamentalmente a contrarrestar las perturbaciones que afectan a la variable o magnitud de entrada. Este es el caso del controlador, donde la magnitud de entrada se fija en un valor constante (que es el valor de referencia o punto de consigna) o en un valor variable con el tiempo según una ley programada (se trata entonces de controladores programables).

Este sistema de control es retroalimentado ya que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y alguna entrada de referencia, comparándolas y utilizando la diferencia como medio de control. Midiendo el ángulo que se forma entre el sistema y el norte geográfico de la tierra, y comparándolo con el ingresado por teclado. Se utiliza el motor como actuador para llevar al robot a la posición deseada.

Como se puede observar en la figura [2], es un sistema realimentado el cual responde a la relación de bloques, obtenido de aplicar el álgebra de diagramas:

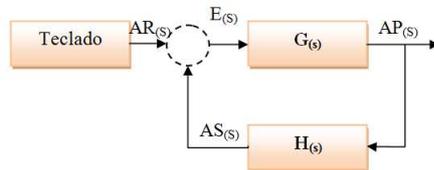


FIGURA. 2 Diagrama de control reducido.

Cabe aclarar que $G(s)$ es el producto de las funciones de transferencia del controlador PID, el motor, el tren de engranajes y la planta, mientras que $H(s)$ es la del componente que realiza la realimentación, el compas magnético. A continuación se muestra la ecuación simplificada de transferencia que describe al sistema.

$$\frac{AP(s)}{AR(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)}$$

Función de transferencia de los bloques

Cada bloque del diagrama mostrado en la figura 1 posee su modelo matemático que describe las características de funcionamiento, las cuales corresponden a cada componente. Se expresa con la Función de Transferencia en el plano complejo para poder realizar todo el análisis necesario.

Controlador PID

Un controlador automático compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (valor deseado), determina el error, y produce una señal de control que reducirá el error a cero o a un valor muy pequeño. La forma como el controlador automático produce la señal de control, se denomina acción de control.

Un controlador Proporcional-Integral-Derivativo tiene la siguiente forma:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{\partial e(t)}{\partial t}$$

Donde:

- KP = Ganancia Proporcional
- KI = Ganancia Integral
- KD = Ganancia Derivativa

La variable (e) representa el error de seguimiento, que es la diferencia entre el valor deseado de entrada (AR) y la salida real (AP). Esta señal de error (e) será enviada al controlador PID, y éste calculará tanto la derivada cuanto la integral de esta señal de error. La señal (u) recién salida del controlador es ahora igual a la ganancia proporcional (KP) veces la magnitud del error, más la ganancia integral (KI) veces la integral del error, más la ganancia derivativa (KD) veces la derivada del error. La función de transferencia del controlador PID es:

$$k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_d s^2 + k_p s + k_i}{s}$$

Motor de Corriente Continua-caja reductora

El motor de DC es un actuador común en sistemas de control. Provee movimiento rotatorio directamente y, acoplado con ruedas dentadas, poleas o cables, puede proveer movimiento transicional. El circuito eléctrico de la armadura y el diagrama de cuerpo libre del rotor se muestran en la Figura [3].

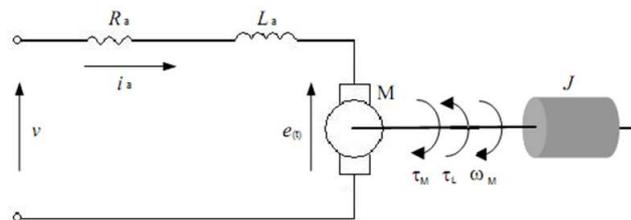


FIGURA. 3 Diagrama del cuerpo libre.

Considerando que nuestro motor tiene un eje rígido, por medio de sus ecuaciones eléctricas y mecánicas, al relacionarlas, podemos obtener el modelo del motor en el cuál la entrada es el voltaje aplicado y la salida es la velocidad rotacional del eje, para esto es necesario conocer los diferentes parámetros de los que está compuesto nuestro motor. Ellos son: Momento de inercia del rotor (J), Coeficiente de amortiguamiento del sistema mecánico (b), Constante de fuerza electromotriz (K=Ke=Kt), Resistencia

eléctrica (R), Inductancia eléctrica (L), Fuente de tensión (V), Posición del eje (θ), El rotor y eje se consideran rígidos.

La siguiente ecuación muestra la función de transferencia de la velocidad del motor respecto al ángulo generado, que se obtuvo aplicando las leyes de Newton y de Kirchhoff al diagrama del cuerpo libre del motor.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{K}{s[(J.s + b)(L.s + R) + K^2]}$$

Obtenido el modelo matemático del motor podemos diseñar nuestro controlador PID para nuestro sistema, pero para esto es necesario conocer el valor de los parámetros J, K, b, R, L del sistema, los cuales desconocemos.

La solución que proponemos para la obtención de los parámetros del sistema, consiste en acoplar los ejes de dos motores con similares características. Uno actuaría como motor y el otro como generador. Esto se realizaría con el fin de obtener por medio de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) y Matlab, dos señales que serían el voltaje aplicado al motor “uno” y el voltaje generado por el motor “dos”, y por medio de la toolbox de Matlab, **ident**, relacionar estas dos señales para obtener un modelo matemático aproximado al del motor y de esa forma poder calcular las constantes.

Adquisición de las señales de entrada y salida

Para la adquisición de los voltajes de excitación y generados, se usó según el criterio de estabilidad de Nyquist, una frecuencia de muestreo de 2000Hz debido a que el sistema trabaja con frecuencias bajas. También se definió un tiempo de adquisición de 10 segundos suficientes para poder observar el comportamiento del sistema. Durante el tiempo de adquisición, el voltaje de entrada o de excitación del motor se varió de forma aleatoria en un rango entre 0V y 10V. Debido a que los datos adquiridos presentaban alteración por ruido con una frecuencia aproximadamente de 30Hz, se implementó un filtro Butterworth pasa bajos de orden 10 y frecuencia de corte de 60 Hz con el fin de eliminar este ruido y así poder apreciar las señales originales.

En las siguientes figuras se muestra una rampa de tensión, donde se distingue la eliminación del ruido al aplicar el filtro.

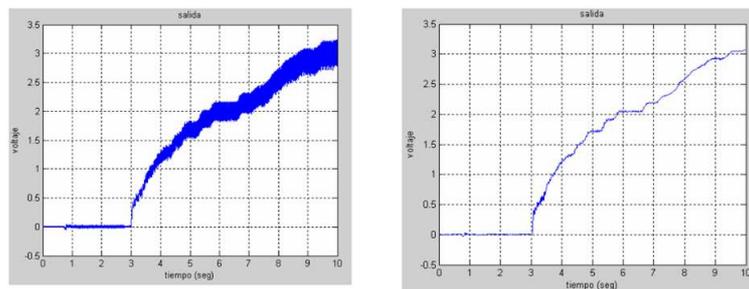


FIGURA. 4 Eliminación del ruido.

Durante el proceso de adquisición, se tomaron varias muestras de entrada y salida del sistema con el fin de implementarlas en la IDENT, y así obtener diferentes modelos para validarlos y hallar un modelo aproximado al real. A continuación se muestran solo algunas figuras, donde puede observarse la tensión aplicada y la generada respectivamente.

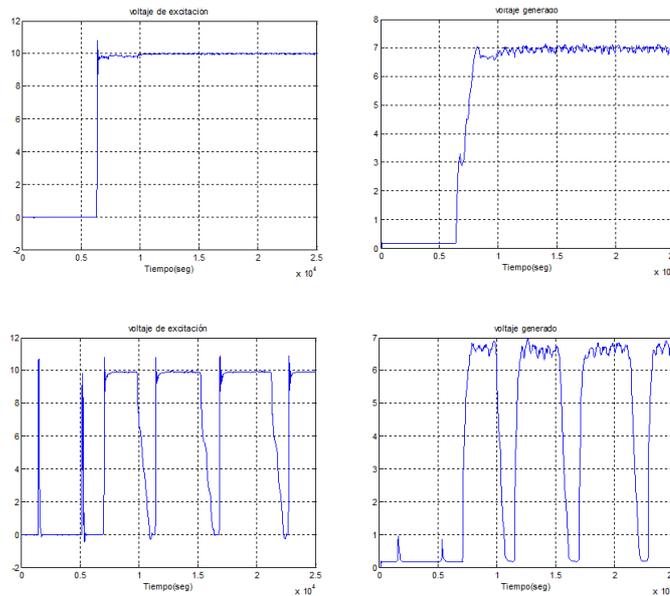


FIGURA. 5 Tensión aplicada y generada respectivamente.

Obtención y validación de los modelos mediante la IDENT de MATLAB

En muchas ocasiones no se puede obtener teóricamente (mediante un modelo matemático) la función de transferencia de una planta, debido a diversos factores. En estos casos podemos hacer una identificación del sistema a partir de mediciones hechas a la entrada de la planta y a la salida de la planta. Para este efecto, el programa Matlab tiene una herramienta de identificación de sistemas, IDENT. El modelo matemático de la planta se lo obtiene tanto por el planteamiento de sus ecuaciones descriptivas del sistema como por procesos de identificación experimental el cual se realizara en esta práctica. La selección y ajuste del controlador del sistema, se lo investiga utilizando herramientas proporcionadas por Matlab, como “Sisotool” con el que en una forma muy amigable, cumpliendo con las especificaciones dadas, se puede seleccionar el controlador adecuado. El software utilizado nos permite tanto la simulación como la operación real de la planta, de esta manera se puede comprobar los aspectos de la teoría con el funcionamiento verdadero del sistema.

En este caso se tomó un sistema con 2 polos reales $Tp1$, $Tp2$ y una ganancia K , este sería un sistema de segundo orden.

Para poder validar el sistema se obtuvieron 8 modelos de las diferentes señales adquiridas y se compararon las salidas de los modelos con cada una de las salidas

reales adquiridas, para observar el porcentaje de exactitud de cada salida con los diferentes modelos con la salida real.

En Figura [6] se muestra la aproximación de los diferentes modelos a una señal de referencia.

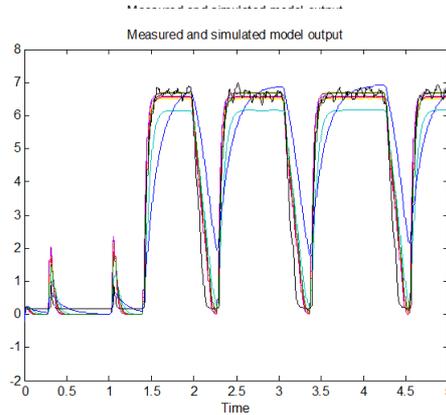


FIGURA. 6 Aproximación de los 8 modelos.

En la tabla [1] se puede observar el porcentaje de exactitud de la salida de cada modelo respecto a cada salida real.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6	Modelo 7	Modelo 8
Rea1	93,06%	80,21%	78,58%	75,82%	77,44%	77,61%	77,78%	77,38%
Rea2	82,11%	95,49%	94,41%	84,92%	93,49%	93,50%	93,56%	93,19%
Rea3	81,61%	94,48%	95,23%	87,81%	94,49%	96,86%	93,67%	94,91%
Rea4	74,44%	81,16%	83,48%	94,65%	80,85%	78,66%	77,98%	83,63%
Rea5	61,76%	85,73%	86,87%	79,23%	87,48%	87,40%	87,35%	87,32%
Rea6	58,65%	84,39%	85,53%	77,06%	86,36%	86,42%	86,41%	86,03%
Rea7	69,07%	88,46%	89,07%	81,29%	89,71%	89,89%	89,91%	89,24%
Rea8	51,95%	81,52%	83,42%	71,99%	83,63%	83,19%	83,10%	83,94%

TABLA. 1

De las gráficas anteriores así como en la tabla comparativa, observamos que el modelo más aproximado al real, es el tercer modelo, por lo tanto, este va a ser el modelo de nuestro motor.

Función de transferencia obtenida

El modelo aproximado obtenido en Matlab para los motores de DC fue el siguiente:

```

Process model with transfer function
      Kp
G(s) = -----
      (1+Tp1*s) (1+Tp2*s)

with  Kp = 0.66021
      Tp1 = 0.021863
      Tp2 = 0.021857

```

FIGURA. 7 Función de transferencia obtenida con Matlab

Pero este no es completamente el modelo a analizar debido a que este representa $K \cdot W(s) / V(s)$ y nuestro sistema debe representar $\Theta(s) / V(s)$. Para solucionar este problema, debemos agregarle un integrador al sistema multiplicándolo por $1/s$, para luego comparar el modelo obtenido en la Ident con el modelado, con el fin de obtener los parámetros de la planta y así identificar el modelo real.

$$G(s) = \frac{k}{(0.021863 s + 1) * (0.021857 s + 1)}$$

$$\frac{k^2}{J.L s^3 (J.R + b.L)s^2 + (b.R + k^2)} = \frac{0.6602}{0.0004779s^3 + 0.04372 s^2 + s}$$

Al comparar ambos sistemas se puede observar que:

$$\begin{aligned}
k^2 &= 0.6602 \\
J.L &= 0.0004779 \\
J.R + b.L &= 0.04372 \\
b.R + k^2 &= 1
\end{aligned}$$

Simplificando obtenemos la función de transferencia del motor.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{0.8125}{0.0004779s^3 + 0.04372 s^2 + s}$$

Compas magnético [4]

El módulo Hitachi HM55B es un sensor de campo magnético de dos coordenadas (X e Y) ideal para aplicaciones en donde se necesite visualizar o controlar la dirección, como por ejemplo un robot que siga el punto cardinal que se le ha designado como destino. Es capaz de detectar variaciones de microteslas en las componentes del campo magnético de la tierra. Es importante destacar, que la calibración del sensor se realiza por software, es decir que el sensor propiamente dicho no tiene incorporado ningún tipo de calibración. Las principales características son: sensibilidad del orden de los micros teslas (uT) en las variaciones de intensidad en el campo magnético, buena resolución de medida para 6-bit después de la calibración, solo tarda entre 30 y 40

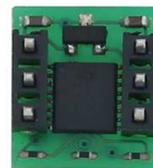


FIGURA. 8 Compas magnético.

ms para realizar la medición, la transmisión se realiza a través de una comunicación serie sincrónica.

Teoría de funcionamiento

El modulo HM55B tiene dos ejes, x e y. Cada eje devuelve el modulo de la componente intensidad del campo magnético paralelo a este. El valor de x es la componente del campo magnético de la tierra actuando en el eje x del sensor, que se obtiene con $N \cdot \cos \theta$. El valor de y es el negativo del campo magnético de la tierra actuando en el eje y, que se obtiene con $N \cdot \sin \theta$. Si N es el valor reportado por x o y cuando está alineado con el campo magnético de la tierra, entonces la medición x en cierto ángulo θ será $N \cos \theta$ y la medición y será $-N \sin \theta$. Con esto y un par de identidades trigonométricas se verá que θ es el arcotangente de $-y/x$, que es el ángulo de inclinación con la parte frontal del aparato y el Norte en sentido horario, a través de una escala de 0 a 360° donde el 0° representa al Norte Geográfico.

$$\tan \theta = \frac{-N \sin \theta}{N \cos \theta} = \frac{-y}{x}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{-y}{x}$$

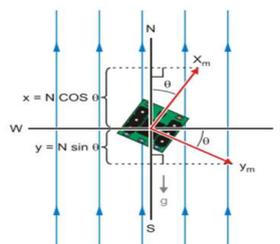


FIGURA. 9 Vectores resultantes.

Este modulo devuelve las mediciones de x e y en micro teslas (uT) en 11-bit con signo. El HM55B está diseñado para devolver un valor de 1 para un campo magnético del norte de 1uT paralelo a uno de los ejes. Si el dispositivo está orientado hacia el sur el valor deberá ser -1. De acuerdo a la hoja de datos del HM55B, el valor real de una medición de 1uT podría variar desde 1 hasta 1,6 (uT).

Para considerar su retardo de 30 ms asemejamos al compas a un circuito RC en donde su función de transferencia es:

$$\frac{AS(s)}{AP(s)} = \frac{1}{Ts + 1}$$

Haciendo un análisis dimensional vemos que la relación entre las variables $\frac{AS(s)}{AP(s)}$ es adimensional, y ya que T esta en segundos y s en seg-1 concluimos que las unidades en ambos miembros coinciden, por lo que estamos en condiciones de afirmar que la suposición anterior es correcta.

Función de Transferencia del Sistema

Con la combinación de cada bloque, (PID, motor, planta, compas magnético) se obtiene la FT del sistema completo.

La función de transferencia directa del sistema es:

$$G(s) = SC(s) * SM(s) * SE(s)$$

Donde:

$$SC(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s}$$

$$SM(s) * SE(s) = \frac{0.8125}{s^3(4.4779*10^{-4})+s^2(0.04372)+s}$$

Finalmente, la Función de Transferencia completa del sistema a lazo cerrado es:

$$\frac{AP(s)}{AR(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s) * H(s)}$$

$$\frac{AP(s)}{AR(s)} = \frac{s^3(0.0325) + s^2(1.365) + s(13.85) + 0.8125}{s^5(1.912e^{-5}) + s^4(2.227^{-3}) + s^3(0.08372) + s^2(1.813) + s(13.81) + 0.8125}$$

Simulación con Simulink

A continuación se muestra la simulación del sistema, al cual se le asignó un set_point de 90°. Puede observarse como el sistema se estabiliza en torno al valor deseado.

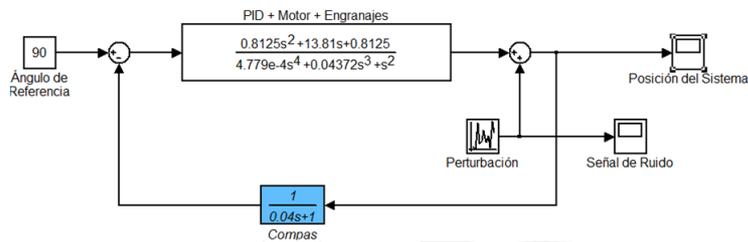


FIGURA. 10 Simulación en Simulink

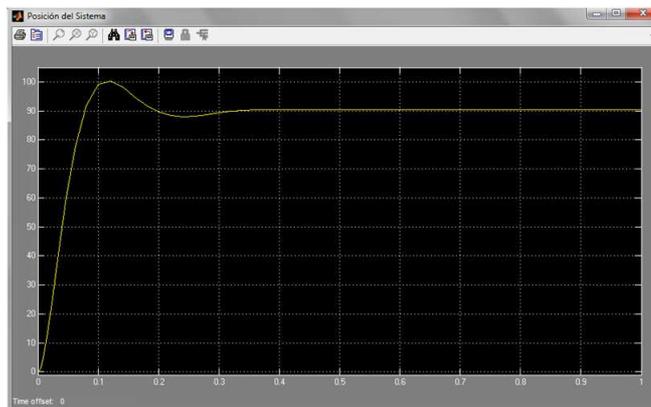


FIGURA. 11 Respuesta para un set_point de 90°.

En la siguiente figura se muestra un programa realizado con LabVIEW, el cual toma los datos provenientes del robot, los cuales representan la orientación que se tiene en un instante. Como puede apreciarse, el set_point en este caso fue de 270 °. Los picos que pueden verse son perturbaciones que se le aplicaron al robot, desviándolo de su posición, donde el mismo corrigió ese error retornando al valor deseado.

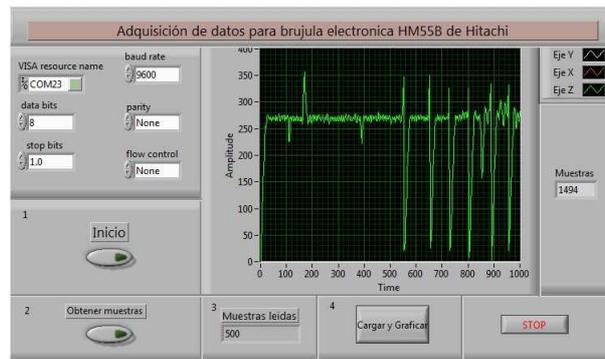


FIGURA. 12 Adquisición de datos desde el robot hacia la pc.

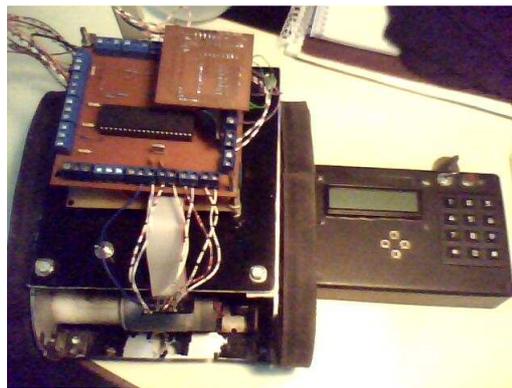


FIGURA. 13 Robot El Viroch y control remoto de comando.

Conclusión

El sistema de orientación implementado, mediante un compas magnético, constituye una alternativa de bajo costo y alto desempeño, para la implementación en pequeños robots móviles, el cual permite que el robot siga una coordenada específica, pero no tenga en cuenta los obstáculos presentes.

La utilización de un lazo PID recursivo, permitió mejorar los tiempos de respuesta y obtener resultados muy satisfactorios, los cuales dependen exclusivamente del tiempo de muestreo del compas y del error del mismo.

Por otro lado cabe añadir que la utilización de la herramienta MATLAB fue indispensable ya que permitió obtener las constantes necesarias para desarrollar las

ecuaciones del sistema, logrando así disminuir al mínimo los errores causados por las aproximaciones.

Se plantea como trabajo futuro, hacer que el robot pueda seguir la coordenada indicada pero, a su vez, esquivar los obstáculos que se le presenten en el recorrido.

Bibliografía

- [1] Luis Fernando Ortiz A.: Sistema de localización de bajo costo y alta prestación para una plataforma robótica móvil. Año XIV No 39, Septiembre de 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [2] Humberto Alejandro Secchi.: Una introducción a los Robots Móviles. 1er Premio Concurso AADECA. Monografía 2008. Edición Agosto 2008.
- [3] Aníbal Ollero Baturone.: Manipuladores y Robots Móviles. Marcombo, Ediciones Técnicas, 2007.
- [4] Hitachi® HM55B Compass Module (#29123), <http://www.parallax.com>
- [5] MATLAB - The Language Of Technical Computing, <http://www.mathworks.com/products/matlab>, fecha de consulta 29/03/2011.
- [6] National Semiconductor, <http://www.national.com>, fecha de consulta 29/03/2011.