

# APLICANDO LA TECNOLOGIA

## ROBOT MOVIL PARA MEDIR ESPESORES DE PARED FERROMAGNÉTICA POR ULTRASONIDO

Antonio Ramírez, Julio Solano, Emilio Vargas  
anrama2@hotmail.com, jsolano@cidesi.mx, emilio@cidesiqueretaro.com

### RESUMEN

Los sistemas robóticos han adquirido un lugar importante en los procesos de manufactura, tareas de inspección y diversas pruebas no destructivas para evaluar el grado de corrosión en materiales ferromagnéticos.

El robot que se describe en este trabajo fue diseñado para inspeccionar de forma automática tanques ferromagnéticos de grandes dimensiones, debido a que algunos de los problemas para determinar de forma manual el espesor mediante ultrasonidos son la cantidad de cientos de mediciones necesarias que hay que hacer sobre el tanque, el alto consumo de tiempo que requiere la inspección y el riesgo que representa esta tarea para las personas.

El robot desarrollado brinda una alternativa para hacer de forma sencilla, segura y eficiente este tipo de trabajo.

El propósito de estas mediciones es determinar las condiciones de corrosión en los tanques, a fin de tomar decisiones referentes al mantenimiento cuando sea necesario. En este artículo se presentan los resultados obtenidos en condiciones reales y de laboratorio en dos prototipos de robots.

### ABSTRACT

The robotics systems have acquired an important place in the manufacture processes, inspection and several tasks as non-destructive test to evaluate the corrosion degree on ferromagnetic materials.

The robot described in this paper was designed to inspect automatically big ferromagnetic tanks, because some of the problems to determine manually the thickness of big storage tanks by using ultrasonic technology are the need to take hundred of measurements in the tank, the high time consumption for the inspection, and the risk for the people that make this work.

The robot developed is an alternative to make easily this kind of work by useful and efficient manner.

The purpose of these measurements is to determine the corrosion condition in the tanks and then plan the maintenance service when is needed. In this paper are shown the results obtained in laboratory and real conditions in two robot prototypes.

### NOMENCLATURA

|       |                                   |
|-------|-----------------------------------|
| $\mu$ | Coefficiente de fricción          |
| R     | Radio de la rueda                 |
| $d_w$ | Diámetro primitivo del gusano     |
| N     | Número de revoluciones por minuto |
| $V_w$ | Velocidad lineal del gusano       |
| P     | Potencia                          |
| T     | Par de torsión                    |
| $W_g$ | Velocidad angular del engrane     |
| $W_w$ | Velocidad angular del gusano      |
| $N_w$ | Número de dientes del gusano      |
| $N_g$ | Número de dientes del engrane     |
| V     | Velocidad lineal                  |
| $V_g$ | Velocidad de deslizamiento        |

### INTRODUCCIÓN

Se sabe que existen más de 700,000 tanques de almacenamiento al exterior y más de 4.5 millones subterráneos, esto tan solo en los Estados Unidos. Muchos de estos tanques presentan fugas. Algo más importante, muchos de estos tanques presentan fugas sin que nadie sepa o tenga conocimiento de ello [2].

La medición de espesores de tanques de almacenamiento en el área de ensayos no destructivos

se realiza por lo general de manera manual, el inspector, que es la persona encargada de manejar los equipos de medición, debe tomar las lecturas a lo largo y ancho de los contenedores, efectuando mediciones a distancias relativas de 9" de acuerdo a la norma SA-435/SA435-M de la norma ASME[1]. De esta manera se construye una malla virtual que representa las condiciones de espesor en el tanque. El cumplimiento de estas normas hace que dicho trabajo resulte en extremo tedioso, con un alto costo asociado y un consumo de tiempo considerable.

La propuesta de automatizar las mediciones de espesores en los tanques por medio de un robot busca reducir el tiempo de inspección, asegurar las mediciones en las lecturas y eliminar el riesgo del inspector en las maniobras aéreas durante la medición convencional.

### DESARROLLO

Una de las primeras etapas del desarrollo del robot móvil, fue establecer las especificaciones de diseño y las consideraciones generales que se deberían satisfacer para asegurar la estabilidad y funcionalidad del robot al desplazarse en paredes ferromagnéticas

verticales. A continuación se describen brevemente las principales consideraciones de diseño:

- \* Escalar tanques de almacenamiento con alturas máximas de 30 m.
- \* Confiabilidad del 99% en la medición del espesor.
- \* El robot debe de permanecer estable durante la medición del espesor.
- \* Altura máxima del robot de 350 mm, anchura máxima de 250 mm x 250 mm.
- \* El robot ha de ser capaz de evadir los obstáculos en los tanques y atravesar cordones de soldadura.
- \* Capaz de operar autónomamente.
- \* Peso máximo del robot de 10 Kg.
- \* Velocidad máxima de desplazamiento 7 cm/seg.
- \* El desplazamiento del robot puede de ser dirigido desde tierra, mediante un sistema de control remoto.

Una vez analizadas diversas alternativas tecnológicas, y con base a las consideraciones de diseño se efectuaron pruebas funcionales en los siguientes aspectos:

- \* Tamaño del robot con base a la movilidad requerida y a la geometría que presentan los tanques.
- \* Tipo de sujeción del robot mediante imanes naturales, con capacidad suficiente para garantizar una buena adherencia en materiales ferromagnéticos con bajo contenido de carbón.
- \* Peso máximo del robot. Se tomó como criterio de decisión la fuerza de adherencia, y el deslizamiento en las ruedas.
- \* Tipos de geometrías por las que el robot es

- \* capaz de desplazarse.
- \* Sistema de control del robot eléctrico-electrónico.
- \* Determinación del número de ruedas del robot.

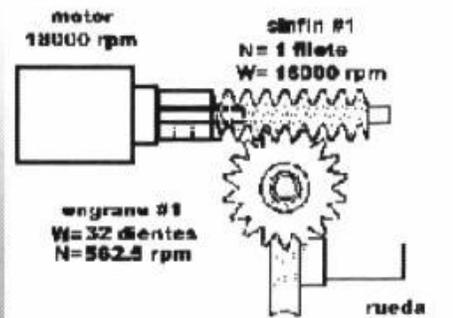
Se consideraron dos aspectos importantes para que el robot pueda realizar su desplazamiento por el tanque: fuerza de adhesión y resistencia al deslizamiento. La fuerza de adhesión se entiende como la fuerza que mantiene en contacto al robot con la pared vertical ferromagnética. Esta fuerza se consideró justo antes de desprenderse el robot de la superficie ferromagnética. La resistencia al deslizamiento se entiende como la fuerza que soporta el robot antes de deslizarse sobre la superficie ferromagnética a la que está adherido. En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques que ilustra la forma en que se diseñó y seleccionó el sistema de transmisión del robot.

Cálculo de velocidad de salida de ruedas.

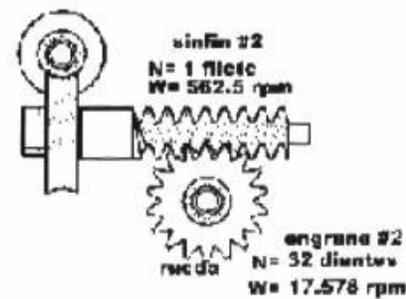
Velocidad rueda de acuerdo a especificación: 7 cm/seg

$$V = Nr \quad (1)$$

Despejando de esta ecuación, se obtuvo la velocidad angular de diseño con un radio de 3.75 cm:



n) Vista lateral



h) Vista frontal

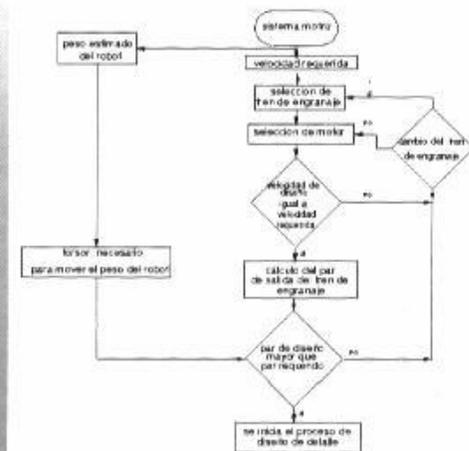


Figura 1. Diagrama de bloques para el diseño del sistema automotriz.

Figura 2. Tren de transmisión seleccionado

$$N = 17.825 \text{ [r.p.m.]} \quad (1)$$

Se verificó que esta velocidad cumple con las especificaciones de diseño, logrando una combinación de parámetros adecuada para la aplicación que se desea. En la figura 2 se muestra un esquema del tren de engranaje.

$$W_{w1} N_{w1} = W_{g1} N_{g1} \quad (2)$$

$$W_{w2} N_{w2} = W_{g2} N_{g2} \quad (3)$$

La velocidad angular del engrane #2 debe girar a la velocidad de la rueda; de acuerdo a los cálculos la relación de engranaje es correcta[4].

Cálculo del par de torsión necesario en la caja de transmisión. Para el diseño preliminar del robot se considera que debe tener 6 ruedas, por lo que el peso se distribuye sobre las 6 ruedas.

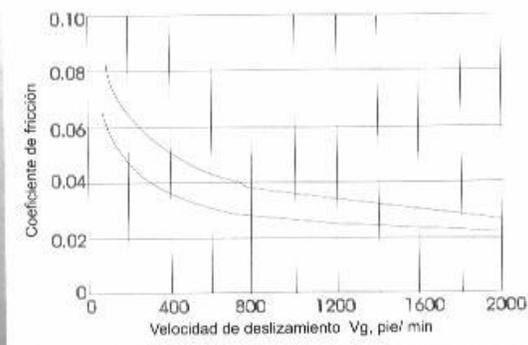


Figura 3. Coeficiente de fricción para el mecanismo de sinfín

El peso máximo calculado del robot = 10 Kg.

Peso máximo soportado por llanta = 1.666 Kg

Momento en la rueda = 6.2497 Kg cm

Sumando el par producido por el efecto del peso al considerar que el centro de gravedad del robot esta 2.4 cm arriba del eje de las ruedas, se tiene:

$$1.666 \text{ kg} \times 2.4 \text{ cm} = 3.984 \text{ kgcm}$$

Por lo que el par de torsión requerido = 6.2497 + 3.984 = 10.2337 kgcm

Por lo tanto el par de torsión mínimo que debe generar

el tren de engranaje debe ser mayor al que se necesita para mover la rueda. Para el cálculo del coeficiente de fricción se utiliza la figura 1.3, la cual proporciona valores de fricción representativos para aceros.

En la figura anterior se considera buena lubricación en el engrane y el sinfín. La curva B es para materiales de alta calidad. La curva A se emplea cuando es de esperarse mayor fricción[3]. Este tipo de tren de engranaje seleccionado proporciona un par de salida de 28.698 Kg-cm. Este valor resulta suficientemente seguro para garantizar el movimiento del robot, ya que el par total requerido es de 10.2337 Kg-cm. De esta forma se diseñó el tren de engranaje con un porcentaje de seguridad del 180 %.

Diseño del posicionador para el transductor del aparato de ultrasonido.

La función del mecanismo de posicionamiento del transductor es colocarlo en una posición perpendicular a la superficie del tanque para que realice correctamente la medición de espesor, se analizaron 2 opciones para realizar la medición de espesor: transductor por contacto y transductor inmerso.

Primera opción: El transductor debe tocar la superficie del tanque, como acoplante se puede utilizar agua, grasa o glicerina.

Segunda opción: inspección por inmersión, en la cual el transductor no toca la superficie de la pieza, pero la cavidad que contiene al transductor debe estar llena de acoplante para que pueda realizar la medición. Para este tipo de lectura el acoplante usado es el agua.

Según la norma SA-435/SA435-M de la ASME, para las mediciones se debe realizar con un mallado con una separación de 9". Como un problema para la medición utilizando la segunda alternativa es mantener el nivel del agua en la cavidad del transductor, se eligió la medición de espesores por contacto.

Elección del sistema de alimentación de líquido para transductor.

El acoplante seleccionado fue agua, la cual se coloca en un recipiente que se ubica en la parte inferior del robot. Para bombear el agua se utiliza una bomba impulsada por un motor de 12 V DC. El gasto de agua se controla mediante un Modulador de Ancho de Pulso (PWM), implementado en un microcontrolador tipo PIC16C74B, la cantidad necesaria para realizar una medición confiable es de 1.5 ml. Como alternativas de acoplante existen la glicerina y grasa, pero ambas presentan desventaja al utilizarlas. La grasa no se puede utilizar por el sistema de aplicación seleccionado debido al problema de su bombeo, la glicerina afecta severamente la resistencia al deslizamiento del robot.

SISTEMA DE CONTROL

La parte medular de la tarjeta de control del robot está formada por un par de microcontroladores de 8 bits de Microchip, los cuales contienen los programas de control de los subsistemas, así como la comunicación necesaria entre ellos para coordinar las operaciones del robot. Los microcontroladores empleados son los PIC16C74B/JW de Microchip, los cuales han sido seleccionados por las siguientes características:

- ♦ La gran cantidad de periféricos integrados en el chip, hacen que necesite muy pocos componentes externos. Este punto es vital debido a la falta de espacio que presenta el diseño.
- ♦ Alcanza una velocidad de procesamiento de hasta 200ns/instrucción.
- ♦ 3 temporizadores, 2 módulos de generación de PWM, y 8 convertidores A/D.
- ♦ 33 pines de entrada/salida y 12 fuentes de interrupción.
- ♦ Comunicación serial tipo SPI, I<sup>2</sup>C, USART para conectar a otros dispositivos tales como una memoria externa y para comunicación Rs232.

Un primer microcontrolador se encarga de procesar información de la interface hombre-máquina, y de los sensores de proximidad encargados de sensar obstáculos, además de tomar ciertas decisiones en cuanto a la maniobrabilidad de obstáculos. A este primer microcontrolador se le llama *maestro*. Un segundo  $\mu$ C está encargado de controlar la navegación del vehículo, es decir, los motores de tracción, así también del sistema de corrección de línea, que se explica en un apartado más adelante. A este  $\mu$ C se le llama *esclavo*. Para poder intercambiar información entre ambos circuitos, se han analizado las ventajas entre comunicación en serie o paralelo, siendo la segunda la opción escogida debido a la velocidad de procesamiento y de reacción que se requiere entre ambos microcontroladores. A continuación se muestra las tareas principales de ambos, en la tabla 1.1

Otro de los subsistemas incorporados en la tarjeta de control viene siendo el sensor de desplazamiento o *encoder*. Debido a las características únicas del sistema, no es posible conseguir un *encoder* comercial cuyo diámetro y características físicas puedan ser incorporadas al sistema mecánico, por lo que ha sido necesario implementar uno propio.

Cada *encoder* cuenta con 2 llaves ópticas que emplea para poder sensar la distancia recorrida, y su sentido de rotación. Dado que es conocido el diámetro de la rueda y

| Mi controlador maestro  | Mi controlador esclavo  |
|---|---|
| Lectura de interface hombre -máquina (control remoto)   | Lectura del sistema del sensor de inclinación (sistema de corrección de línea recta)      |
| Lectura de sensores de proximidad ultrasónicos<br>Control de motor en el sistema de medición  | Lectura del sistema de <i>encoders</i><br>Control de los motores de tracción del vehículo |
| Lectura de sensores de posición del motor en el sistema de medición                           | Lectura del selector <i>dipswitch</i> , con las opciones programables por el operario     |
| Control de motor suministro de acoplante  | Control del sistema de aviso sonoro (piezobuzzer)   |
| Control de la señal de grabación de dato para el sistema de medición (aparato de ultrasonido) | Control de la memoria serial EEPROM externa   |
| Comunicación serial RS232   |   |

Tabla 1.1 Tareas asignadas a los microcontroladores

la cantidad de orificios en ella, es posible obtener una relación mm recorridos por cada pulso leído. Para poder distinguir el sentido de la dirección del encoder, se emplea un flip-flop tipo D. La salida de cada llave óptica es un tren de pulsos, siendo tomado uno de ellos como el reloj y el otro como la entrada D. Las demás entradas del flip flop se configuran en modo *load* o de lectura.

Otro de los subsistemas de comunicación para la tarjeta de control es el de comunicación serial mediante el protocolo RS232. Con ayuda del circuito integrado MAX232 y un programa que siga el protocolo de comunicación serial, es posible comunicar la tarjeta de control con una computadora externa. En conjunto con la memoria serial es posible programar vía serial parámetros útiles para el robot, o subrutinas para éste.

El control de los motores se realiza con los módulos de PWM de los microcontroladores, los cuales tienen la característica de poder programar su ancho de pulso y frecuencia. Estas señales de PWM son reforzadas y

aisladas para poder ser empleadas por los drivers de los motores en la tarjeta de potencia. Generalmente, la respuesta en frecuencia de un optoacoplador con salida a optotransistor suele encontrarse por debajo de la frecuencia de PWM empleados para el control de motores, por lo que se optó por el uso de optoacopladores con salida a Schmitt Trigger con una mayor respuesta en frecuencia. En este caso el circuito integrado NTE3090 es ideal para esta aplicación, pues además de contar con tiempos de conmutación menores a 4s (por lo que el productor lo recomienda para control digital de motores y servomecanismos), se recomienda para la eliminación de ruido electromagnético. En la figura 4 se muestra un diagrama esquemático del sistema de control.

Con relación a la tarjeta de potencia, esta desempeña el papel de *driver* para los motores del robot, siendo controlado directamente por la tarjeta de control. La tarjeta de potencia maneja 8 diferentes motores, los cuales se encargan de la tracción del vehículo, el posicionamiento del transductor y la bomba de suministro de acoplante (en este caso, agua). Debido a que en el posicionamiento del transductor y el control de la tracción del vehículo es necesario cambiar el sentido del giro de los motores, se emplea un circuito de manejo de motores llamado puente H.

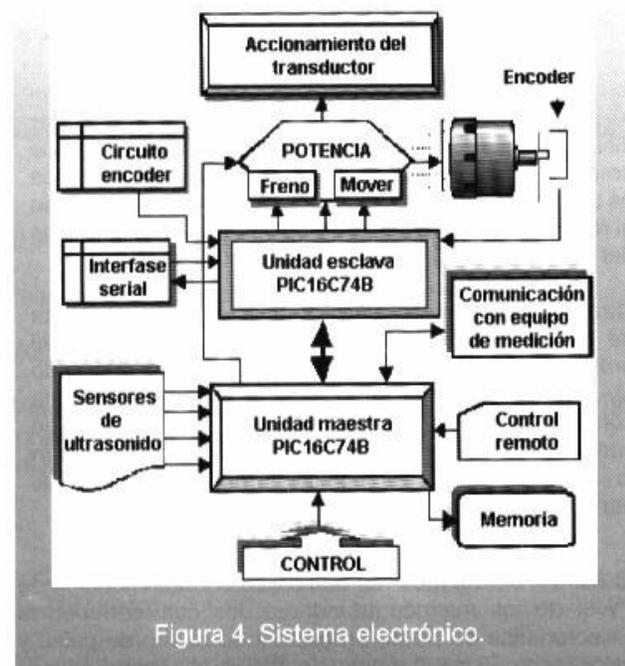


Figura 4. Sistema electrónico.

Este circuito consta de 4 transistores tipo MOSFET, los cuales alternan sus periodos de encendido y apagado para determinar el sentido del giro del motor. Este circuito puede ser encontrado en una versión en integrado, siendo utilizado el circuito LMD18200, el cual soporta una corriente de 3 Amperes hasta 60V. Este circuito integrado cuenta con las características de controlar motores mediante señales de onda de hasta una frecuencia de 1 MHz, determinar el sentido de rotación mediante una señal lógica aplicada al circuito, de contar con un freno controlado por un voltaje lógico, y de contar con un sistema de sensado corriente y autoapagado por sobrecalentamiento para evitar cortocircuitos y sobrecargas en los motores.

## RESULTADOS

Referente a las propiedades de adherencia y deslizamiento del robot de 4 ruedas, la fuerza de adhesión resultó ser de 16 Kg, y la fuerza de resistencia al deslizamiento fue de 12 Kg. A este prototipo se le instaló la parte electrónica en su plataforma trasera, esto con la finalidad de facilitar su control. Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Robótica del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). En la figura 5 se muestra el prototipo escalando un tanque real.

Los parámetros a evaluar fueron los siguientes:

- a) Adherencia de las ruedas al tanque.
- b) Resistencia al deslizamiento.
- c) Consumo de corriente en los motores.
- d) Velocidad de desplazamiento.

Los resultados fueron los siguientes:

- \* La adherencia de las ruedas fue de 15 Kg de resistencia al desprendimiento.
- \* Peso total del robot = 8.3 Kg. Durante las pruebas el peso fue soportado sin ningún problema.
- \* Resistencia al deslizamiento de 11 Kg.
- \* El consumo de corriente fue de 2 a 2.3 A. soportando un peso de 8.3 Kg.
- \* La velocidad de desplazamiento de 6.30 cm/seg.

En relación a las pruebas de desplazamiento con el robot de 6 ruedas de tracción independiente, se evaluaron los siguientes parámetros:

- ♦ Adherencia de las ruedas al tanque.
- ♦ Resistencia al deslizamiento.
- ♦ Consumo de corriente de los motores.

- ♦ Velocidad de desplazamiento.
- ♦ Mediciones del transductor y estabilidad del sistema posicionador del transductor.

♦ Los resultados fueron los siguientes:

- \* La adherencia de las ruedas fue de 24 Kg de resistencia al desprendimiento.
- \* Peso total de 9.4 Kg, . Durante las pruebas el peso fue soportado sin ningún problema.
- \* El consumo de corriente fue de 2.9 a 3.1 A. soportando un peso de 9.4 Kg.
- \* La velocidad máxima fue de 6.20 cm / seg.
- \* Mediciones confiables y buena estabilidad del sistema que posiciona al transductor.

La medición de espesor resultó ser confiable. Al comparar las mediciones del robot con mediciones manuales, un resultado importante es que se presenta una variación en los valores de las lecturas tomadas de 0.010". La figura 6 muestra la disposición del robot al efectuar mediciones de espesores en un tanque.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo económico a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, así como al Laboratorio de prueba (LAPEM) por el apoyo económico y las facilidades para realizar las pruebas de campo en sus instalaciones. Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial por el apoyo al desarrollo de este proyecto tanto económico como todo el soporte técnico brindado y de manera muy especial al Dr. Carlos Rubio por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo del robot.

Se ha mostrado la base de un conocimiento que ha permitido diseñar, construir y controlar un pequeño robot con ruedas magnéticas capaz de desplazarse por las paredes verticales de tanques ferromagnéticos, que por lo general son utilizados para almacenar algún tipo de combustible. La forma de operación remota en la que el operario controla la toma de las mediciones de espesores de pared en los tanques es sumamente segura comparada con la manera en que estas mediciones se han venido efectuando en la última década, esperamos que nuevas aplicaciones potenciales permitan utilizar un robot similar como el descrito en este trabajo, para facilitar otras tareas de alto riesgo.

#### CONCLUSIONES

Se ha mostrado la base de un conocimiento que ha permitido diseñar, construir y controlar un pequeño robot con ruedas magnéticas capaz de desplazarse por las paredes verticales

de tanques ferromagnéticos, que por lo general son utilizados para almacenar algún tipo de combustible. La forma de operación remota en la que el operario controla la toma de las mediciones de espesores de pared en los tanques es sumamente segura comparada con la manera en que estas mediciones se han venido efectuando en la última década, esperamos que nuevas aplicaciones potenciales permitan utilizar un robot similar como el descrito en este trabajo, para facilitar otras tareas de alto riesgo.



Fig. 5 Robot móvil de cuatro ruedas



Fig. 6 Prototipo final de robot

#### REFERENCIAS

- [1] The American Society of Mechanical Engineers, 1995 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, 1995
- [2] <http://www.ela-iet.com/el00009.htm> November 23, 1997, 1997: E. Hendrix David:
- [3] Shigley, Edward Joshep, "Manual de Diseño Mecánico", Mc Graw-Hill, 1989.
- [4] Ramírez Martínez Antonio, "Desarrollo de Sistema Mecánico de robot para Medición de por Ultrasonido". Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Celaya, Marzo, 2001.