

# Robot Móvil Orientado a Inspección No Destructiva en Tanques Ferromagnéticos

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

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI  
Pie de la Cuesta 702, Colonia San Pablo, C.P. 76130, Querétaro, Qro.

## 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 este tipo de trabajo de una manera segura y eficiente. 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.*

**Palabras clave:** Robot Móvil, Inspección, Ensayos no destructivos.

## 1. Introducción

Resulta significativo conocer que existen más de 700,000 tanques de almacenamiento al exterior y más de 4.5 millones de tanques subterráneos, esto tan solo en los Estados Unidos. Muchos de estos tanques por efectos naturales de corrosión presentan fugas. Algo más importante, muchos de estos tanques presentan fugas sin que nadie sepa o tenga conocimiento de ello [1].

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[2]. 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.

## 2. 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:

- a) Escalar tanques de almacenamiento con alturas máximas de 30 m.
- b) Confiabilidad del 99% en la medición del espesor.
- c) El robot debe de permanecer estable durante la medición del espesor.
- d) Altura máxima del robot de 350 mm, anchura máxima de 250 mm x 250 mm.
- e) El robot ha de ser capaz de evadir los obstáculos en los tanques y atravesar cordones de soldadura.
- f) Capaz de operar por radio control.
- g) Peso máximo del robot de 10 Kg.
- h) Velocidad máxima de diseño = 7 cm/seg.
- i) El desplazamiento del robot puede de ser dirigido desde tierra, mediante un sistema de control remota.

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 superficies por las que el robot es capaz de desplazarse.
- Sistema de control del robot.
- 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 considero 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 esta adherido.

### 3. Diseño Mecánico

La velocidad máxima del robot, de acuerdo a especificaciones de diseño, es de 7 cm/seg. Este es un valor que nos permitió iniciar el dimensionamiento del robot con base a que el diámetro de las ruedas magnéticas es de 7.5 cm, la velocidad angular de diseño considerada fue de:

$$N = 17.825 \text{ [r.p.m.]}$$

Se verificó que esta velocidad cumple con las especificaciones de diseño, logrando una combinación de parámetros con base a las ecuaciones básicas de transmisión en un sistema de transmisión tornillo sinfín-engranaje. En la figura 1 se muestra la disposición del sistema de transmisión.

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].

Para el diseño preliminar del robot se consideró que el robot tendría 6 ruedas, y que el peso se distribuye uniformemente en cada una de ellas. El peso máximo calculado del robot = 10 Kg. Por lo que el peso máximo considerado por cada rueda, al dividir este peso entre el número de ruedas fue de 1.666 Kg

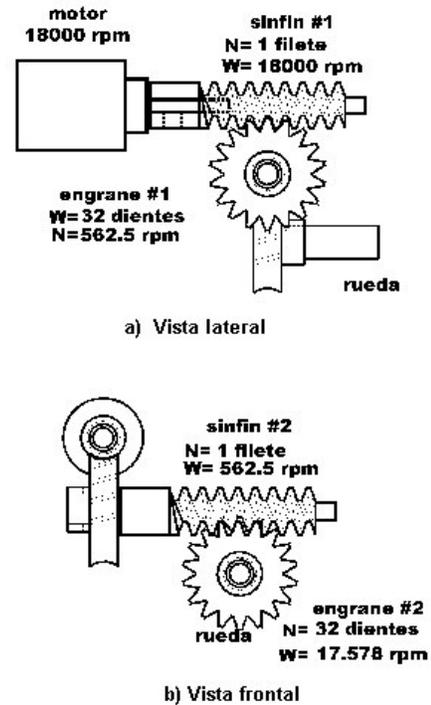


Figura 1. Tren de engranaje seleccionado

El momento en la rueda se determinó considerando este peso y el radio de la rueda, utilizando la ecuación fundamental de momento

$$\text{Momento} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$$

Obteniendo un momento de 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 obtuvo un momento debido al efecto del peso:

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

Por lo que el par de torsión requerido por diseño se determinó sumando  $6.2497 + 3.984 = 10.2337 \text{ kgcm}$

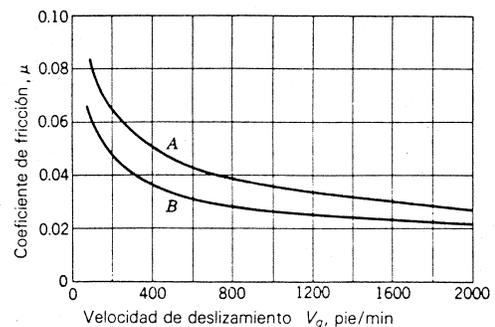


Figura 2. Coeficiente de fricción para mecanismos de engrane - tornillo sinfín

Evidentemente, 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  $\mu$  se utilizó la figura 2, la cual proporciona valores de fricción representativos para aceros [3]. Se considera buena lubricación entre el engrane y el tornillo 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 transmisión 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 [4].

#### 4. Mecanismo de medición

La función del mecanismo de posicionamiento del sensor de ultrasonidos, es ubicar al transductor 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.

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.

#### 5. Sistema electrónico de control.

El sistema electrónico de control se basa en una tarjeta que tiene dos microcontroladores de 8 bits de Microchip. Estos microcontroladores 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, 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 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*. El otro microcontrolador 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 microcontrolador 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. En la tabla 1 se muestra las tareas principales de ambos microcontroladores.

Microcontrolador maestro	Microcontrolador 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	Lectura del sistema de <i>encoders</i>
Control de motor en el sistema de medición	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 de 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. Principales tareas de cada microcontrolador.

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 se emplean para poder sensar la distancia recorrida, y su sentido de giro. Dado que es conocido el diámetro de la rueda y la cantidad de orificios en ella, es posible obtener una relación de los milímetros recorridos por cada pulso leído. Para poder distinguir el sentido de giro 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 gestione 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. A continuación en la figura 3 se muestra un diagrama esquemático del sistema de control.

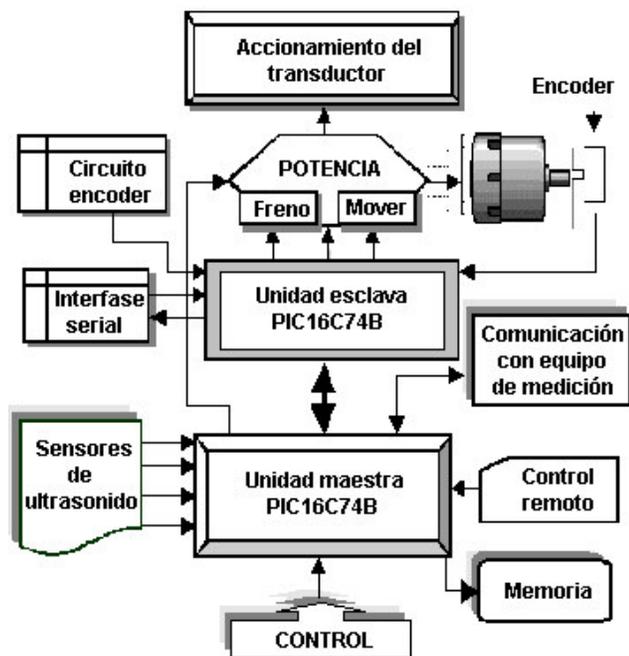


Figura 3. Arquitectura del sistema de control

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 4µs (por lo que el productor lo recomienda para control digital de motores y servomecanismos), se recomienda para la eliminación de ruido electromagnético [5].

Con relación a la tarjeta de potencia, esta desempeña el papel de supervisor para los motores del robot, siendo controlada 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.

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 Amperios y 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.

## 6. 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 4 se muestra el prototipo escalando un tanque real.



Figura 4. Robot móvil de 4 ruedas

Los parámetros a evaluar fueron los siguientes:

- Adherencia de las ruedas al tanque.
- Resistencia al deslizamiento.
- Consumo de corriente en los motores .
- 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 5 muestra la disposición del robot al efectuar mediciones de espesores en un tanque.

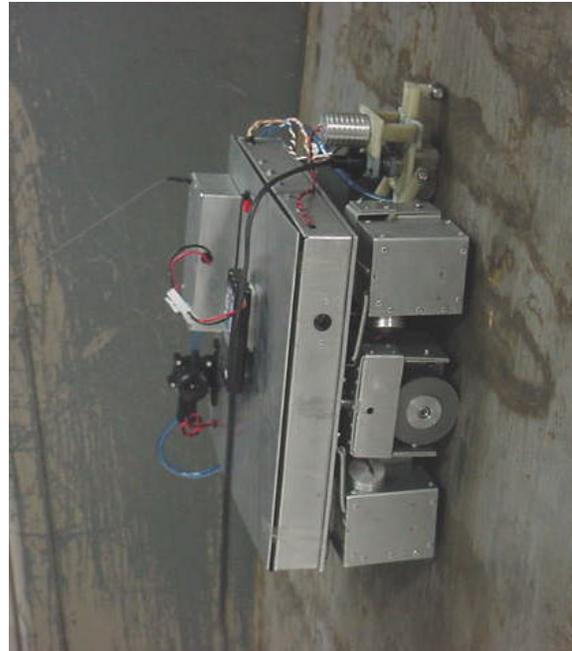


Figura 5. Prototipo final de Robot

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón, así como al Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPEM) de la Comisión Federal de Electricidad por la confianza y las facilidades para realizar las pruebas de campo en sus instalaciones. Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial por su apoyo al desarrollo de este proyecto, particularmente por el soporte financiero, administrativo y técnico, y de manera especial al Dr. Carlos Rubio por sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo del robot.

## 8. Conclusiones

Se ha mostrado la base de un conocimiento en Ingeniería Mecánica y Electrónica que ha permitido diseñar, construir y controlar un pequeño robot con ruedas magnéticas capaz de desplazarse por las paredes verticales de tanques ferromagnéticos. La estabilidad y precisión lograda con el robot, es suficiente para hacer de forma confiable mediciones de espesores mediante tecnologías que reconocen señales ultrasónicas. Los tanques ferromagnéticos generalmente son utilizados para

almacenar algún tipo de combustible y su inspección requiere un estricto apego a normas de seguridad. La forma de operación remota en la que el operario controla la toma de las mediciones 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 en el futuro utilizar este robot en otras tareas, sobre todo en aquellas actividades que presentan alto riesgo para los seres humanos.

## 9. Referencias

- [1] <http://www.ela-iet.com/el00009.htm> ,November 23, 1997, 1997: E. Hendrix David
- [2] The American Society of Mechanical Engineers, 1995 ASME, “*Boiler & Pressure Vessel Code*”, 1995
- [3] Shigley E. J., “*Manual de Diseño Mecánico*”, Mc Graw-Hill, 1989.
- [4] Ramírez A., “*Desarrollo de Sistema Mecánico de Robot para Medición por Ultrasonido*”. Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico de Celaya, Celaya 2001
- [5] Solano J., “*Desarrollo de un Robot para Inspección de Espesores de Pared de Tanques de Almacenamiento*”, Tesis de Maestría. Postgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, CIDESI, Querétaro, 2002