

**Diseño y Manufactura de Robot Móvil
Para Medición de Espesores de Tanques
Ferromagnéticos por Ultrasonido.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA
EN LA ESPECIALIDAD DE**

DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA

Ing. Antonio Ramírez Martínez

Querétaro, Qro. Agosto 2002.





CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

**Diseño y Manufactura de Robot Móvil
Para Medición de Espesores de Tanques
Ferromagnéticos por Ultrasonido.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO
ACADEMICO DE**

**MAESTRO EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA
EN LA ESPECIALIDAD DE**

DISEÑO MECÁNICO

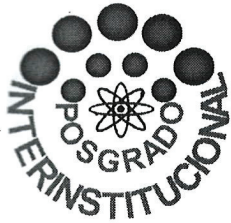
PRESENTA

Ing. Antonio Ramírez Martínez



CIENCIA Y TECNOLOGIA

Querétaro, Qro. Agosto 2002.



CIENCIA Y TECNOLOGIA

CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

Santiago de Querétaro, Qro. 18 de julio del 2002

Los miembros de este comité tutorial recomendamos que la presente tesis desarrollada por el C. Antonio Ramírez Martínez sea aceptada para obtener el grado académico de Maestro en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Diseño Mecánico.

Comité tutorial

Dr. Carlos Rubio González
Asesor Académico

Ing. Julio César Solano Vázquez
Asesor en Planta

Dr. José Emilio Vargas Soto
Asesor

Dr. Guillermo Rodríguez Vilomara
Director del Posgrado Interinstitucional en
Ciencia y Tecnología. CIDESI



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

Santiago de Querétaro, Qro. 24 de julio del 2002

Los miembros de este jurado aprobamos la impresión de tesis desarrollada por el C. Antonio Ramírez Martínez para obtener el grado académico de Maestro en Ciencia y Tecnología en la especialidad de Diseño Mecánico.

Jurado de examen recepcional

Dr. Carlos Rubio González

Dr. Ismael López Juárez

Dr. Luis Reyes Ávila

Dr. Gabriel Viesca Lobatón

Dr. José Guadalupe Suárez Romero

Indice	página
Dedicatorias	
Resumen	1
Nomenclatura	4
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	6
1.1 Antecedentes.	7
1.2 Justificación.	8
1.2.1 Problemática actual.	10
1.2.2 Objetivo de la presente tesis.	12
1.2.3 Propuesta del prototipo.	13
1.3 Ensayos no Destructivos (END).	14
1.3.1 Principios acústicos de ultrasonido.	14
1.4 Estado actual del mercado.	16
CAPÍTULO 2. ROBÓTICA	19
2.1 Historia y evolución de la robótica.	19
2.2 Robótica y automatización.	20
2.2.1 Robots móviles.	21
2.3 Descripción de robot industrial.	23
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO	31
3.1 Requerimientos.	31
3.2 Diseño preliminar.	31
3.3 Cálculos.	32
3.3.1 Determinación del número de ruedas del robot.	34
3.3.2 Cálculo de velocidad angular de salida de ruedas.	36
3.3.3 Selección de tren de engranaje.	36
3.3.3.1 Cálculo del par de torsión generado por el sistema de tracción.	38
3.3.4 Diseño del sistema de engranaje.	46
3.3.5 Selección de chasis.	56

3.3.6 Elección del sistema de alimentación de líquido para transductor.	57
3.3.7 Sistema de suministro de acoplante.	59
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS CINEMÁTICO	62
4.1 Velocidad absoluta y relativa en el movimiento plano.	62
4.2 Sistema de referencia en el movimiento general.	63
4.3 Ecuaciones de movimiento del robot.	64
4.4 Movimiento del robot en el plano.	67
4.4.1 Cálculo de la cinemática inversa.	73
4.5 Cálculo de las fuerzas de fricción.	78
CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DEL ROBOT	84
5.1 Pruebas de laboratorio.	84
5.1.1 Prueba de salto de soldadura para el sistema de tracción individual.	84
5.1.2 Pruebas de capacidad de adherencia y deslizamiento.	85
5.1.3 Trayectoria vertical.	85
5.1.4 Trayectoria horizontal.	87
5.1.5 Trayectoria curva.	88
5.2 Pruebas de campo.	89
5.3 Robot final.	93
CONCLUSIONES	95
REFERENCIAS	97

DEDICATORIAS

Al Ing. Ángel Ramírez Vázquez
Por la confianza y apoyo que me
brindó para la participación y
realización de este proyectos de
tesis.

Al M.C. Joel Chaparro González
Por su confianza y apoyo incondicional
para la realización de este proyecto,
de la presente maestría y desarrollo de
esta tesis.

A mi madre

Por el amor verdadero que siempre me ha
regalado.

A mi esposa Rosalva

Por su comprensión, ayuda y amor
incondicional.

A mis hijos: Eduardo y Bart

Por ser mi inspiración para superarme
cada día.

A mis maestros y al PICYT

Por compartir sus conocimientos
con empeño y dedicación.

A JICA

En especial al **Lic. YUICHI ENDO**
por el apoyo económico que me
brindó.

A mis asesores:

Dr. Carlos Rubio González
Dr. José Emilio Vargas
Ing. Julio Cesar Solano Vargas

Por su apoyo incondicional y
sus sabios consejos para la
realización del presente
proyecto y tesis.

A Dios

Por permitirme disfrutar de cada día de esta vida.

RESUMEN

La robótica ha adquirido mucha importancia en los procesos de manufactura, inspección y de pruebas, las aplicaciones de la robótica son muy extensas, ya sea en líneas de proceso, operaciones de alto riesgo o en ensayos no destructivos.

Resulta particularmente interesante automatizar la tarea de medir en forma segura y confiable el espesor de paredes ferromagnéticas de tanques de grandes dimensiones de combustóleo o algún otro tipo de líquido.

Uno de los problemas de medición por ultrasonido, es que se requiere de un número considerable de puntos en el área de inspección y por lo tanto se emplean muchas horas/hombre, además del riesgo que se tiene al trabajar en las alturas. Debido a estos inconvenientes, se presenta una oportunidad para realizar con la ayuda de sistemas robotizados este tipo de tareas de forma segura y eficiente.

La finalidad de todas estas lecturas, analizadas mediante técnicas de evaluación, permite determinar las condiciones de desgaste y corrosión en las placas de dichos contenedores, a fin de tomar decisiones referentes a mantenimiento, sustitución o reparaciones mayores.

En este trabajo se presentan los principales criterios del diseño y fabricación del sistema mecánico de un robot móvil, que es capaz de realizar mediciones de forma remota en tanques de almacenamiento. Se muestran los componentes principales del robot, su integración con el sistema de medición, así como resultados de desplazamiento en pruebas de laboratorio y en campo.

Para el desarrollo del robot se definieron seis sistemas mecánicos:

- a)- Sistema de adherencia.
- b)- Sistema motriz.
- c)- Posicionador del transductor .
- d)- Chasis.
- e)- Sistema de amortiguación.
- f)- Alimentación del acoplante.

Cada uno de ellos representa un reto, se tienen que optimizar, para que el producto terminado sea ligero y lo más compacto posible con el fin de obtener un robot liviano y pequeño.

El primer punto a vencer fue el de encontrar un sistema de adherencia que nos proporcionara la suficiente fuerza para que el robot navegue a través del tanque sin que se desprenda o resbale del mismo. La tarea no fue fácil porque además del recubrimiento de pintura con que cuentan los tanques, existen los cordones de soldadura de forma y tamaño irregular que los convierte en verdaderos obstáculos.

El sistema motriz se puede encontrar en el mercado, pero tiene varios inconvenientes, son pesados y grandes, que contradicen nuestro objetivo, o si son livianos no tienen la capacidad suficiente para poder vencer el par que se requiere. Una vez solucionados estos primeros puntos, el nuevo reto fue el diseño del sistema de transductor, cuya finalidad es mantener el transductor del aparato de ultrasonido siempre perpendicular a la superficie del tanque. Esta posición la debe mantener debido a que la cara del transductor debe sentar perfectamente sobre la superficie del tanque para que las ondas ultrasónicas se transmitan íntegramente y así realizar una lectura confiable.

Para el chasis, lo primero que se pensó, fue que este debía ser flexible pero a la vez rígido, esto para que absorbiera la diferencia de alturas y evitar que las ruedas se desprendieran de la superficie, principalmente durante el salto de las soldaduras y así eliminar el empleo de un sistema de amortiguación diferente.

Por último, la dosificación de acoplante, este punto no menos importante que los demás, debe suministrar al transductor la cantidad necesaria de acoplante al momento de la lectura, para que el aparato registre una medición correcta.

Como puede observarse, no fue una tarea fácil, requirió mucho trabajo, pero ahora al verlo terminado es una satisfacción haber participado en el desarrollo de un robot robusto y confiable.

El presente trabajo está dividido en cinco capítulos, los cuales abordan diferentes aspectos del trabajo de investigación. El capítulo 1 trata acerca del escenario detrás del proyecto, es decir los antecedentes y el área de la ciencia en la cual se desarrolla.

Se presenta la problemática actual en la inspección de espesores de tanques de almacenamiento que consiste en la inspección manual de éstos y que presenta claras

desventajas en comparación con una inspección automatizada; la solución que se propone, consiste en el desarrollo de un robot medidor de espesores.

En el capítulo 2 se muestra la historia y evolución de la robótica, se mencionan las fases relevantes en su desarrollo, se da una clasificación de los robots de acuerdo a la evolución de los mismos y se indican las partes de las que consta un robot industrial y sobre todo se hace mención sobre los robots móviles.

En el capítulo 3 se especifican los requerimientos y se realizan los cálculos preliminares para capacidad de adherencia, deslizamiento y capacidad de motores así como el diseño de los engranes y tornillos sin fin.

En el capítulo 4 se presentan la cinemática del robot y en el capítulo 5 se incluyen las pruebas de laboratorio y en campo realizadas durante la evaluación del robot.

Finalmente se muestran las conclusiones sobre este trabajo, y las referencias que se utilizaron para la realización de la presente tesis.

NOMENCLATURA

λ = Longitud de onda.	m = Módulo del cortador.
μ = Coeficiente de fricción.	N = Número de RPM ó Número de dientes.
ϕ = Ángulo de presión.	N_g = Número de dientes del engrane.
ϕ_n = Ángulo de presión normal.	N_w = Número de dientes del gusano.
λ_e = Ángulo de avance.	P = Potencia.
a = Adendo.	P = Paso circular.
b = Dedendo.	P_a = Presión acústica.
C = Distancia entre centros.	P_b = Paso de base.
D = Diámetro primitivo.	P_c = Paso circular.
D_r = Diámetro de rueda.	P_d = Paso diametral.
d_1 = Diámetro de la circunferencia primitiva del piñón.	p_x = Paso axial.
d_2 = Diámetro de la circunferencia primitiva de la rueda.	T = Par torsor.
d_w = Diámetro primitivo del gusano.	V = Velocidad lineal.
f_r = Frecuencia.	V_g = Velocidad de deslizamiento.
F = Fuerza resultante en el gusano.	V_w = Velocidad lineal del gusano.
F_x = Fuerza en el eje X en el gusano.	W_g = Velocidad angular del engrane.
F_{wt} = Fuerza que actúa en el gusano calculada a partir de formula.	W_w = Velocidad angular del gusano.
F_z = Fuerza en el eje Z en el gusano.	ω = Velocidad angular .
V_B = Vector velocidad de una partícula B.	a = Separación entre ruedas.
V_A = Vector velocidad de una partícula A.	b = Separación entre ejes.
R = Vector de posición .	L = Matriz de transformación.
$\dot{\theta}_a$ = Vector de velocidades angulares de las ruedas del robot.	$\dot{\theta}_i$ = Velocidad de la rueda i-esima.

J	= Matriz Jacobiana.
k	= Matriz de transformación.
F	= Fuerza.
m	= Masa.
T	= Energía cinética.
$\dot{\psi}$	= Velocidad angular del vector de referencia.
$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}$	= Derivadas parciales de la energía cinética con respecto a cada una de las variables.
u	= Vector velocidad del centro de masas en la dirección x.
v	= Vector velocidad del centro de masas en la dirección y.
\dot{u}	= Vector aceleración del centro de masas en la dirección x.
\dot{v}	= Vector aceleración del centro de masas en la dirección y.
F_M	= Fuerza magnética.
t	= Vector de giro.
N_r	= Fuerza de reacción normal.
W_r	= Peso del robot.
f	= Fuerza de fricción.
μ_k	= Coeficiente de fricción dinámica.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Conforme México entra gradualmente al fenómeno de la globalización, se hace más evidente la falta de estandarización en aspectos tecnológicos y otros relacionados con la industria, los cuales ponen en clara desventaja a nuestro país con los países industrializados.

La palabra sajona *standard* se emplea generalmente para designar las dimensiones y características de productos industriales o comerciales que se ajustan a determinadas normas y especificaciones de fabricación y asegurar así, su uniformidad y grado de calidad. Esta estandarización es necesaria para el correcto desarrollo de transacciones comerciales entre diferentes países, pues es necesario conservar los mismos estándares de manejo y procesos de manufactura de materias primas y bienes o servicios, para asegurar una calidad satisfactoria en el producto final.

En nuestro país el seguimiento a las normas se hace más estricto y se van encontrando deficiencias en las técnicas, equipo y procedimientos. Dentro de este aspecto, se encuentra la problemática de la inspección de tanques de almacenamiento; más específicamente, en la medición de espesores de estos tanques.

El desgaste de las paredes se lleva a cabo por la fricción del líquido al entrar y salir del tanque o por la naturaleza del líquido que almacena, este desgaste puede ser puntual o en un área determinada, cuando el espesor se encuentra debajo de lo que establece la norma, la placa debe ser reemplazada o reparada de acuerdo a lo que especifique la norma API653[1].

Ahora que se exige una inspección conforme a normas, se hace casi inaccesible el costeo de una inspección en regla, pues la cantidad de puntos a medir en un tanque de almacenamiento hace necesario una considerable cantidad de inspectores que realicen este trabajo sobre andamios, grúas o en otros casos, colgados de arneses sobre los tanques.

Dado el riesgo para el personal y el costo elevado que representa una inspección de acuerdo a normas, se hace necesario encontrar una nueva solución a este problema. Durante el presente trabajo de investigación, se propone y desarrolla la etapa mecánica de un robot de medición de

espesores para tanques de almacenamiento como alternativa para mejorar la calidad, rapidez, confiabilidad y el costo de este tipo de inspecciones.

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente en nuestro país el área de la robótica no se ha aprovechado totalmente, son pocas las industrias que han adquirido este beneficio, las que más aplicación le dan son las ensambladoras automotrices. Esto se debe principalmente a los altos precios para adquirir esta tecnología y a la falta de mano de obra especializada en nuestro país en esta área.

En el área de ensayos no destructivos, la medición de espesores es una de las más solicitadas por los industriales para verificar los espesores de sus tanques de almacenamiento, los cuales pueden ser para agua, combustóleo, etc. Esta inspección es para verificar que los espesores se encuentran dentro de las normas establecidas, como son las normas API (Instituto Americano del Petróleo) [1] y la norma SA-435/SA-435M[2].

El tanque de almacenamiento puede ser de cualquier tamaño, pero en este trabajo la atención se enfoca a tanques con dimensiones de 5 a 15 m de altura y 20 a 30 m de diámetro, en donde alcanzar puntos intermedios requiere de utilizar andamios, arneses ó grúa. La medición de espesores de tanques de almacenamiento en el área de ensayos no destructivos, se realiza de manera manual en México, el inspector debe tomar las lecturas a distancias aproximadas de 22.86 cm (9") a lo largo y ancho del tanque, lo que hace que sea tardado y tedioso. La propuesta de realizar las pruebas por medio de un robot es para reducir el tiempo de inspección, asegurar las mediciones en las lecturas y eliminar el riesgo a las alturas del inspector en la medición de espesores de tanques de almacenamiento. Así mismo se pretende fomentar el uso de este tipo de tecnología en nuestro país, no solamente en áreas de proceso, sino también en el área de inspección y pruebas. Al introducir este tipo de tecnología y al ser fabricado por mano de obra y con materiales nacionales, y al mismo tiempo producirse en serie, los costos de fabricación se reducirían notablemente, haciéndolos más rentables para la industria nacional.

En la figura 1 se muestra un tanque de almacenamiento, cuyas dimensiones son 18 m de altura y 40 m de diámetro. Este tanque se encuentra en las instalaciones de la termoeléctrica de

Salamanca, Gto., en el cual se puede observar que para alcanzar un punto intermedio se necesita de aditamentos extras, como se ha venido mencionando, los cuales pueden ser grúas, arneses o andamios.



Fig. 1 Tanque de almacenamiento para combustoleo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

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[3].

Las fugas en los depósitos subterráneos pueden ser escurridizas pues pueden colarse hasta la superficie o incluso mezclarse con depósitos acuosos subterráneos por años antes de que puedan detectarse. Además existen otros daños de carácter ambiental y de carácter económico, pues la limpieza y la derrama del líquido puede llegar a costar varios millones de dólares.

Además de los costos por posibles derrames, existe el costo de la limpieza e inspección en los tanques subterráneos, los cuales llegan a elevarse de manera considerable a través de los años. Por esto la industria a escala mundial ha ido cambiando el tipo de tanques de almacenamiento, de tanques subterráneos a tanques de superficie. Existen varias características que hacen de esta opción más atractiva.

En primer lugar, el operador es capaz de apreciar todas las superficies del tanque. La inspección visual es simple, barata, conveniente, y confiable, por lo que se deja de depender de equipo especializado o de contratistas para verificar que un tanque se encuentra libre de fugas. Segundo, el dueño y operador de estos tanques no se enfrentan a las duras regulaciones existentes en cuanto a almacenamiento subterráneo se refiere. Finalmente, los propietarios de sistemas de almacenamiento al exterior encuentran que son más baratos y menos regulados. La rápida demanda de tanques de almacenamiento sobre la superficie ha impulsado la revisión de códigos y normas americanas, así como también mejoras tecnológicas a los diseños existentes de tanques de almacenamiento.

Esto tiene repercusiones en todo el continente americano, pues casi la totalidad de la industria en Latinoamérica depende de normas y códigos estadounidenses. Normas tales como son las que emiten sociedades como la ASME (American Society for Mechanical Engineering), ASNT (American Society for Nondestructive Testing) y API (American Petroleum Institute). Mas recientemente en México, empresas paraestatales como Pemex han establecido como norma de inspección en sus tanques de almacenamiento, el realizar el reconocimiento de estas fallas de manera automática, es decir con sistemas automatizados de medición de fallas.

1.2.1 Problemática actual

En la actualidad existe la necesidad de inspeccionar y mantener estructuras de acero. Estas estructuras incluyen puentes, presas, torres de agua, plataformas y contenedores de petróleo, barcos, tanques de almacenamiento subterráneos, sobre tierra y otras estructuras similares. Aunque se conoce la geometría de estas estructuras, así como los lugares en donde se

presentan comúnmente fallas críticas; la movilidad de inspectores humanos sobre estas estructuras se vuelve difícil o peligrosa.

Debido a la estructura, el uso continuo y las dimensiones físicas de los tanques de almacenamiento se hace necesario emplear un método de inspección que no sea dañino para el propio tanque, que tenga acceso a zonas de difícil acceso, que sea razonablemente costeable, y que además sea posible de emplear cuando el contenedor se encuentre lleno. Por esta y otras razones la técnica de inspección por ultrasonido es la más empleada en la industria a nivel mundial, sobre otras técnicas como la radiografía y la técnica de corrientes de Eddy[3].

Actualmente, la mayoría de las inspecciones de medición de espesores en tanques de almacenamiento se realizan de manera manual alrededor del mundo. Entre las desventajas de la inspección por ultrasonido en comparación con otras técnicas de Ensayos No Destructivos son las siguientes:

- La inspección manual requiere mucha atención y concentración de técnicos experimentados (aun un técnico experimentado alcanza una repetibilidad baja, esto debido a que una variación en la fuerza aplicada al transductor resulta en un error de medición).
- Se requiere de un gran conocimiento técnico para el desarrollo de los procedimientos de inspección.
- Se necesita usar patrones de referencia, tanto para calibrar el equipo como para caracterizar las discontinuidades, siendo del mismo material o similar al que se va a inspeccionar.
- Se necesita un acoplante para obtener una transferencia efectiva de las señales entre piezas y transductor.

Otro de los factores a tomar en cuenta son las dimensiones de los tanques de almacenamiento, ya que éstos alcanzan en promedio alturas de 15 m por 50 m de diámetro, por lo que se hace necesario el uso de andamios, grúas, arneses, escaleras y otros métodos, para trabajar en zonas con alta dificultad de acceso. Sin embargo estas medidas son altamente peligrosas y ponen en

riesgo la salud del operador, por lo que las normas y procedimientos han cambiado a favor de la automatización de este tipo de inspecciones.

Para la inspección de un tanque de almacenamiento de estas características es necesario emplear varios técnicos y por lo general, realizar mediciones bastante espaciadas para poder tener una idea general del estado del contenedor. Estas mediciones espaciadas son necesarias debido a que si se cumpliera la norma aplicable a este tipo de inspecciones, el propietario del tanque de almacenamiento tendría que costear el precio de un número mayor de horas/hombre, así como la renta de grúas (para alcanzar zonas inaccesibles), y costos de los consumibles para la inspección (acoplantes que aseguran una transmisión fiel entre la señal del transductor y el área de contacto, marcadores para los puntos de medición) para cumplir con la distancia entre puntos que indica la norma.

La norma SA-435/SA435-M “ *STANDARD SPECIFICATION FOR STRAIGHT-BEAM ULTRASONIC EXAMINATION OF STEEL PLATES* ” expedida por la ASME (American Society of Mechanical Engineers), Artículo 23- Ultrasonic Standar: “La inspección deberá de realizarse a lo largo de un cuadrículado de líneas perpendiculares entre sí, las cuales tendrán una separación de 22.86 cm (9”) entre líneas paralelas. Un acoplante adecuado, tal como lo es el agua, aceite soluble, o glicerina, deberá de emplearse”[2].

Sin embargo, en inspecciones manuales generalmente se realizan mediciones con una separación en promedio de 1m entre punto y punto, por lo que la norma no garantiza la detección de debilitamiento de las paredes de la placa. En la figura 2 se muestra el uso de andamios para alcanzar puntos alejados de la superficie.

La técnica que se emplea es:

- a) Preparación de andamios: Estos son necesarios para alcanzar puntos alejados de la superficie, en algunas ocasiones se utilizan arneses para colgarse de la parte superior del tanque e ir descendiendo.
- b) Marcado del tanque. Los inspectores marcan los puntos a medir en el tanque a la separación que se requiere, empleando un flexómetro. Como puede observarse en este punto ya es necesario el uso de andamios.

- c) Acomodo del andamio. Una vez terminada la primera área, es necesario mover el andamio para marcar la parte restante, esto se hace tantas veces como sean necesarias hasta el marcado total del tanque.



Fig. 2 Inspección de tanque de almacenamiento por ultrasonido.

- d) Medición de espesores. Terminado de marcar el tanque, los inspectores nuevamente vuelven a utilizar los andamios para medir el espesor de la pared del tanque.

1.2.2-Objetivo de la presente tesis

El objetivo de la presente tesis es mostrar el conocimiento adquirido durante el desarrollo original de un robot móvil diseñado para efectuar tareas de inspección de medición de espesores sobre las paredes de grandes tanques ferromagnéticos, garantizando que las medidas se efectúen de forma confiable de acuerdo a normas establecidas. Así como el uso de una metodología que ha permitido integrar los conocimientos asociados al diseño y manufactura del robot.

1.2.3 Propuesta del prototipo

Como se mencionó anteriormente, la inspección y el mantenimiento de estructuras metálicas, tales como tanques de almacenamiento, puentes, torres y barcos, es un requisito por cuestiones de seguridad, o protección al medio ambiente. Estas estructuras, por lo general, tienen considerables espacios verticales u horizontales. Muchos de estos espacios están limitados al acceso del trabajador o del inspector humano. Estos problemas de acceso pueden ser debido a la altura o profundidad de la estructura. La inspección al exterior de estas estructuras puede resultar difícil debido a la dificultad de alcanzar tales zonas. Estas dificultades se combinan para sugerir que un robot con la habilidad de desplazamiento vertical pueda ser la solución para estas necesidades de inspección y mantenimiento.

Dado que muchas de estas estructuras están constituidas por placas de acero con propiedades ferromagnéticas, un robot de ruedas magnéticas es una opción cómoda para esta clase de estructuras.

Por otro lado, la idea de un vehículo para el desarrollo de un proceso automatizado no es nueva para el área de los Ensayos No Destructivos. Actualmente existen varios modelos de estos vehículos que emplean ruedas magnéticas (Scorpion de Silverwing Ltd., Spider de Scantech y Fury de Red Zone; por nombrar algunos) cuyas aplicaciones varían dependiendo de las necesidades del fabricante. Sin embargo estos vehículos dependen totalmente de un operador para su navegación, quedando alejado el concepto de robotización para los END.

Por esto, el presente proyecto pretende desarrollar un *robot* capaz de adherirse y moverse en forma vertical y horizontal sobre los tanques de almacenamiento, que pueda medir distancias y ubicarse en las diferentes partes del tanque a ser inspeccionadas, guiándose automáticamente o por radiofrecuencia, eliminando así los riesgos de accidentes y reduciendo los tiempos de inspección de tanques de almacenamiento de gran capacidad.

Con base a las especificaciones de medición, se desea que el robot sea capaz de:

- a) Desplazarse a lo largo de la periferia exterior de un recipiente para realizar mediciones de espesores por el método de ultrasonido.
- b) Girar sobre su propio eje, sin deslizamiento para evitar dañar la pintura.
- c) Permanecer estático aun cuando no esté energizado.
- d) Realizar las mediciones eficientemente en el punto requerido.

1.3 Ensayos No Destructivos (END)

Los Ensayos No Destructivos forman parte del campo de la ciencia que se dedica a la examinación de un objeto con una tecnología tal que no afecte el uso futuro del objeto. Los END aseguran un excelente balance entre control de calidad y efectividad de costos.

El término END incluye varios métodos que pueden:

- Detectar imperfecciones internas o externas.
- Determinar la estructura, composición o propiedades de los materiales.
- Medición de características geométricas.

Los END son utilizados en todas las fases del diseño y manufactura de un producto, incluyendo selección de materiales, investigación y desarrollo, ensamble, control de calidad y mantenimiento.

Entre las diferentes ramas que comprenden los ensayos no destructivos encontramos las técnicas de Ultrasonido, Visual, Radiografía, Líquidos Penetrantes, Partículas Magnéticas, Corrientes Eddy y Termografía.

1.3.1 Principios acústicos de ultrasonido

Las ondas más utilizadas en ultrasonido son:

- a) Longitudinales o de compresión.
- b) Transversales o de corte.
- c) Superficiales o de Rayleigh.

Propagación de ondas

Las ondas ultrasónicas (y otros tipos de ondas de sonido) se propagan de alguna manera en cualquier medio elástico. Cuando las partículas atómicas o moleculares de un elástico se desplazan de su posición de equilibrio por alguna fuerza aplicada, actúan esfuerzos internos para restaurar las partículas a sus posiciones originales. Debido a las fuerzas interatómicas que existen entre las partículas adyacentes en el material, el desplazamiento en un punto induce otros desplazamientos a puntos vecinos y así sucesivamente, provocando una onda de esfuerzo-deformación. El desplazamiento real que ocurre en un material por las ondas difiere

en sólidos, líquidos y gases debido a las grandes diferencias en la distancia media entre las partículas en estas formas de materia.

Los conceptos de longitud de onda, ciclo, frecuencia, amplitud, velocidad y atenuación descritos anteriormente se aplican en general a las ondas ultrasónicas y otros tipos de ondas de sonido. La relación de velocidad acústica (velocidad de propagación), frecuencia y longitud de onda está dada por:

$$V = f_r \lambda \quad (1.1)$$

donde:

V = velocidad (m/s).

f_r = frecuencia (hertz o ciclos/s).

λ = longitud de onda (m/ciclo).

En la base del modo de desplazamiento de la partícula, como se ha mencionado anteriormente, las ondas ultrasónicas se clasifican como: ondas longitudinales, transversales y superficiales.

Ondas longitudinales

Algunas veces llamadas también ondas de compresión, son el tipo de ondas ultrasónicas mayormente usadas en la inspección de materiales. Este tipo de ondas se caracteriza porque los desplazamientos de las partículas son en dirección paralela a la propagación. Las ondas longitudinales crean zonas de compresión y de dilatación, separadas entre sí media longitud de onda en el material en que se propagan.

Las longitudes ultrasónicas y la oscilación correspondiente de la partícula se muestran esquemáticamente en la figura 1.10. En esta se muestra la amplitud del desplazamiento de la partícula contra la distancia de viaje de la onda, junto con el valle de la onda de compresión. La distancia desde una cresta a la siguiente es la longitud de la onda. El eje vertical en la figura puede representar presión en lugar del desplazamiento de la partícula. El eje horizontal puede representar tiempo en lugar de la distancia recorrida ya que la rapidez del sonido es constante en un material dado debido a que esta relación se usa en las mediciones hechas por ensayo ultrasónico. Las ondas longitudinales ultrasónicas se propagan fácilmente en líquidos, gases, así como en sólidos elásticos. Las trayectorias medias de las moléculas de los líquidos y

gases a presión de 1 atm son tan pequeñas que las ondas longitudinales pueden propagarse simplemente por la colisión elástica de una molécula con la siguiente.

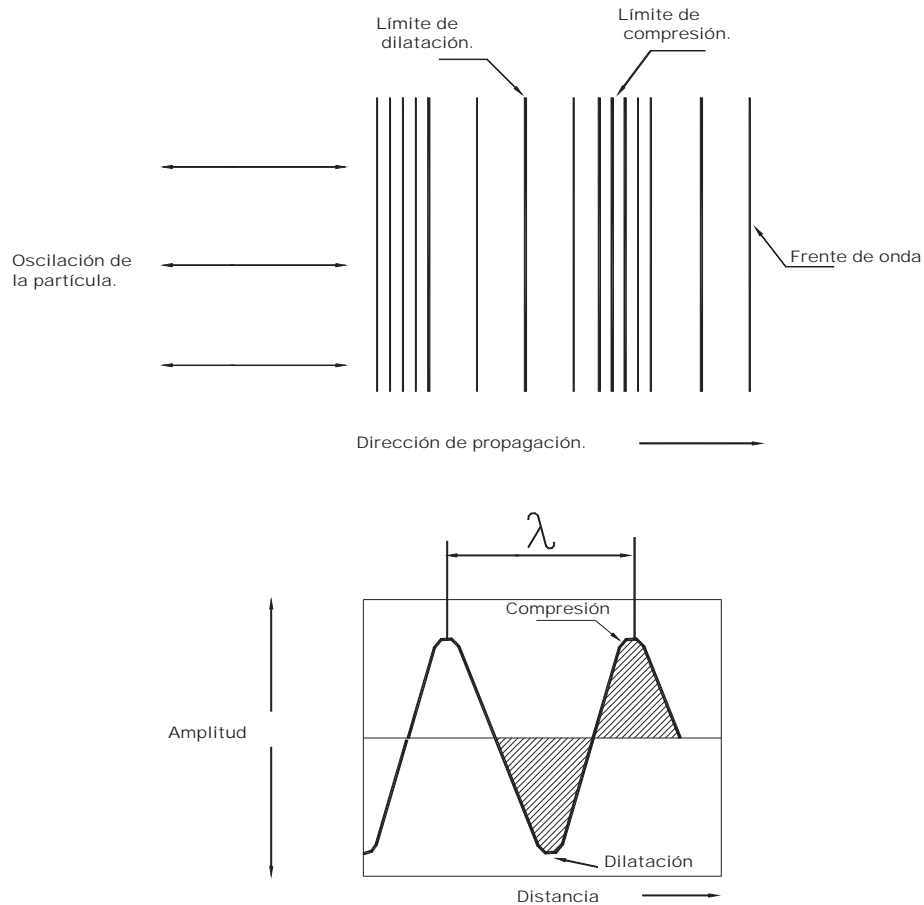


Fig. 1.10 Onda longitudinal.

La velocidad de las ondas longitudinales es de aproximadamente 5920 m/s en el acero, 1480 m/s en agua y 330 m/s en el aire.

1.4-Estado actual del mercado

Existen varios dispositivos para medir los espesores de tanques de almacenamiento en tierra, incluso para tubos o tanques enterrados.

Solo se presentarán 3 de los más conocidos en el mercado para tanques en tierra.

El primero y más comercializado es el SPIDER.



Fig. 1.11 Vista principal del robot.

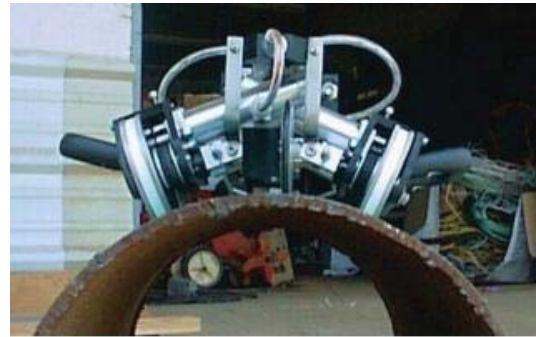


Fig. 1.12 Vista que nos muestra la flexibilidad del robot.

El segundo es llamado Scorpion.



Fig. 1.13 Vista principal del robot.



Fig. 1.14 Robot escalando tanque de almacenamiento.

y por último el 801D Superscope

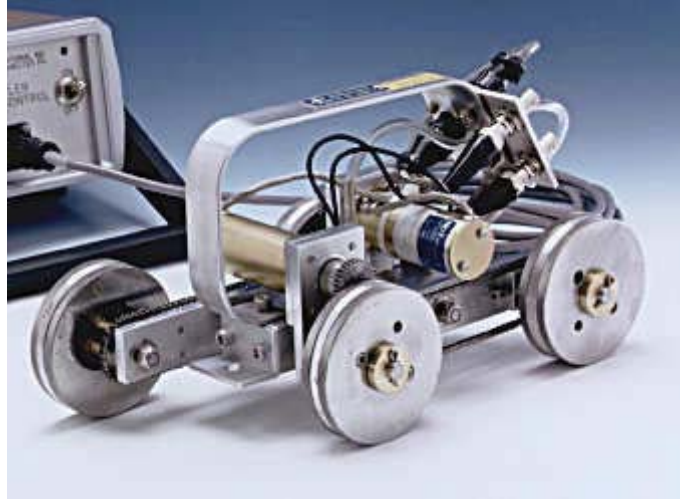


Fig. 1.15 Vista principal de robot 801D Superscope.

Todos estos dispositivos son operados por medio de “JOYSTICKS” que lo hacen 100% dependientes de un operador y de su habilidad para manejarlo.

CAPÍTULO 2. ROBÓTICA

Una de las áreas con mayor desarrollo en las últimas décadas ha sido la robótica, por este motivo es importante dar una amplia introducción.

2.1 Historia y evolución de la robótica

La imagen del robot como una máquina a semejanza con el ser humano, subyace en el hombre desde hace muchos siglos, existiendo diversas realizaciones con este fin; desde los pájaros mecánicos de Hero de Alejandría en el siglo I a .C., hasta el tigre del museo Victoria Albert, del siglo XIX.

La palabra robot proviene del idioma Checo y la usó por primera vez el escritor Karel Capek en 1917 para referirse, en sus obras, a máquinas con forma humanoide. En 1940, Isaac Asimov volvió a referirse a los robots en sus libros.

Pero el robot industrial que se conoce y emplea en nuestros días, no surge como consecuencia de la tendencia o afición de reproducir seres vivientes, sino de la necesidad. Fue la necesidad la que dio origen a la agricultura, el pastoreo, la caza, la pesca, etc. Más adelante, la necesidad provocó la primera revolución industrial con la invención de la máquina de Watt y, actualmente, la necesidad ha cubierto de ordenadores la faz de la tierra.

Inmerso en la era de la informatización, la imperiosa necesidad de aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos, ha hecho insuficiente la automatización industrial rígida, dominante en las primeras décadas del siglo XX, que estaba destinada a la fabricación de grandes series de una restringida gama de productos. Hoy día, más de la mitad de los productos que se fabrican corresponden a lotes de pocas unidades.

Al enfocarse la producción industrial moderna hacia la automatización global y flexible, han quedado en desuso las herramientas, que hasta hace poco eran habituales:

- Máquinas para la automatización rígida.
- Máquinas herramientas CNC.
- Manipuladores secuenciales.

Con el objetivo de diseñar una máquina flexible, adaptable al entorno y de fácil manejo, George Devol, pionero de la Robótica Industrial, patentó, en 1956 un manipulador programable que fue el germen del robot industrial[5].

Se pueden distinguir cinco fases relevantes en el desarrollo de la Robótica Industrial:

1era. Fase: El laboratorio ARGONNE diseña en 1950, manipuladores amo-esclavo para manejar materiales radioactivos.

2da. Fase: Unimation, fundada en 1958 por Engelberger y hoy absorbida por Westinghouse, realiza los primeros proyectos de robots industriales, a principios de la década de los 60 de nuestro siglo, instalando el primero en 1961 y posteriormente en 1967, un conjunto de ellos en una fábrica de GENERAL MOTORS. Tres años después, se inicia la implantación de los robots en Europa, especialmente en el área de la fabricación de automóviles. Japón no comenzó a interesarse por el tema hasta 1968.

3ra. Fase: Los laboratorios de la Universidad de Stanford y del MIT acometen, en 1970, la tarea de controlar un robot mediante computador.

4ta. Fase: En el año de 1975, la aplicación del microprocesador, transforma la imagen y las características del robot, hasta entonces grande y caro.

En esta fase que dura desde 1975 hasta 1980, la conjunción de los efectos de la revolución de la microelectrónica y la revitalización de las empresas automovilísticas, produjo un crecimiento acumulativo del parque de robots, cercano al 25%.

5ta. Fase: A partir de 1980, el fuerte impulso en la investigación por parte de las empresas fabricantes de robots, otras auxiliares y diversos departamentos de Universidades de todo el mundo, sobre la informática aplicada y la experimentación de sensores, cada vez más perfeccionados, potencian la configuración del robot inteligente capaz de adaptarse al ambiente y tomar decisiones en tiempo real, adecuada a cada decisión[4].

2.2 Robótica y Automatización

Automatización

La palabra automatización proviene de la contracción de los términos en inglés automatic motivation (motivación automática) y fue usada por primera vez en la década de los años cuarenta por un ingeniero de la Ford Motor Company para describir la operación colectiva de muchas máquinas interconectadas en su planta de Detroit. Las máquinas podían fresar, perforar, rectificar y terminar un monoblock, dejando el producto terminado al final de la línea.

Definición de robot.

Las palabras claves que distinguen a los robots de otras máquinas son “manipulador” y “reprogramable”.

La manipulación es el acto de sujetar un objeto y cambiar su posición y orientación en el espacio, la palabra reprogramable es la capacidad de poder tomar sus propias decisiones, es decir pueden relacionarse con el medio que los rodea. La capacidad de tomar sus propias decisiones dependerá de que tan compleja sea la programación[6].

La Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C. define al robot como:

Es una máquina mecatrónica con la habilidad de tener cierta autonomía, capaz de reproducir actividades previamente programadas y reaccionar a las condiciones del medio a través de la valoración de sus condiciones internas y externas.

La mecatrónica la define como:

Es una disciplina que combina diversas actividades interdisciplinarias del conocimiento, entre las que se encuentran la Ingeniería Mecánica, la Ingeniería Electrónica y los Sistemas Computacionales, su propósito es crear, mejorar, armonizar o perfeccionar productos o procesos[7].

2.2.1 Robots Móviles

Existen muchos casos en los que es necesario usar un robot móvil. En los sistemas de manufactura flexible (FMS), además de crear máquinas flexibles para el ensamble, el maquinado, etc., es igualmente importante que exista un medio flexible de transporte entre los distintos procesos de producción. El equipo fijo, como los rodillos, bandas y bandas transportadoras elevadas, es inflexible y cambiarlo puede resultar en extremo costoso si llegara a ser necesario cambiar la distribución de las máquinas y rutas de transporte.

Además de los FMS existen muchas otras aplicaciones potenciales para los robots móviles: como el robot bombero que puede llegar al núcleo de un incendio.

Métodos de soporte: ruedas y rieles

La rueda esta bien establecida como método de soporte para los vehículos. Disipa poca energía, particularmente en el caso de las ferrovías en donde la rueda y el riel son fuertes y lisos. En los sistemas robot, en los que las rutas están programadas con anterioridad y los pisos son parejos, es muy común el uso de llantas duras. Con dirección en todas las ruedas se provee un máximo de maniobrabilidad, con lo que se permite al robot moverse en ángulos rectos con respecto a una ruta dada y girar sobre su centro de gravedad. Esto es particularmente útil para el desplazamiento en corredores y otras áreas restringidas.

Al programar un vehículo robot se utiliza un transductor, generalmente un codificador óptico, para contar el número de rotaciones de la rueda. Por supuesto, cuando no existe deslizamiento, lo anterior suministra una medida de la posición del vehículo. Sin embargo, si ocurre un deslizamiento, se pierde la correspondencia entre la rotación de la rueda y la posición del vehículo y resulta necesario incluir una forma de acción correctiva. Esto puede lograrse usando un giroscopio para detectar la dirección del movimiento del vehículo. En la figura 2.1 se muestra una rueda subiendo un escalón.

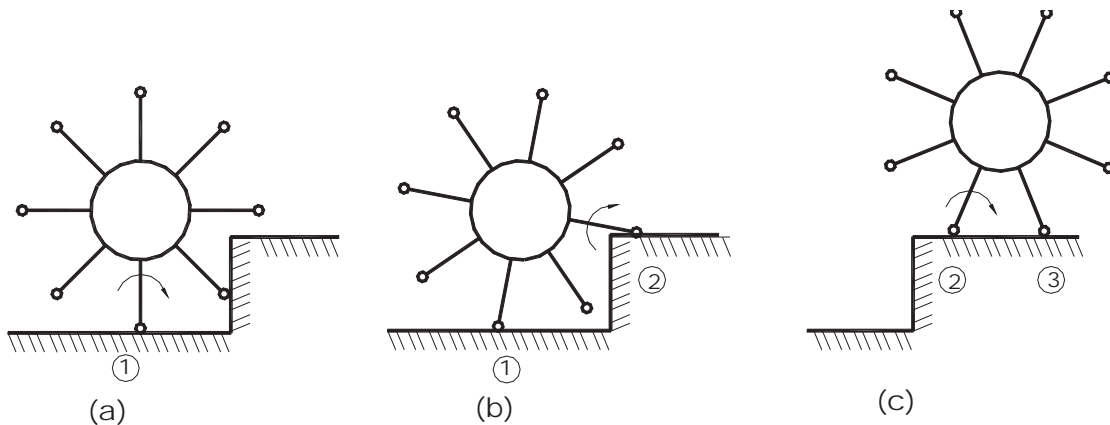


Fig. 2.1 La rueda sin rin al subir un escalón.

Máquinas caminantes

Las máquinas caminantes ofrecen varias ventajas sobre los vehículos comunes con ruedas. Mientras que las ruedas deben restringirse a superficies uniformes comparativamente planas, los vehículos con patas pueden atravesar terrenos disparejos con un mínimo de balanceos y sacudidas. Son capaces de maniobrar en espacios confinados dentro de edificios y de subir escaleras y transportar cargas pesadas sobre terrenos suaves.

Es por ello que actualmente existe gran interés en el diseño de máquinas caminantes para ayudar a personas incapacitadas y para destinarlas a usos industriales, agrícolas y militares. Su complejidad mecánica y sus problemas de control han restringido hasta ahora los desarrollos al laboratorio pero, a pesar de ello, son muchas las ventajas que pueden obtenerse de ellas y la investigación continúa. En la figura 2.2 se muestra robot con patas[6].

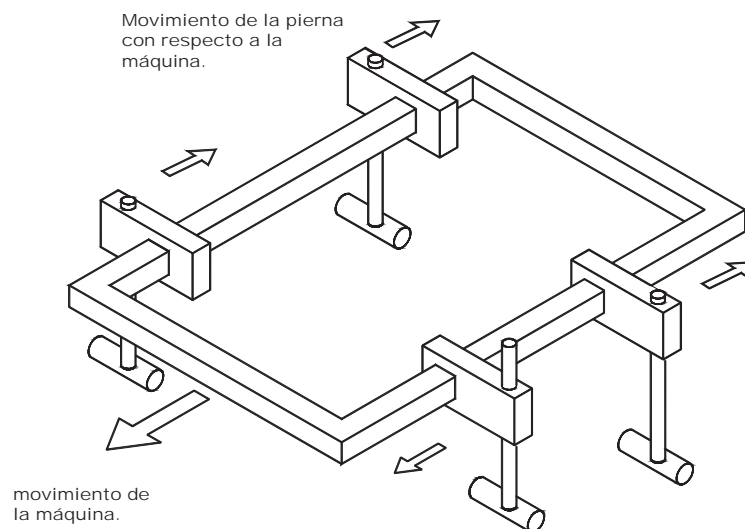


Fig. 2.2 Actuadores independientes para la propulsión y el Levantamiento de las patas.

2.3 Descripción de robot

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como en el empleo de servos en

bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots, que se citan a continuación:

1. Manipuladores

Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos, de los siguientes modos:

- a) Manual.- Cuando el operario controla directamente la tarea del manipulador.
- b) De secuencia fija.- Cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente.
- c) De secuencia variable.- Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

Existen muchas operaciones básicas que pueden ser realizadas óptimamente mediante manipuladores, por lo que se debe considerar seriamente el empleo de estos dispositivos, cuando las funciones de trabajo sean sencillas y repetidas.

2. Robots de repetición o aprendizaje

Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. En este tipo de robots, el operario es la fase de enseñanza, se vale de un dispositivo portátil de programación con diversos pulsadores o teclas, o bien, de joysticks.

Los robots de aprendizaje son los más conocidos, hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de “ gestual “.

3. Robots con control por computador

Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por un computador, que habitualmente suele ser un microordenador.

En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la máquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por computador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando sólo el terminal del computador, no

el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea “ off-line ”, es decir, sin la intervención del manipulador.

Las grandes ventajas que ofrecen este tipo de robots, hacen que se vayan imponiendo en el mercado rápidamente, lo que exige la preparación urgente de personal cualificado, capaz de desarrollar programas similares a los de tipo informático.

3. Robots inteligentes

Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea, a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (autoprogramables).

De momento, son muy poco conocidos en el mercado y se hallan en fase experimental, en la que se esfuerzan los grupos investigadores por potenciarles y hacerles más efectivos.

La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más se están estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.

5. micro-robots

Con fines educacionales, de entrenamiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots, a un precio muy accesible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.

La definición del “ robot industrial “ y consecuentemente su clasificación variará con el progreso y lo que hoy se considera un robot avanzado, pasará a ser un recuerdo histórico, como ha sucedido con las computadoras[6].

4. Nano-robots

El término “nanotecnología” es utilizado para describir cualquier cosa medida en una escala nano (1/ 1000 micras). La meta y las promesas fabulosas de esta ciencia emergente fueron por primera vez descritas en el libro de K. Eric Drexler “ Engines of creation” en 1986[8].

Su aplicación es en varios campos como: medicina, sistemas de potencia y seguridad nacional. En 1999, el profesor del laboratorio de Seeman, anuncio el desarrollo de una máquina construida por moléculas de DNA, la cual tiene 2 brazos rígidos que pueden ser rotados desde posiciones fijas añadiendo una solución química[9].

ESTRUCTURA DE UN ROBOT INDUSTRIAL

La idea común que se tiene de un robot industrial, es la de un brazo mecánico articulado, pero este elemento no es más que una parte de lo que se considera técnicamente como un sistema de robot industrial.

Un sistema de robot industrial consta de las siguientes partes:

1. Manipulador o sistema móvil.
2. Controlador.
3. Elementos motrices o actuadores.
4. Elemento terminal. Herramienta o aprehensor.
5. Sensores de información en los robots inteligentes.

Por último, al robot industrial se le engloba dentro de la arquitectura de la célula de fabricación flexible, en la que se combinan dispositivos que configuran un núcleo básico de producción.

Características más relevantes propias de los robots

Grados de libertad

Son los movimientos independientes que se precisan para determinar la posición y la orientación del elemento terminal del manipulador.

En la figura 2.4 se muestra el esquema de un robot de estructura moderna con 6 grados de libertad; tres de ellos determinan la posición en el espacio del aprehensor (q_1 , q_2 y q_3) y los otros tres, la orientación del mismo (q_4 , q_5 y q_6).

Un mayor número de grados de libertad conlleva un aumento de la flexibilidad en el posicionamiento del elemento terminal. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales

requieren 6 grados de libertad, como las de soldadura y mecanizado, otras más complejas exigen un número mayor, tal es el caso en las labores de montaje.

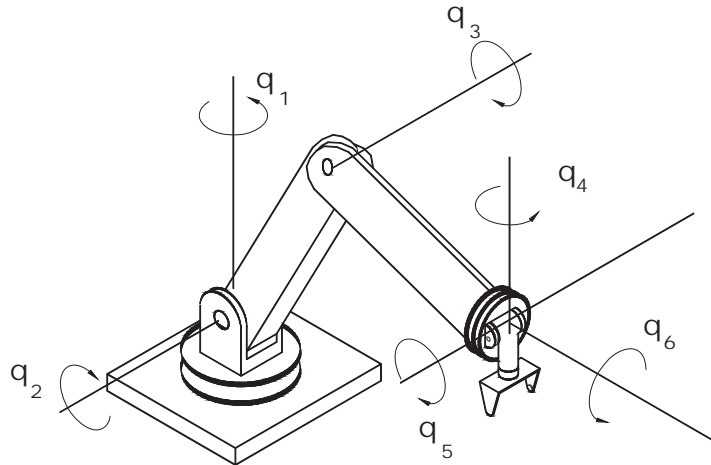


Fig. 2.4 Robot con 6 grados de libertad.

Tareas más sencillas y con movimientos más limitados como la pintura y paletización suelen exigir 4 ó 5 grados de libertad.

Zonas de trabajo y dimensiones del manipulador

Las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo del robot, característica fundamental en las fases de selección del modelo adecuado.

La zona de trabajo se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal en cada una de ellas. Por ejemplo, la zona en que se puede orientar horizontalmente el elemento terminal (aprehensor o herramienta), es diferente a la que permite orientarlo verticalmente o con el determinado ángulo de inclinación.

Capacidad de carga

El peso, en kilogramos, que puede transportar la garra del manipulador recibe el nombre de capacidad de carga. Este dato lo proporcionan los fabricantes, incluyendo el peso de la propia garra.

La capacidad de carga es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección del robot, según la tarea que se destine. En soldadura y mecanizado es común precisar capacidades de carga superiores a los 50 Kg.

Precisión en la repetibilidad

Esta magnitud establece el grado de exactitud en la repetición de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.

Dependiendo del trabajo que se deba realizar, la precisión en la repetibilidad de los movimientos es mayor o menor. Así por ejemplo, en labores de ensamblaje de piezas, dicha característica ha de ser menor que ± 0.1 mm. En soldadura, pintura y manipulación de piezas, la precisión en la repetibilidad está comprendida entre 1 y 3 mm y en las operaciones de mecanizado, la precisión ha de ser menor de 1 mm.

Velocidad

En muchas ocasiones, una velocidad de trabajo elevada, aumenta extraordinariamente el rendimiento del robot, por lo que esta magnitud se valora considerablemente en la elección del mismo.

Coordenadas de los movimientos

La estructura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, que da origen al establecimiento de los parámetros que hay que conocer para definir la posición y orientación del elemento terminal. Fundamentalmente, existen cuatro estructuras clásicas en los manipuladores, que se relacionan con los correspondientes modelos de coordenadas en el espacio y que son los que muestra la figura 2.4 y se citan a continuación:

- Cartesianas.
- Cilíndricas.
- Polares.
- Angulares.

Tipo de actuadores

Los elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo hidráulico, neumático o eléctrico.

Los actuadores de tipo hidráulico se destinan a tareas que requieren una gran potencia y grandes capacidades de carga. Dado el tipo de energía que emplean, se construyen con mecánica de precisión y su costo es elevado.

La energía neumática dota a sus actuadores de una gran velocidad de respuesta, junto a un bajo costo, pero su empleo está siendo sustituido por elementos eléctricos.

Los motores eléctricos que cubren la gama de media y baja potencia, acaparan el campo de la robótica, por su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.

Programabilidad

La inclusión del controlador de tipo microelectrónico en los robots industriales, permite la programación del robot de muy diversas formas.

En general, los modernos sistemas de robots admiten la programación manual, mediante una pistola o módulo de programación y la programación textual, usando un terminal pantalla-teclado y un lenguaje.

La programación gestual y textual, controlan diversos aspectos del funcionamiento del manipulador:

- Control de la velocidad y la aceleración.
- Saltos de programa condicionales.
- Temporizaciones y pausas.
- Edición, modificación, depuración y ampliación de programas.
- Funciones de seguridad.
- Funciones de sincronización con otras máquinas.
- Uso de lenguajes específicos de robótica.

Capacidad de memoria

El tipo de memoria utilizado y su capacidad de almacenamiento se encuentran íntimamente relacionados con la programabilidad y el control del robot.

Las condiciones hostiles en las que se suele desarrollar el trabajo del robot, favorecen el empleo de sistemas de memoria de tecnología avanzada, como el de las burbujas magnéticas[6].

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el diseño y la fabricación del robot y el análisis de alternativas de trenes de engranaje.

3.1 Requerimientos

Los requerimientos para un adecuado funcionamiento del robot son:

- a) Debe escalar los tanques de almacenamiento ferromagnéticos.
- b) El robot debe ser confiable para tomar las lecturas. Debe permanecer estático al momento de tomar las lecturas.
- c) Las dimensiones máximas deben ser 350 x 250 x 250 (mm).
- d) Peso máximo del robot 7.5 Kg.
- e) La velocidad de desplazamiento debe ser de hasta 7 cm/s.
- f) El robot puede ser manipulado desde tierra, con control remoto. (Este inciso queda fuera del alcance de esta tesis).

3.2 Diseño Preliminar

El problema inicial para el desarrollo del robot, fue encontrar la forma más eficiente para lograr que escale el tanque. Como los tanques de almacenamiento son de ferromagnéticos, las alternativas consideradas fueron:

- 1). Utilizar electroimanes.
- 2). Utilizar imanes permanentes.
- 3). Utilizar ventosas.

En la utilización de electroimanes, los principales problemas son los siguientes:

- a) El tamaño de las ruedas para generar el magnetismo necesario para lograr que el robot se adhiera al tanque y no se resbale o desprendan.
- b) El cableado requerido para accionar los electroimanes, ya que incrementa el peso del robot y además se debe utilizar corriente alterna.

La segunda alternativa, de utilizar imanes permanentes, presenta las siguientes ventajas:

- a) Son comerciales, es decir son fáciles de conseguir.

b) No requieren energía eléctrica para su funcionamiento.

La alternativa de utilizar ventosas se eliminó por el problema que presenta el polvo y la corrosión del tanque. Debido a que estos elementos obstruyen muy fácilmente las ventosas.

Una vez determinado el sistema de adherencia se hizo un diseño conceptual del robot.

La figura 3.1 muestra el diseño conceptual del robot.

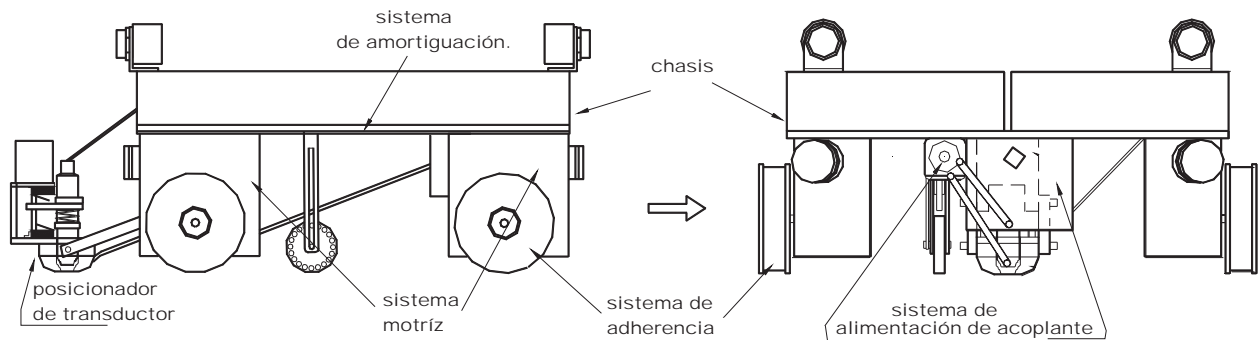


Fig. 3.1 diseño preliminar del robot.

La parte mecánica se dividió en cinco sistemas:

- a) Sistema de adherencia.
- b) Sistema de tracción.
- c) Sistema de posicionador del transductor.
- d) Chasis y sistema de amortiguación.
- e) Sistema de alimentación del transductor.

3.3- Cálculos

El primer punto a evaluar fue el sistema de adherencia. Este sistema se considera el más importante, ya que de los resultados de esta evaluación depende el éxito de la fabricación del robot.

a) Sistema de adherencia.

La evaluación es muy simple, se construyó un modelo de madera con 4 imanes. El modelo se colocó en una placa ferromagnética y por medio de un dinamómetro se determinaron los valores de adherencia y resistencia al deslizamiento.

La fuerza de adhesión se define como la fuerza máxima que soporta el robot antes de desprenderse de la superficie adherida.

La resistencia al deslizamiento se define como la fuerza máxima que soporta el robot antes de deslizarse sobre la superficie adherida. En la figura 3.2 se muestra la prueba para el cálculo de la fuerza de adherencia, una prueba similar se utilizó para el cálculo de resistencia al deslizamiento.

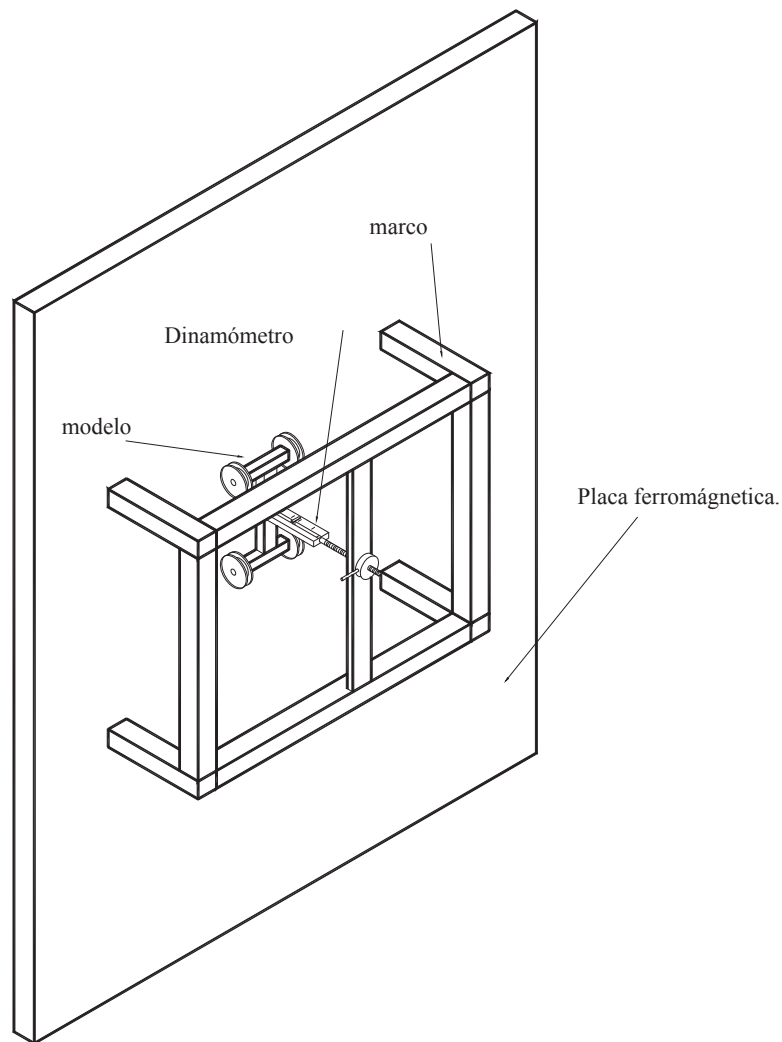


Fig. 3.2 Prueba de fuerza de adherencia para modelo de 4 ruedas.

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Fuerza de adhesión: 16 Kg.

Resistencia al deslizamiento: 12 Kg.

Como la fuerza se obtuvo aplicando la tensión en el centroide del modelo, la fuerza promedio de adherencia y resistencia al deslizamiento por rueda es de 4 y 3 Kg respectivamente.

3.3.1 Determinación del número de ruedas del robot.

Una vez calculados los parámetros anteriores, se puede calcular el número de ruedas necesario para que el robot trabaje eficientemente. Antes de calcular el número de ruedas es necesario conocer el peso del robot.

Los pesos de las partes 1,2,5,10 que se indican a continuación son de partes que ya se tenían en existencia, de las restantes se elaboraron prototipos aproximados al robot conceptualizado.

En la siguiente tabla 3.1 se muestran los pesos estimados del robot. Los valores de \bar{z} se obtuvieron de la figura 3.5 b.

Pieza	Descripción	Cantidad	Peso unitario (gr)	\bar{z} (mm)	Peso total (gr)	$\bar{z} \times \text{peso}$ (mm x gr)
1	Ruedas	4	436	37	1744	64528
2	Cajas de transmisión	4	358	51.5	1432	73748
3	Compartimento tarjeta digital y pilas	2	190	116.5	380	44270
4	Compartimento tarjeta potencia y control remoto	2	210	116.5	420	48930
5	Bomba de agua	1	250	82	250	20500
6	Contenedor de agua	1	420	60.5	420	25410
7	Soporte para sistema transductor	1	150	66.5	150	9975
8	Sistema transductor	1	275	17.5	275	4812.5
9	Sensores	4	160	150	640	96000
10	Cables y plataforma	1	1750	91.5	1750	160125
TOTAL					7461	548298.5

Tabla 3.1 Pesos estimados y centros de gravedad de cada parte.

Como el peso estimado es de 7.5 kg aproximadamente y la fuerza de adherencia obtenida en el laboratorio es de 16 Kg, no existe problema en este punto. La resistencia al deslizamiento es de 12 Kg, como puede observarse, también este valor es mayor al peso del robot.

Como se pretende fabricar un robot que sea lo más ligero posible, analizaremos la alternativa de reducir el número de ruedas y al mismo tiempo valoraremos que pasa si durante el trayecto una o varias ruedas se despegan.

En la tabla 3.2 se muestra el número de ruedas y las fuerzas de adherencia y deslizamiento individual y en conjunto que producen las ruedas magnéticas.

No. Ruedas	Fuerza promedio por rueda (Kg)		Fuerza total (Kg)	
	Adherencia	Deslizamiento	Adherencia	Deslizamiento
1	4	3	4	3
2	4	3	8	6
3	4	3	12	9
4	4	3	16	12

Tabla 3.2 Análisis de la fuerza de adherencia y resistencia al deslizamiento para un robot con diferente número de ruedas.

Como puede observarse fácilmente en la tabla 3.2, para un robot con 1 ó 2 ruedas, los valores de resistencia al deslizamiento son menores que el peso del robot, con respecto a la fuerza de adherencia en el robot de dos ruedas, apenas rebasa el valor del peso del robot, por lo que estas alternativas quedan descartadas.

Para un robot de 3 ruedas que se desplace en un tanque, al brincar la soldadura una rueda puede quedar volando y por lo tanto el peso quedaría soportado en 2 ruedas, de acuerdo al análisis anterior, este robot tendría mucha inestabilidad. Para el robot de 4 ruedas, si se llegará a despegar una rueda, los valores de adherencia y deslizamiento son mayores que los del peso del robot, por lo que esta alternativa es la más indicada. Existe la posibilidad de que 2 ruedas se despeguen, por lo que es necesario trabajar en un sistema de amortiguación que elimine o

minimice al máximo esta posibilidad. Si se incrementa el número de ruedas la confiabilidad del robot se incrementa, pero se vuelve más complejo tanto mecánica como electrónicamente. Como conclusión el robot de 4 ruedas es confiable, pero debe contar con un sistema de amortiguación que absorba la diferencia de alturas y evite que las ruedas se despeguen.

3.3.2 Cálculo de velocidad angular de salida en ruedas.

Para especificar la velocidad de desplazamiento a la cual debe moverse el robot, se revisaron las características de los productos comerciales que realizan una actividad similar al robot. Se definió una velocidad de diseño de 7 cm/s y un diámetro de rueda de 75 mm.

Para calcular la velocidad angular en [rpm] de salida necesaria para cumplir la especificación se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = \omega r \quad (3.1)$$

Donde:

V = velocidad lineal de la rueda.

ω = número de revoluciones rueda (rpm).

r = radio de la rueda.

Se calcula la velocidad angular máxima de salida requerida (rpm):

$$7 \text{ cm /seg} = \omega (7.5 \text{ cm})$$
$$\omega = (7 \times 60) / (7.5 \times \pi) \text{ rpm} = 17.825 \text{ rpm.}$$

La rueda debe girar a una velocidad angular de 17.825 rpm para que se desplace a la velocidad de diseño.

3.3.3 Selección de tren de engranaje

Al definir las especificaciones del robot, se menciona que debe permanecer estático al momento de realizar la lectura y que debe mantener esta posición aun cuando esté desenergizado, esto para evitar que el robot se precipite al suelo.

Para el diseño del tren de engranaje se analizaron 2 alternativas:

La primera alternativa consiste en la utilización de sinfín-helicoidal y engranes rectos.

En la figura 3.3 se muestra el tren de engranaje con el número de dientes y velocidades angulares de cada uno de los engranes.

Para el cálculo de las velocidades angulares se utilizó la siguiente fórmula:

$$\omega_1 N_1 = \omega_2 N_2 \quad (3.2)$$

Donde:

ω_1 = Velocidad angular de engrane motriz.

N_1 = Número de dientes del engrane motriz.

ω_2 = Velocidad angular del engrane accionado.

N_2 = Número de dientes del engrane accionado.

La velocidad angular de la rueda es la misma que la velocidad angular del engrane #4. Como puede observarse esta velocidad es mucho mayor a la velocidad de diseño y además el radio del engrane es mayor que el radio de la rueda. Para poder utilizar este tipo de engranaje, primero tenemos que reducir el diámetro de los engranes y por lo tanto el número de dientes, lo cual aumenta la velocidad angular de salida. Otra alternativa es reducir la velocidad angular del motor, lo cual nos lleva a pérdida de potencia. Esta alternativa no cumple satisfactoriamente la especificación de salida, por lo que se hace necesario el uso de otra alternativa.

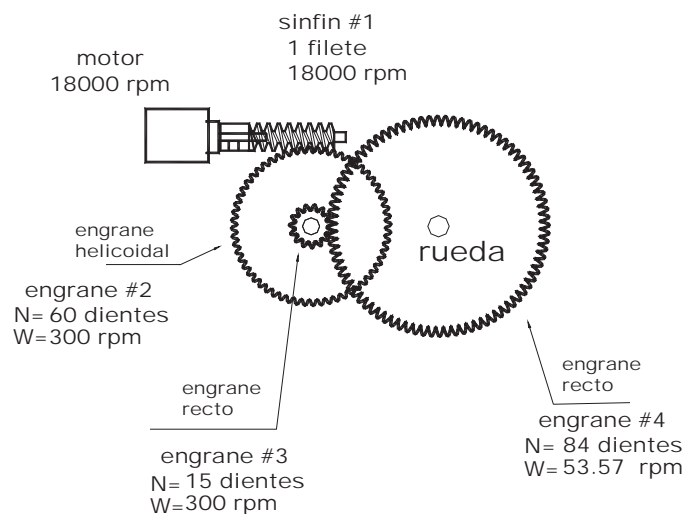


Fig. 3.3 tren de engranaje sinfín-recto.

Segunda alternativa: tren de engrane doble sinfín.

En la figura 3.4 se muestra el tren de engranaje seleccionado como segunda alternativa.

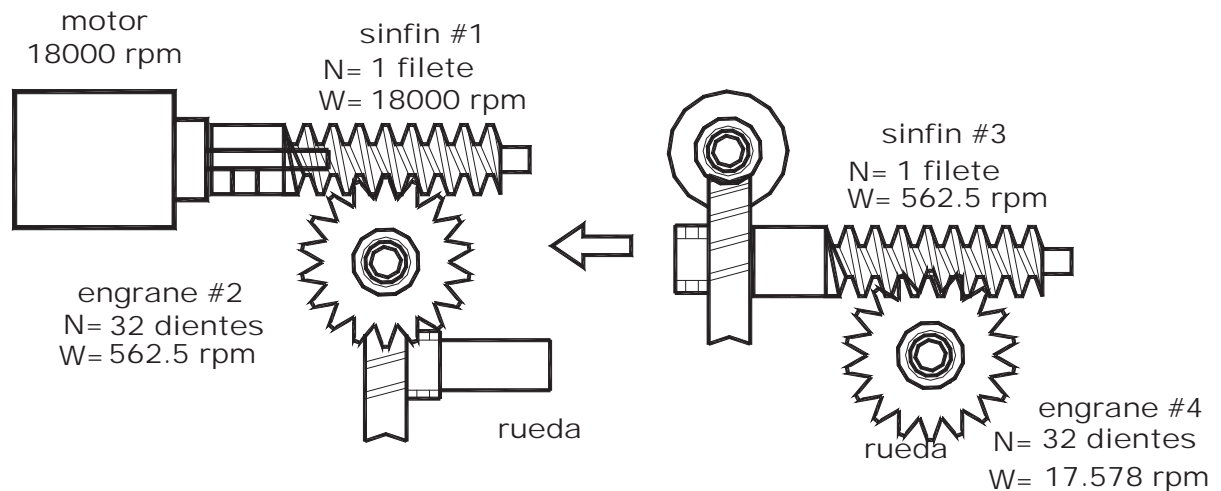


Fig. 3.4 tren de engrane doble sinfín.

De acuerdo a los datos de velocidad angular de salida en la figura 3.4, la velocidad angular del engrane #4 es ligeramente menor a la de diseño, pero es una excelente aproximación a la velocidad angular que se necesita en la rueda.

Otro punto importante de este tren de engranaje es que el peso del robot lo soporta el sinfín #3, evitando que el motor cargue con el peso del robot. Como puede observarse esta alternativa parece la más favorable. Ahora se necesita evaluar el par de torsión de salida, para verificar que es mayor al requerido para mover el robot.

3.3.3.1 Cálculo del par de torsión generado por el sistema de tracción

Primero debemos calcular el par de torsión que soporta cada rueda en el robot. En este punto primero debemos localizar el centro de gravedad del robot. Con este valor podemos calcular el momento que produce el peso en los ejes de las ruedas debido al desfaseamiento. En la figura 3.5 se muestra el robot y la vista superior cuando va ascendiendo, esto para calcular el centro de gravedad con respecto al eje Z.

De acuerdo a la tabla 3.1 de pesos estimados, se puede determinar el centro de gravedad con respecto al eje z.

$$\bar{z} = \frac{548298.5}{7461} = 73.488 \text{ mm}$$

Como las flechas de las ruedas son las que soportan el peso del robot que se encuentran a una altura de 37 mm con respecto a la superficie, existe una diferencia de altura entre el centro de gravedad en el eje z con respecto a las flechas de las cajas de transmisión, esto le provoca un momento igual a:

$$\text{*Desfasamiento} = 73.488 - 37 = 36.488 \text{ mm} = 0.036488 \text{ m}$$

El par torsor se calcula de acuerdo a:

Par torsor = Fza. X desfasamiento = 1.875 kg x 0.036488 m = 0.068415 Kgm = 0.6711 Nm, éste par se suma al anterior para determinar el par torsor que debe suministrar el tren de engranaje seleccionado.

Cálculo del torsor generado por sistema de engranaje

Una vez seleccionado el tren de engranaje es muy importante calcular el par de torsión de salida para compararlo con el par de torsión que se requiere para desplazar el robot. En la figura 3.6 se muestran las fuerzas que actúan en el sistema de engranes sinfn.

La ecuación (3.3) permiten obtener el par de torsión constante que actúa en una barra eje cuando se aplica la potencia dada.

Cuando la velocidad angular ω se da en rpm:

$$T = 9540 P / \omega \quad (3.3)$$

donde:

T = par torsor. (Nm).

P = potencia. (Kw).

ω = velocidad angular(rpm).

Cálculo de la potencia del motor utilizado, de la ec. (3.3) se despeja P.

* El desfasamiento se define como la distancia entre el eje y el centro de gravedad.

$$P = T \omega / 9540 \quad (3.4)$$

De las especificaciones del motor:

$$T = 240 \text{ grcm}; T = 240 \text{ grcm} = 0.00240 \text{ Kgm} = 0.023544 \text{ Nm}$$

$$\omega = 18\,000 \text{ rpm.}$$

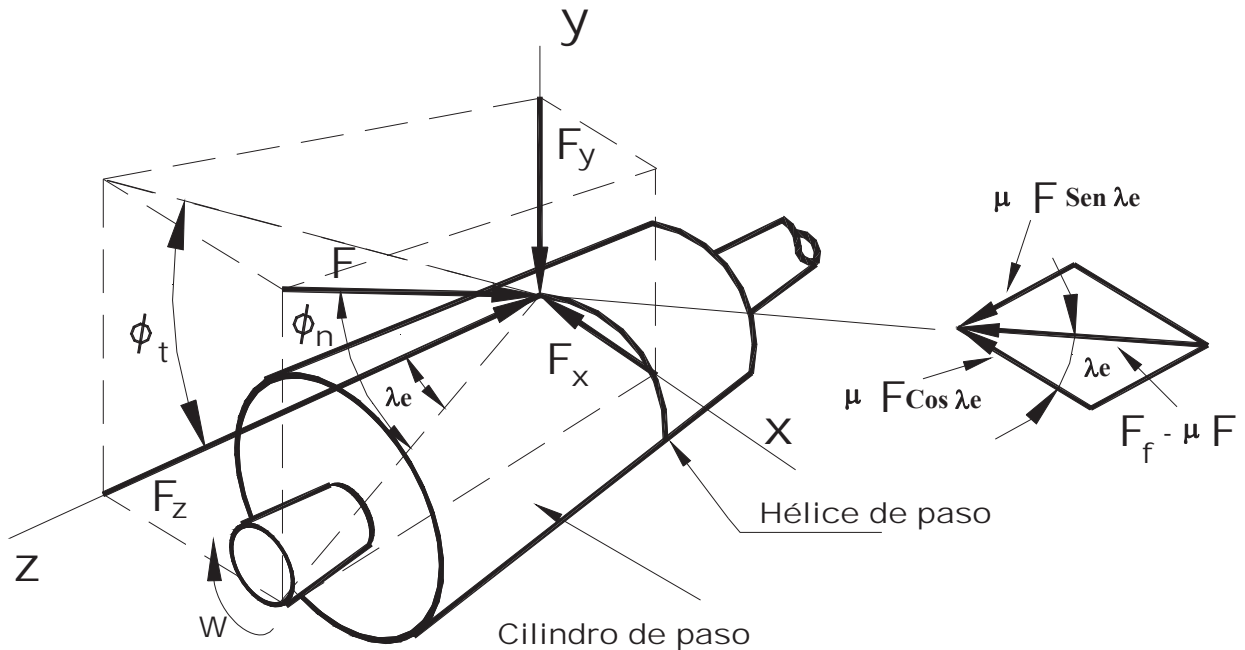


Fig. 3.6 Fuerzas que actúan en el gusano.

Sustituyendo valores en la ec. (3.4)

$$P = (0.023544)(18000)/9540 = 0.04442 \text{ Kw}$$

Para calcular las fuerzas que actúan en el gusano, se parte de la siguiente fórmula:

$$F_{wt} = P/V_w \quad (3.5)$$

Esta fuerza actúa en la dirección negativa del eje X, $F_{wt} = F_x$.

Donde:

F_{wt} = Fuerza que actúa en la dirección negativa del eje X.

P = potencia.

V_w = Velocidad lineal del gusano.

Para el cálculo de la velocidad lineal del gusano se utiliza:

$$V_w = (\pi(d_w)(w_w)) \quad (3.6)$$

Donde:

d_w = Diámetro primitivo del gusano.

w_w = Velocidad angular del gusano.

Sustituyendo valores en ec. (3.6)

$$V_w = (\pi(d_w)(w)) = \pi(7.0)(18000) = 395840.67 \text{ mm/min} = 6.5973 \text{ m/seg} = 1298.68 \text{ ft/min}$$

Sustituyendo valores en ec. (3.5)

$$F_{wt} = (44.42) / 6.5973 = 6.733 \text{ N}$$

Como F_{wt} actúa en la dirección de X, $F_{wt} = F_x$.

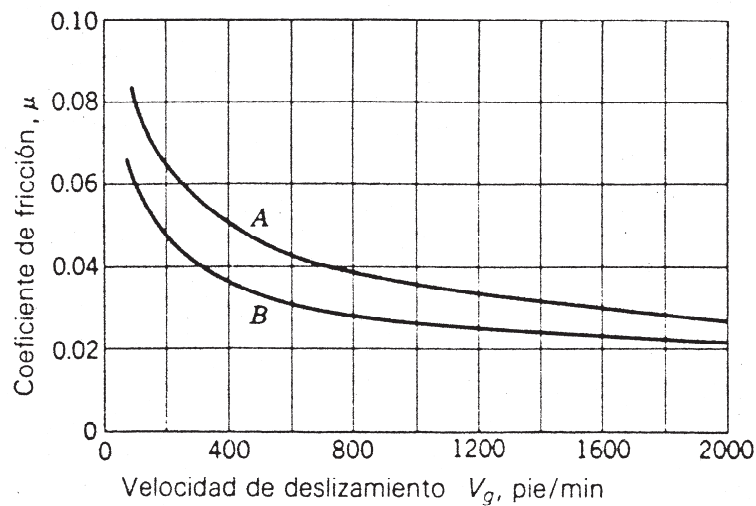


Fig .3.7 Valores representativos del coeficiente de fricción para mecanismos de sinfín basados en la existencia de una buena lubricación. La curva B es para materiales de alta calidad.

La curva A se emplea cuando es de esperarse mayor fricción.

Para encontrar la fuerza resultante en el gusano se utiliza la siguiente ecuación:

$$F = F_x / (\cos \phi_n \operatorname{sen} \lambda_e + \mu \cos \lambda_e) \quad (3.7)$$

Donde :

F= Fuerza resultante en el gusano.

F_x = Fuerza que actúa en el eje x.

λ_e = Ángulo de avance.

μ = Coeficiente de fricción.

ϕ_n = Ángulo de presión normal.

Para el cálculo de μ se utiliza la siguiente fórmula y gráfica de la figura 3.7:

$$V_g = V_w / \cos \lambda_e \quad (3.8)$$

V_g = Velocidad de deslizamiento.

λ_e = Ángulo de avance.

Sustituyendo valores en ec. (3.8)

$V_g = V_w / \cos \lambda_e = 1298.68 / \cos 15^\circ = 1344.49$ ft/min; con este valor se traslada a la fig. 3.3 y se obtiene $\mu = 0.025$ de la curva B.

Para obtener el ángulo de presión normal se utiliza la siguiente fórmula.

$$\phi_n = \tan^{-1}(\tan \phi \cos \lambda_e) \quad (3.9)$$

De la tabla 3.4 se eligen:

$\phi = 20^\circ$ y $\lambda_e = 15^\circ$ y se calcula ϕ_n .

$$\phi_n = \tan^{-1}(\tan 20^\circ \cos 15^\circ) = 19.37^\circ$$

Sustituyendo valores en ec. (3.7)

$$F = F_x / (\cos \phi_n \sin \lambda_e + \mu \cos \lambda_e) = 6.733 / (\cos 19.37^\circ \sin 15^\circ + 0.025 \cos 15^\circ) \\ = 25.0934 \text{ N}$$

Para el cálculo de la fuerza a lo largo del eje Z se utiliza:

$$F_z = F(\cos \phi_n \cos \lambda_e - \mu \sin \lambda_e) \quad (3.10)$$

Sustituyendo valores:

$$F_z = F(\cos \phi_n \cos \lambda_e - \mu \sin \lambda_e) = 25.0934 (\cos 19.37^\circ \cos 15^\circ - 0.025 \sin 15^\circ) \\ = 22.7040 \text{ N}$$

El torsor del engrane se calcula multiplicando la fuerza generada en el eje Z, por la distancia al eje.

$$T = 22.7040 \text{ N} \times 0.016 \text{ m} = 0.3632 \text{ Nm}$$

Este torsor obtenido se aplica ahora para volver a calcular la potencia generada y así obtener el par torsor a la salida.

La velocidad angular del gusano #2, $\omega = 562.5$ RPM

De la ec. (3.4)

$$P = T \omega / 9540 = (0.3632)(562.5) / 9540 = 0.02141 \text{ Kw}$$

De la ec. (3.5)

$$F_{wt} = P/V_w$$

Para calcular $V_w =$ Velocidad lineal del gusano, se utiliza ec. (3.6)

$$V_w = (\pi(d_w)(\omega)) = \pi(7)(562.5) = 12370.02 \text{ mm/min} = 0.20616 \text{ m/seg} = 40.584 \text{ ft/min.}$$

Susutituyendo valores en ec. (3.5)

$$F_{wt} = 21.41 / 0.20616 = 103.8513 \text{ N}$$

Velocidad de deslizamiento de ec. (3.8)

$$V_g = V_w / \cos \lambda_e = 40.584 / \cos 15 = 42.015 \text{ ft/min.}$$

$\mu = 0.065$ de acuerdo a gráfica fig. 3.3 curva B.

Cálculo de la fuerza resultante, ec. (3.7)

$$\begin{aligned} F &= F_x / (\cos \phi_n \sin \lambda_e + \mu \cos \lambda_e) = 103.8513 / (\cos 19.37^\circ \sin 15^\circ + 0.065 \cos 15^\circ) \\ &= 338.3329 \text{ N} \end{aligned}$$

Para cálculo de la fuerza en dirección eje Z, de la ec. (3.10)

$$\begin{aligned} F_z &= F(\cos \phi_n \cos \lambda_e - \mu \sin \lambda_e) = 338.3329 (\cos 19.37^\circ \cos 15^\circ - 0.065 \sin 15^\circ) \\ &= 302.6143 \text{ N} \end{aligned}$$

El torsor del engrane se calcula multiplicando la fuerza generada por la distancia al eje.

$$T = 302.6143 \text{ N} \times 0.016 \text{ m} = 4.8418 \text{ Nm.}$$

El torsor mínimo necesario para mover el robot debe ser 1.3516 Nm y el obtenido con el tren de engranaje es de 4.8418 Nm, por lo que no existe ningún problema con la utilización de este tren de engranaje.

En la figura 3.8 se muestra el diagrama de bloques que ilustra la metodología asociada al diseño de la caja de transmisión.

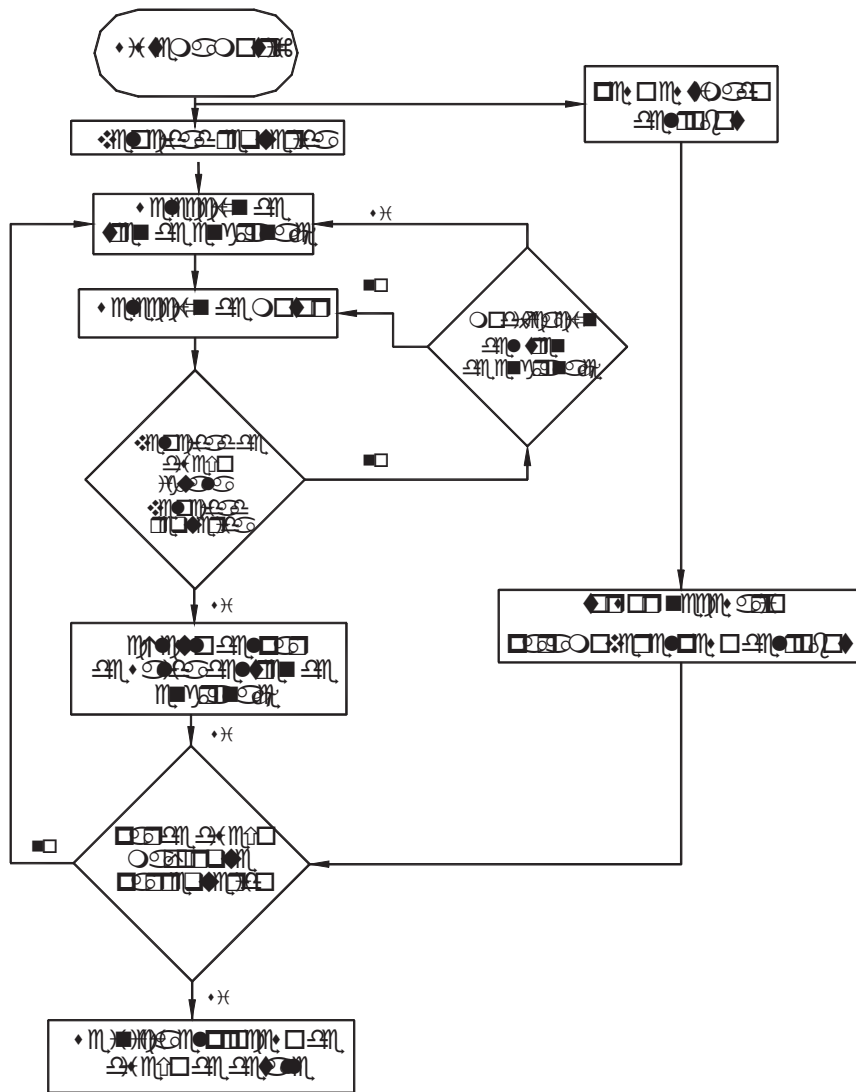


Fig. 3.8 Diagrama de bloques para diseño de sistema motriz del robot.

3.3.4 Diseño del sistema de engranaje

Una vez elegido el tren de engranaje se procede al diseño de cada uno de los engranes. A continuación se incluyen las características sobre engranes rectos y sinfín.

Datos básicos de engranes

Tipos de engranes: Los engranes se agrupan de acuerdo con las formas de dientes, arreglo de los ejes, paso y calidad. Las formas de dientes y arreglos de ejes son como se muestra en la tabla 3.3.

Forma de diente	Arreglo de ejes
Rectos	Paralelos
Helicoidales	Paralelos u oblicuos
Gusano	Oblicuos
Cónicos	En intersección
Hipoidales	Oblicuos

Tabla 3.3 Agrupación de engranes de acuerdo a forma de dientes y arreglo de ejes.

La división de paso son: Grueso (debajo de 20 Pd).

Fino.

Tipo de calidad: Comercial.

De precisión.

Ultra precisión[10].

Para la elección y diseño del sistema de engranaje, se tomaron en cuenta las siguientes restricciones:

- a) El robot debe permanecer estático durante la toma de lecturas.
- b) La velocidad del robot debe ser de hasta 7 cm/seg.

Para lograr la posición estática del robot para la toma de las lecturas durante la trayectoria ascendente o descendente sobre el tanque, existen dos posibilidades:

- 1). Seleccionar un sistema de engranaje compuesto de engranes rectos y mantener los motores energizados para evitar que las ruedas giren.
- 2) Seleccionar un sistema de engranes helicoidales-sinfin, con este sistema se logra que aún cuando los motores se apaguen, las ruedas no giren, porque el sinfín actúa como freno.

Para el primer punto, la desventaja consiste en que la relación de engranaje es muy grande y la rueda queda en voladizo, por lo que esta alternativa se eliminó y se optó por la segunda.

En la figura 3.9 se muestra el sistema que se seleccionó.

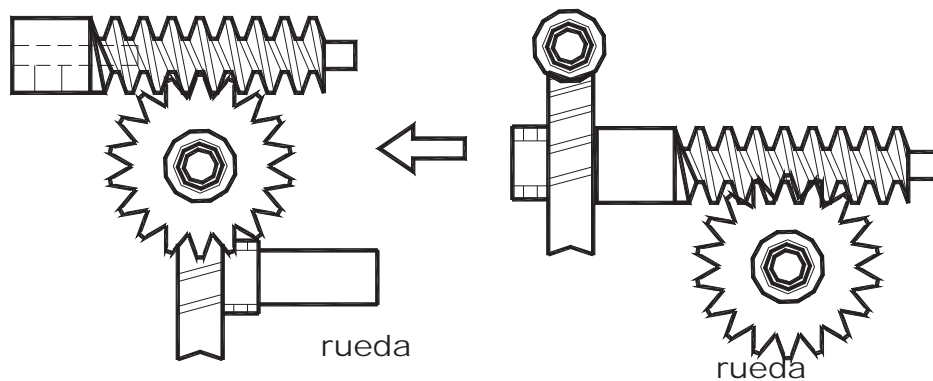


Fig. 3.9 Engranaje de forma de diente gusano (sinfin) y ejes oblicuos (perpendiculares).

Sistema de engranaje.

Engranaje de tornillo sinfin o gusano

El engranaje de tornillo sinfin se usa para obtener reducciones de velocidad entre ejes que hacen un ángulo de 90° uno con respecto al otro.

Con el engranaje de gusano, la relación de velocidad es la relación entre el número de dientes del engrane (o corona) y el número de hilos o filetes en el gusano. Así, un engrane de 30 dientes que engrana con un gusano de un hilo tendrá una relación de velocidad de 1 a 30, es decir; el gusano debe dar 30 revoluciones con objeto de hacer que la corona gire una vez. Para los gusanos de doble hilo, habrá 15 revoluciones del gusano para una del engrane, etc. Altas velocidades se obtienen, así, con engranajes relativamente pequeños.

Los tornillos sin fin de empleo común tienen de una a ocho guías y como podrá verse, no existe relación definida entre el número de guías y el diámetro primitivo del tornillo. Se pueden proyectar con superficies primitivas cilíndricas o bien tener una forma aglobada, tal que el tornillo sin fin abrace o envuelva parcialmente la rueda. En el primer caso, se trata de un tornillo recto y, en el segundo caso de un tornillo hiperbólico.

En la figura 3.10 se ilustran los nombres que se dan a las partes de los tornillos sin fin. Los elementos tienen el mismo sesgo de hélice que los engranes helicoidales cruzados, pero los ángulos de hélice suelen ser completamente diferentes. Generalmente, el ángulo de hélice del tornillo es bastante grande y el de la rueda muy pequeño. Debido a esto, es usual especificar el ángulo de avance λ_e para el gusano y el ángulo de hélice Ψ_G para el engrane, los dos ángulos son iguales cuando se tienen un ángulo entre ejes de 90° . El ángulo de avance de l tornillo es el complemento de su ángulo de hélice, como se indica en la figura 3.10.

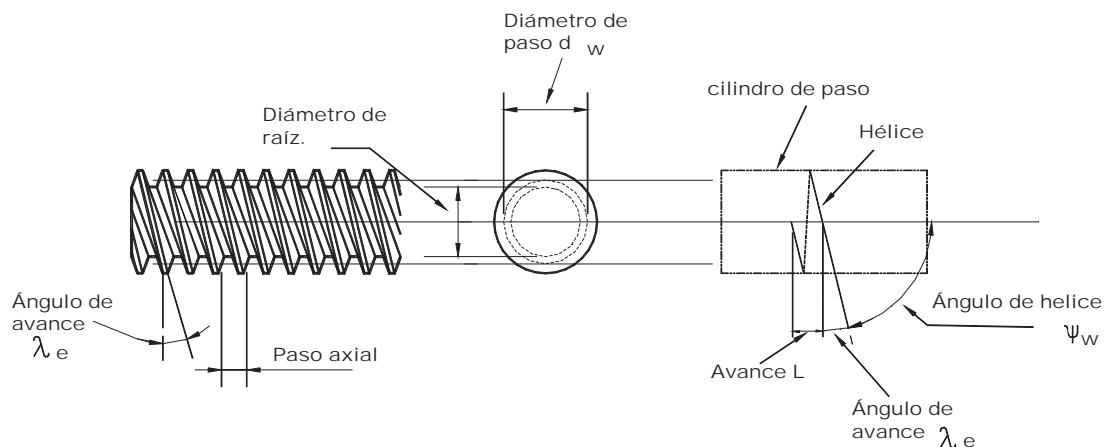


Figura 3.10 Nomenclatura de un mecanismo de tornillo de tipo simple envolvente.

Al especificar el paso en mecanismo de tornillo sin fin se acostumbra enunciar el paso axial P_x del tornillo y el paso circular transversal P_t (a veces llamado simplemente paso circular) del engrane conectado. Estos pasos son iguales cuando el ángulo entre ejes es de 90° . El diámetro de paso del engrane es el diámetro medido sobre un plano que contiene al eje del gusano, es el mismo que los engranes rectos y vale:

$$D_0 = \frac{N_0 P_t}{\pi} \quad (3.11)$$

donde: D_0 = Diámetro de paso del engrane.

N_0 = Número de dientes del engrane.

P_t = Paso circular transversal.

Puesto que no hay relación con el número de dientes, el tornillo sin fin puede tener cualquier diámetro de paso; sin embargo, éste debe ser igual al de paso del cortador utilizado para formar los dientes del engrane del gusano. Por lo general hay que seleccionar el diámetro de paso del sin fin de modo que quede dentro del intervalo:

$$\frac{C^{0.875}}{3.0} \leq d_{w1} \leq \frac{C^{0.875}}{1.7} \quad (3.12)$$

donde C es la distancia entre centros. Estas proporciones dan como resultado la capacidad óptima de potencia del mecanismo.

Ángulo de avance Grados	Ángulo de presión Grados	Adendo a	Dedendo b
0-15	14.5	0.3683 p_x	0.3683 p_x
15-30	20	0.3683 p_x	0.3683 p_x
30-35	25	0.2865 p_x	0.3314 p_x
35-40	25	0.2546 p_x	0.2947 p_x
40-45	30	0.2280 p_x	0.2578 p_x

Tabla 3.4 Ángulos de presión y alturas de diente recomendados para mecanismos de tornillo sin fin.

La forma de dientes para los mecanismos de gusano no ha sido ampliamente estandarizada, quizá porque no ha sido necesario. Los ángulos de presión empleados dependen de los ángulos de avance, y deben ser lo suficiente grandes para evitar el rebaje por corte de los dientes del

engrane en el lado que termina el contacto. Una altura de los dientes satisfactoria, que guarde la proporción correcta con el ángulo de avance, puede obtenerse dando a la altura un valor en proporción al del paso circular axial.

La tabla 3.4 resume lo que se consideraría buena práctica para valores de ángulo de presión y de altura de dientes[12].

Engranés helicoidales

Las ecuaciones básicas para calcular las características de engranes helicoidales en sistema sinfín se pueden utilizar las ecuaciones para engranes rectos, en módulo métrico, estas ecuaciones se encuentran en la tabla 3.5.

Para obtener	A partir de conocidos	Fórmula
Diámetro de paso, D	Módulo, paso diametral	$D = m N$
Paso circular, pc	Módulo, paso diametral	$P_c = m \pi = (D / N) \pi = \pi / P$
Módulo, m	Paso diametral	$m = 25.4 / P$
No. De dientes, N	Módulo y diámetro de paso	$N = D / m$
Adendo, a	Módulo	$a = m$
Dedendo, b	Módulo	$b = 1.25 m$
Diámetro exterior, Do	Módulo y diámetro de paso o número de dientes	$D_o = D + 2 m = m (N + 2)$
Diámetro de fondo, Dr	Diámetro de paso y modulo	$D_r = D - 2.5 m$
Espesor del diente en el diámetro de paso normal, Tstd	Módulo	$T_{std} = 2\pi / m$
Distancia entre centros	Módulo y diámetros de paso	$C = (m (N_1 + N_2)) / 2$ $= (D_1 + D_2) / 2$

NOTA: Estas fórmulas son aplicables a engranes helicoidales.

Tabla 3.5 Fórmulas para diseño de engranajes rectos.

Características de engranes rectos

Definiciones:

Paso diametral (Pd): Es la relación entre el número de dientes en el engrane con el diámetro del círculo de paso D, medido en pulgadas, ver figura 3.11.

$$Pd = N / D \quad (3.13)$$

Paso circular (p): Es la medida lineal en pulgadas a lo largo del círculo de paso entre puntos correspondientes de dientes adyacentes. Por esta definición:

$$Pd p = \pi \quad (3.14)$$

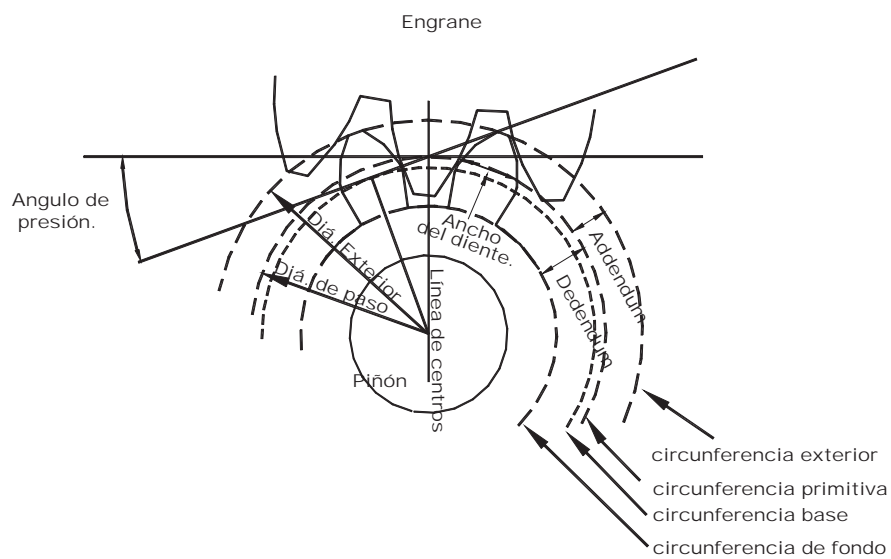


Fig. 3.11 Nomenclatura para dientes de engranaje.

Paso de base (Pb): Es la distancia a lo largo de la línea de acción entre superficies sucesivas de la envolvente del diente. El paso de base y circular está relacionados como:

$$pb = p \cos \phi \quad (3.15)$$

en donde:

ϕ es el ángulo de presión.

Círculo de paso: Es el círculo imaginario que rueda sin deslizamiento con un círculo de paso de un engrane con el que forma pareja. El diámetro (del círculo) de paso es igual que:

$$D = N / Pd = Np / \pi. \quad (3.16)$$

Ángulo de presión(ϕ): Para todos los tipos de engranes, es el ángulo agudo entre la normal común a los perfiles en el punto de contacto y el plano de paso común. Para los engranes rectos es simplemente el ángulo agudo formado por la tangente común entre círculos de base de los engranes que forman pareja y una normal a la línea de centros, figura 3.11 [13].

Cálculos de diámetros y número de dientes para el tren de engranaje seleccionado.

Una vez determinado el tren de engranaje, el siguiente paso es el diseño de cada uno de los engranes que lo componen. De la tabla 3.4 se escogieron los valores de ángulos de presión y ángulos de avance. Para el diseño de los engranes se utilizó el sistema métrico, seleccionándose un módulo $m=1$. En la figura 3.9 se muestra el tren de engranes seleccionado.

Cálculo de características del gusano 1 (G_{w1})

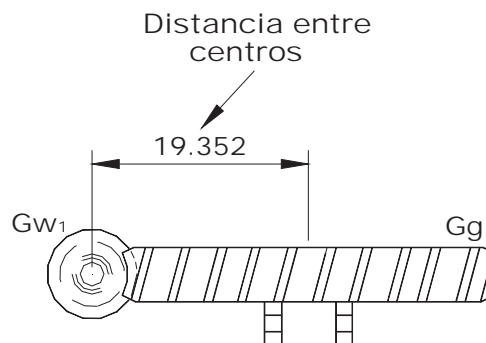


Fig. 3.13 Par de engrane –sin fin.

De la ec. 3.12 se calcula el diámetro del gusano G_{w1} .

$$\frac{C^{0.875}}{3.0} \leq d_{w1} \leq \frac{C^{0.875}}{1.7}$$

$$4.45 \text{ mm} \leq d_{w1} \leq 7.86 \text{ mm}$$

Se seleccionó:

$$d_{w1} = 7.00 \text{ mm.}$$

De acuerdo a la tabla 3.4 se seleccionaron los siguientes valores:

$$\text{ángulo de avance} = 15^\circ \text{ y } \text{ángulo de presión} = 20^\circ.$$

Utilizando la fórmula de la tabla 3.4 correspondiente a los valores anteriores para el cálculo del adendo y dedendo.

$$\text{Adendo} = 0.3686 p_x.$$

$$\text{Dedendo} = 0.3686 p_x .$$

El paso axial p_x es igual al paso circular transversal del engrane que es $p_c = \pi m$.

$$\text{Donde : } p_c = 3.1416 (1) = 3.1416.$$

Sustituyendo el valor del paso axial p_x

$$\text{Adendo} = 0.3686 (3.1416) = 1.1579 \text{ mm.}$$

$$\text{Dedendo} = 0.3686 (3.1416) = 1.1579 \text{ mm.}$$

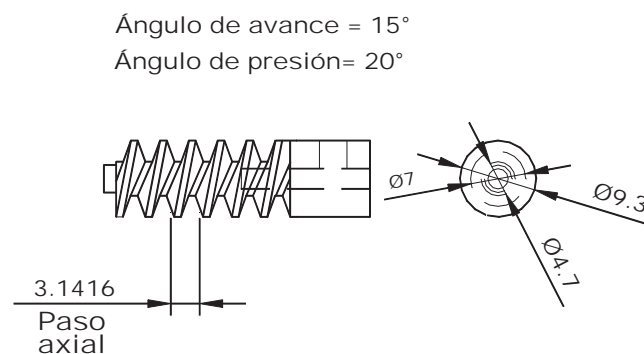


Fig. 3.14 Sinfin obtenido.

Cálculo de características del engrane helicoidal 1 (Gg₁)

Número de dientes = 32

Ángulo de presión = 20°

Ángulo de hélice = 15°

Módulo = 1

Diámetro de paso = $D = mN = 1 (32) = 32 \text{ mm}$

Adendo = $a = m = 1$

$$\text{Dedendo} = b = 1.25m = 1.25$$

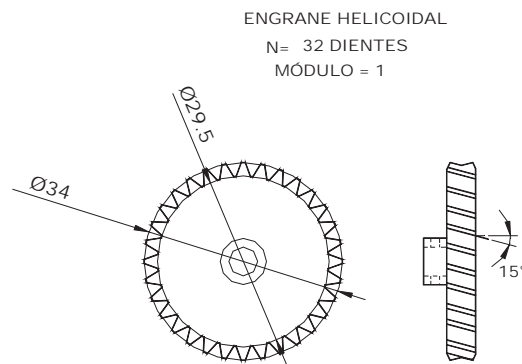


Fig. 3.15 Engrane obtenido.

Cálculo de características del gusano 2 (G_{w2})

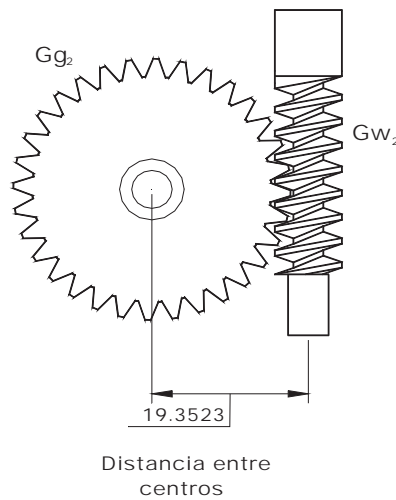


Fig. 3.16 Par de engrane sinfin seleccionado.

De la ec. 3.12 se calcula el diámetro del gusano G_{w2} .

$$\frac{C^{0.875}}{3.0} \leq d_{w1} \leq \frac{C^{0.875}}{1.7}$$

$$4.45 \text{ mm} \leq d_{w1} \leq 7.86 \text{ mm}$$

se seleccionó: $d_{w1} = 7.00 \text{ mm}$

De acuerdo a la tabla 3.4 se seleccionaron los siguientes valores:

ángulo de avance = 15° y ángulo de presión = 20°

Utilizando la fórmula de la tabla 3.4 correspondiente a los valores anteriores para el cálculo del adendo y dedendo.

Adendo = $0.3686 p_x$.

Dedendo = $0.3686 p_x$.

El paso axial p_x es igual al paso circular transversal del engrane que es $p_c = \pi m$.

Donde : $p_c = 3.1416 (1) = 3.1416$.

Sustituyendo el valor del paso axial, se obtiene:

Adendo = $0.3686 (3.1416) = 1.1579$ mm.

Dedendo = $0.3686 (3.1416) = 1.1579$ mm.

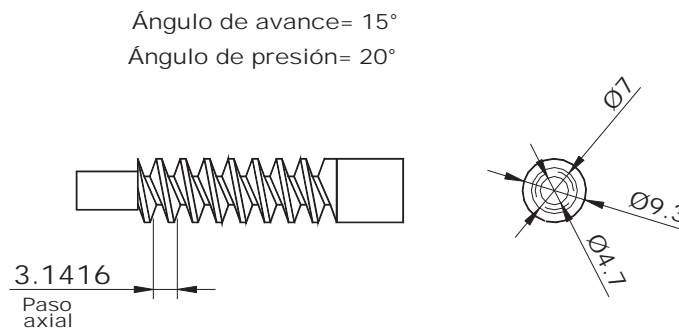


Fig. 3.17 sinfin obtenido.

Cálculo de características del engrane 2 (Gg_2)

Número de dientes = 32

Ángulo de presión = 20°

Ángulo de hélice = 15°

Módulo = 1

Diámetro de paso = $D = mN = 1 (32) = 32$ mm

Adendo = $a = m = 1$

Dedendo = $b = 1.25m = 1.25$

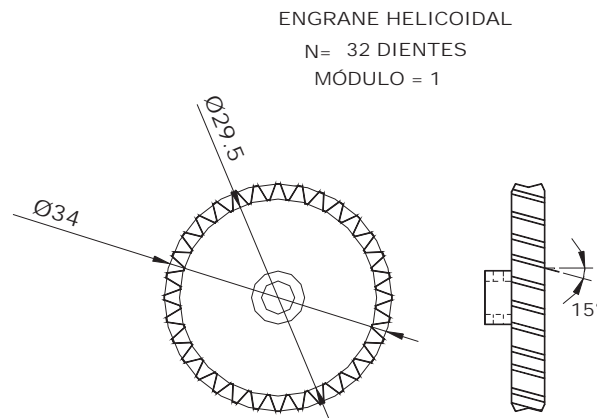


Fig. 3.18 Engrane obtenido

3.3.5 Selección de chasis.

Una de las partes no menos importante del robot es el chasis, el cual debe conectar las cajas de tracción, soportar el peso de: contenedor de agua, bomba, sistema electrónico, encoder, sistema del transductor y sensores. Para su fabricación existe una gran variedad de materiales, pero en especial para este robot el material seleccionado debe ser ligero y flexible con la finalidad de no incrementar peso al robot.

De acuerdo a las propiedades físicas que debe cumplir el chasis, se analizaron principalmente dos materiales: Aluminio y Nylamid.

El aluminio es ligero, pero presenta la desventaja de que cuando se flexiona se va deformando, pero tiene la ventaja de aislar el magnetismo.

El Nylamid es ligero y flexible, lo que nos ayuda a absorber la diferencia de altura que provocan los cordones de soldadura del tanque, pero tiene la desventaja de no aislar el magnetismo. De acuerdo a estas características se decidió fabricar el chasis con Nylamid de 5 mm de espesor y para evitar problemas de magnetismo se le agregó una capa de aluminio de $1/32''$ de espesor.

3.3.6 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 lectura.

Existen básicamente 2 opciones para realizar la medición de espesores por el método de ultrasonido.

La primera opción se conoce con el nombre de técnica de medición de espesores por contacto, la cual consiste en colocar un acoplante sobre la superficie del tanque al momento de realizar la medición del espesor, el cual puede ser agua, glicerina o grasa. Esta técnica se utiliza para mediciones de 22.86 cm (9") de separación como mínimo entre cada medición.

La segunda opción se conoce como inspección por inmersión, la cual se utiliza para realizar mediciones tan separadas como se desee o necesite. Una característica importante es que el transductor no necesita permanecer estático al momento de la lectura, pero la velocidad de desplazamiento es baja. Para poder realizar la lectura sin que el transductor permanezca estático y sin tocar la superficie del tanque, el transductor debe estar inmerso en el acoplante, que es el medio de contacto entre él y la superficie del tanque.

De acuerdo a la SA-435/SA435-M de la norma ASME[2], la cual establece la separación de 22.86 cm (9") entre mediciones y a los inconvenientes de mantener el nivel de acoplante durante el recorrido del robot, se decidió utilizar la primera alternativa.

Para que el robot realice la medición usando la técnica de contacto, se fabricó un mecanismo que consta de sistema de tornillo diferencial conectado a un motor, este mecanismo desplaza el transductor desde su posición inicial hasta tocar la superficie del tanque. Este movimiento se encuentra sincronizado electrónicamente, de tal manera que cuando el robot recorre la distancia especificada para la medición, el mecanismo se activa.

En la figura 3.19 se muestra el sistema de posicionador del transductor, en el cual se indican sus partes principales.

En la figura 3.20 se muestra la posición de inicio y la posición de contacto del transductor con el tanque, además de la conexión del robot con el bloque de acrílico. Este sistema está conectado por un bloque atornillado al chasis del robot, la conexión del acrílico y la placa se realiza por medio de dos eslabones, las cuales ejercen presión sobre el acrílico por medio de dos resortes de torsión que siempre lo mantienen en contacto con la superficie del tanque.

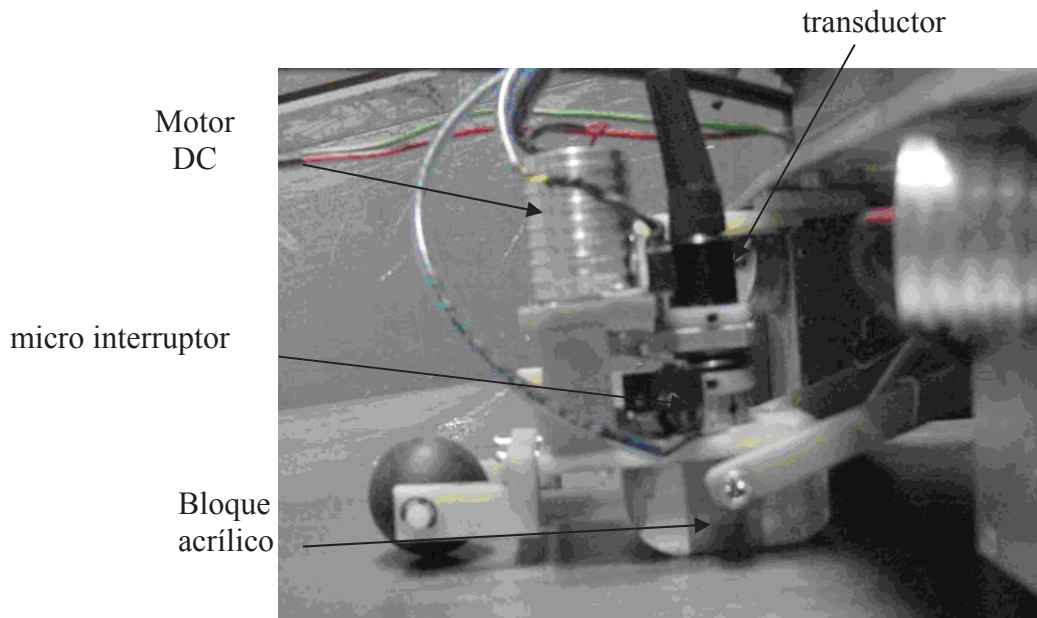


Fig. 3.19 Sistema de posicionador de transductor.

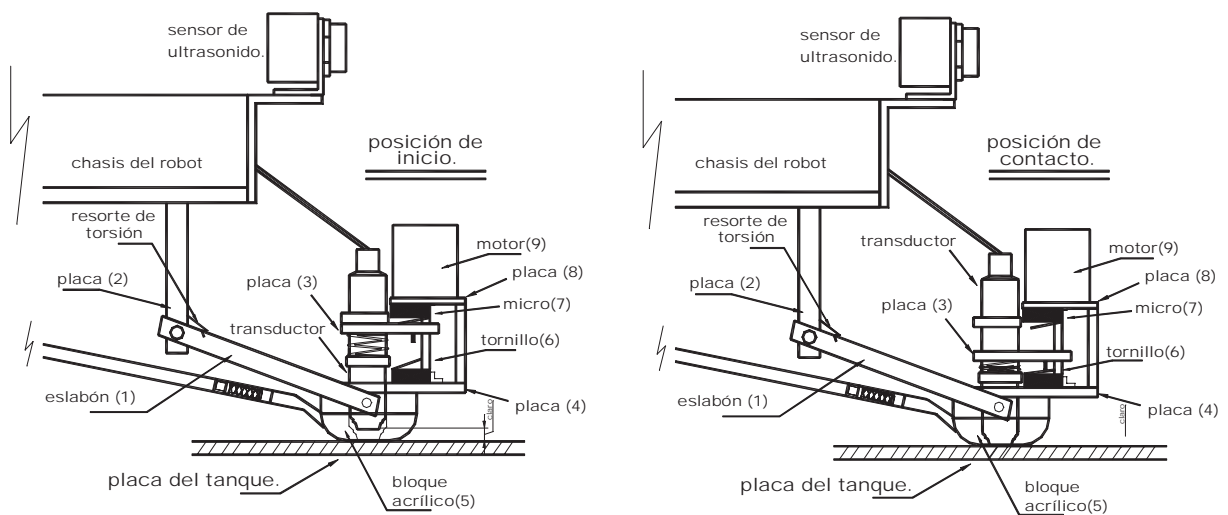


Fig. 3.20 posición de inicio y de contacto de transductor.

En la tabla 3.6 se muestran las principales dimensiones de los principales componentes del sistema posicionador.

Ref.	Descripción	Especificaciones (mm)		
		Largo	Ancho	Espesor
1	Eslabón	89	10	5
2	Placa sujeción	54.5	50	8
3	Placa soporte transductor	50	23.6	5
4	Placa soporte acrílico-motor	69.8	50	5
5	Bloque de acrílico	50	50	5
6	Tornillo	Tornillo 6M		
7	Microinterruptor	no retentivo, 5A 125 VAC 3A 250 VAC		
8	Placa soporte motor	50	31.8	5
9	Motor DC	Motor 12 VDC, 18 000 rpm		

Tabla 3.6 Principales componentes del sistema de posicionador de transductor.

3.3.7 Sistema de suministro de acoplante

El robot debe contar con un sistema que le suministre el acoplante al transductor al momento de realizar las mediciones de espesores.

Para la elección del sistema de alimentación debe tomar en cuenta varias consideraciones:

- Las sustancias recomendadas son: agua, grasa y glicerina.
- El acoplante debe suministrarse automáticamente.
- El acoplante debe colocarse en un punto específico.
- El acoplante debe suministrarse en cantidades adecuadas y constantes.
- El acoplante a utilizar debe ser barato.

Se analizaron básicamente 2 alternativas:

- a) Inyector de grasa y
- b) Utilización de bomba de agua.

La primera alternativa se eliminó por el costo.

Por lo tanto la alternativa a implementar fue la de utilización de bomba, y el acoplante a utilizar fue el agua, por ser más económico que la glicerina.

El diseño consta de dos elementos: la bomba y un contenedor de aluminio, ambos situados en la parte inferior del robot, en la figura 3.20 se muestra la conexión del sistema de bombeo con el sistema de posicionamiento del transductor, en particular con el bloque de acrílico.

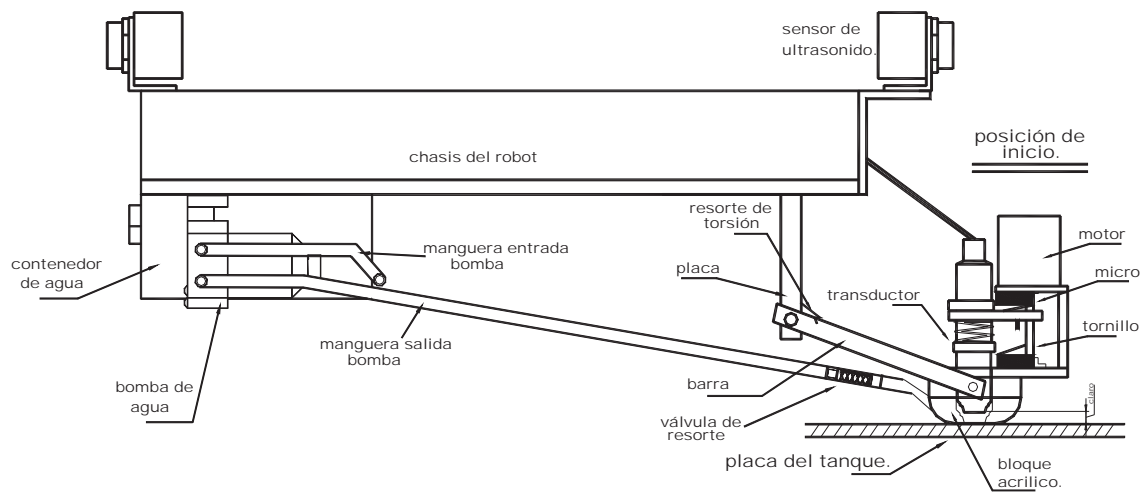


Fig. 3.20 conexión del sistema de bombeo.

El contenedor de agua cuenta con una capacidad de 316 cm^3 , y el suministro de agua para cada lectura es de 1.5 cm^3 , por lo tanto, tenemos para realizar 210 lecturas.

Los tanques de mayor altura que se han encontrado son de 15 m, si aplicamos la norma SA-435/SA435-M[2], se requiere un número total de 132 lecturas para ascenso y descenso del robot, como puede observarse, el tanque de agua del robot se debe llenar en cada descenso para continuar trabajando.

En la figura 3.21 se muestra el diagrama de conexiones de la bomba con el sistema electrónico del robot.

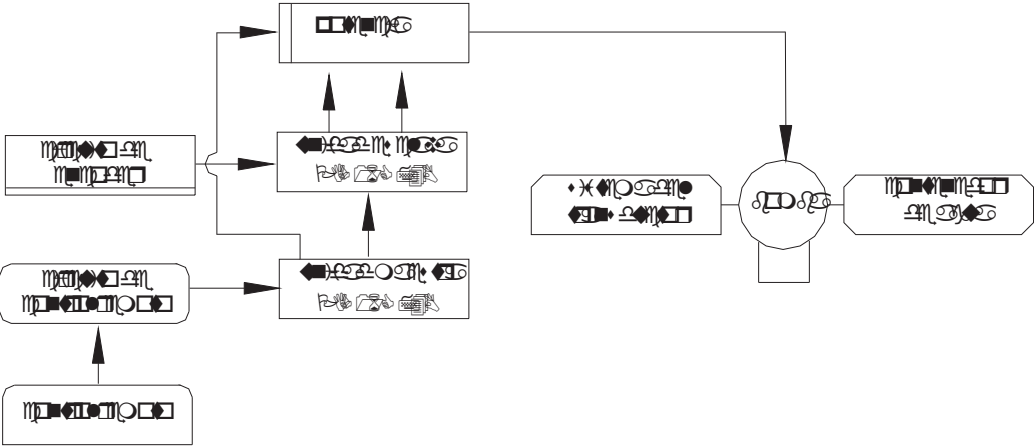


Fig. 3.21 Diagrama de conexiones de la bomba.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS CINEMÁTICO

La cinemática se define como el estudio de la geometría del movimiento y se usa para relacionar el desplazamiento, la velocidad, la aceleración y el tiempo sin hacer referencia a la causa del movimiento. En este capítulo se determinarán la velocidad lineal y angular del robot, así como su cinemática inversa.

4.1 Velocidad absoluta y relativa en el movimiento plano

Cualquier movimiento plano de una placa puede sustituirse por una traslación definida por el movimiento de un punto de referencia arbitrario A y por una rotación simultánea respecto a A. La velocidad absoluta V_B de un punto B de la placa se obtiene de la fórmula de velocidad relativa,

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{V}_A + \mathbf{V}_{B/A} \quad (4.1)$$

donde el miembro derecho representa una suma vectorial. La velocidad V_A corresponde a la traslación de la placa con A, mientras que la velocidad relativa $V_{B/A}$ está asociada con la rotación de la placa con respecto de A y se mide respecto a ejes centrados en A y de orientación fija (figura 4.).

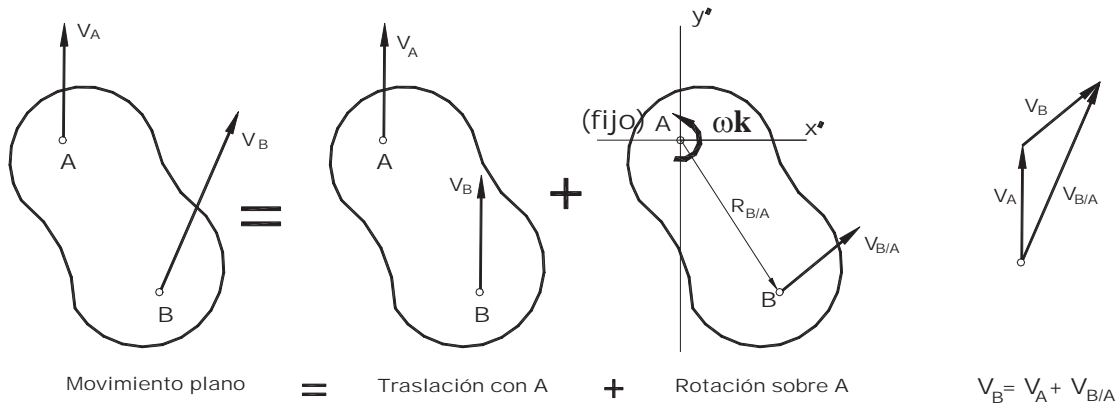


Fig. 4.1 diagrama de movimiento plano de una placa.

Sea $r_{B/A}$ el vector de posición de B relativo a A, ωk la velocidad angular de la placa respecto a ejes de orientación fija

$$\mathbf{V}_{B/A} = \omega \mathbf{k} \times \mathbf{R}_{B/A} ; \quad v_{B/A} = \omega R \quad (4.2)$$

donde R es la distancia de A a B. Sustituyendo el valor de $V_{B/A}$ en ec. (4.1) podemos escribir también

$$\mathbf{V}_B = \mathbf{V}_A + \omega \mathbf{k} \times \mathbf{R}_{B/A} \quad (4.3)$$

4.2 Sistema de referencia en el movimiento general

Considérese un sistema de referencia fijo OXYZ y un sistema Axyz que se mueve en forma conocida con respecto a OXYZ, figura 4.2. Sea P una partícula moviéndose en el espacio. La posición de P está definida en cualquier instante por el vector \mathbf{R}_P del sistema fijo y por el vector $\mathbf{R}_{P/A}$ en el sistema en movimiento, representando por el vector \mathbf{R}_A el vector de posición de A en el sistema fijo, tenemos

$$\mathbf{R}_P = \mathbf{R}_A + \mathbf{R}_{P/A} \quad (4.4)$$

La velocidad absoluta \mathbf{V}_P de la partícula se obtiene escribiendo

$$\mathbf{V}_P = \dot{\mathbf{R}}_P = \dot{\mathbf{R}}_A + \dot{\mathbf{R}}_{P/A} \quad (4.5)$$

donde las derivadas están definidas respecto al sistema fijo OXYZ. El primer término en el miembro de la derecha de la ec. (4.5) representa entonces la velocidad \mathbf{V}_A del origen A de los ejes en movimiento. Por otra parte, como la rapidez del vector es la misma con respecto a un sistema fijo y con respecto a un sistema en traslación, el segundo término puede considerarse como la velocidad $\mathbf{V}_{P/A}$ de P relativa al sistema AXYZ de la misma orientación que OXYZ y el mismo origen que Axyz. Por consiguiente tenemos[16]:

$$\mathbf{V}_P = \mathbf{V}_A + \mathbf{V}_{P/A} \quad (4.6)$$

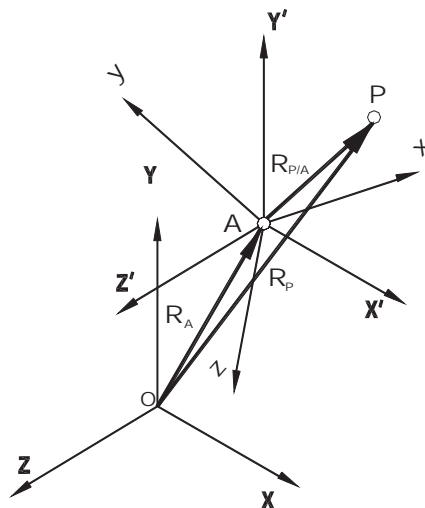


Fig. 4.2 Sistema de coordenadas fija y móvil.

4.3 Ecuaciones cinemáticas del Robot

Para poder determinar la trayectoria que puede describir el robot, a continuación se desarrollan las ecuaciones cinemáticas. En la figura 4.3 se muestra el diagrama general de posición de vectores del modelo del robot.

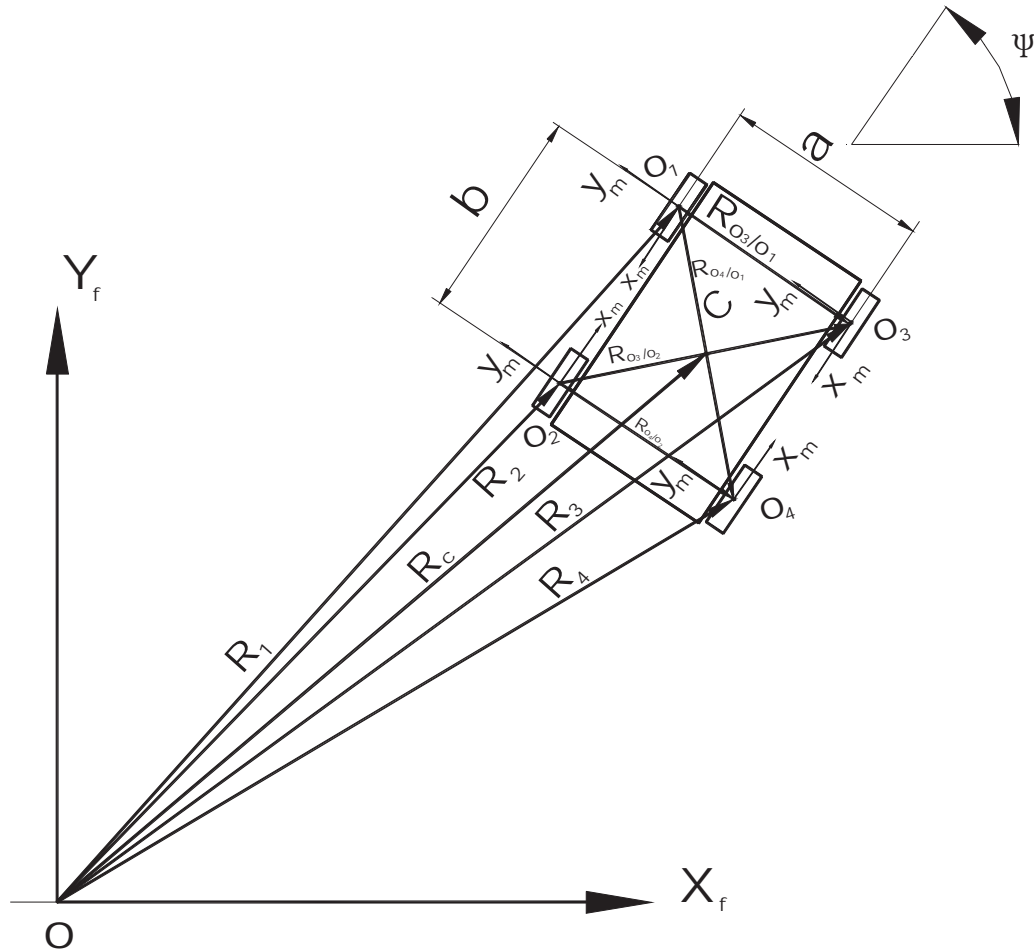


Figura 4.3 Diagrama general de posición del robot.

Para el análisis cinemático del robot, alinearemos los ejes coordenados de tal manera que queden alineados, por lo tanto $\psi = 0$.

Aplicando la matriz de rotación:

Expresando las coordenadas móviles en el sistema de coordenadas fijo:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\text{sen}(\psi) \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Efectuando operaciones:

$$X = x \cos \psi - y \text{sen} \psi$$

$$Y = x \text{sen} \psi + y \cos \psi$$

Sustituyendo valor de ψ

$$X = x ; Y = y,$$

lo cual nos indica que los ejes del sistema de referencia fija quedan paralelos con respecto al sistema móvil.

En la figura 4.4 se muestra el diagrama de vectores del robot para $\psi = 0$.

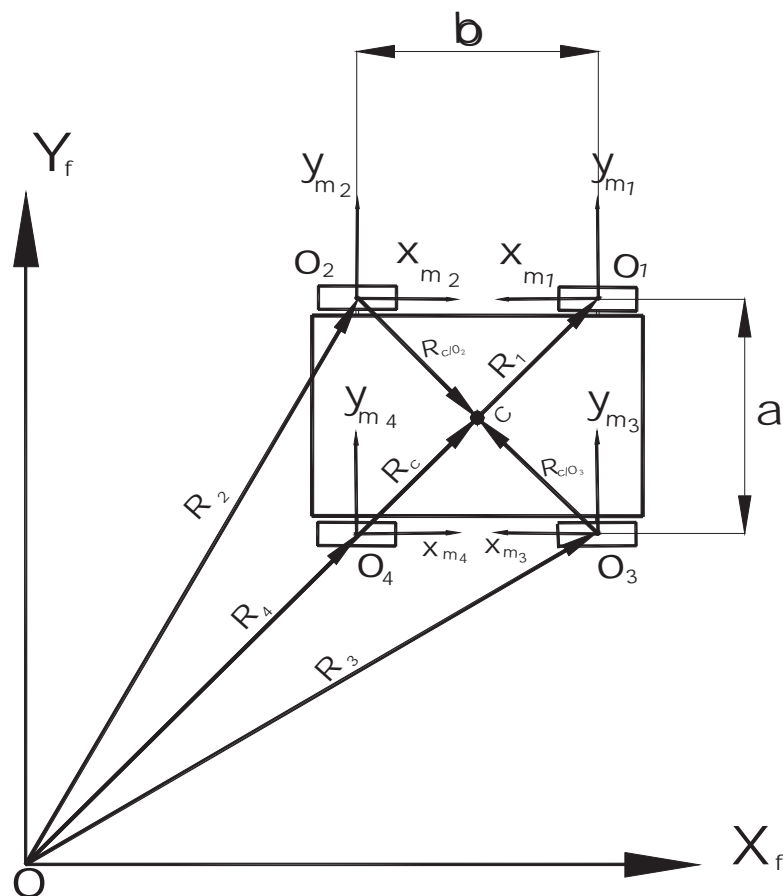


Fig. 4.4 Diagrama de vectores de posición del robot.

De la figura 4.4

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_{C/O1} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_{C/O2} \quad (4.9)$$

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{R}_3 + \mathbf{R}_{C/O3} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{R}_C = \mathbf{R}_4 + \mathbf{R}_{C/O4} \quad (4.11)$$

Derivando con respecto al tiempo las ecuaciones (4.8) a (4.11).

$$\text{De la ec. (4.8) se obtiene: } \dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_1 + \dot{\mathbf{R}}_{C/O1} \quad (4.12)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_1 + \omega_{13} \times \mathbf{R}_{C/O1} \quad (4.13)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_1 + \omega_{13} \mathbf{k} \times \left(\frac{b}{2} \mathbf{i} - \frac{a}{2} \mathbf{j} \right) \quad (4.14)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_1 \mathbf{i} + \omega_{13} \frac{b}{2} \mathbf{j} + \omega_{13} \frac{a}{2} \mathbf{i} \quad (4.15)$$

$$\text{De la ec. (4.9) se obtiene: } \dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_2 + \dot{\mathbf{R}}_{C/O2} \quad (4.16)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_2 \mathbf{i} + \omega_{24} \frac{b}{2} \mathbf{j} + \omega_{24} \frac{a}{2} \mathbf{i} \quad (4.17)$$

$$\text{De la ec. (4.10) se obtiene: } \dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_3 + \dot{\mathbf{R}}_{C/O3} \quad (4.18)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_3 \mathbf{i} + \omega_{13} \frac{b}{2} \mathbf{j} - \omega_{13} \frac{a}{2} \mathbf{i} \quad (4.19)$$

$$\text{De la ec. (4.11) se obtiene: } \dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_4 + \dot{\mathbf{R}}_{C/O4} \quad (4.20)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_4 \mathbf{i} + \omega_{24} \frac{b}{2} \mathbf{j} - \omega_{24} \frac{a}{2} \mathbf{i} \quad (4.21)$$

Aplicando el método de superposición, fig 4.4a, se suman las ecuaciones (4.15),(4.17), (4.19) y (4.21).

$$\begin{aligned} 4\dot{\mathbf{R}}_C = & \dot{\mathbf{R}}_1 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_2 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_3 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_4 \mathbf{i} + \frac{b}{2} \omega_{13} \mathbf{j} + \frac{a}{2} \omega_{13} \mathbf{i} + \frac{b}{2} \omega_{24} \mathbf{j} + \frac{a}{2} \omega_{24} \mathbf{i} \\ & + \frac{b}{2} \omega_{13} \mathbf{j} - \frac{a}{2} \omega_{13} \mathbf{i} + \frac{b}{2} \omega_{24} \mathbf{j} - \frac{a}{2} \omega_{24} \mathbf{i} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Reduciendo:

$$4\dot{\mathbf{R}}_C = \dot{\mathbf{R}}_1 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_2 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_3 \mathbf{i} + \dot{\mathbf{R}}_4 \mathbf{i} + b\omega_{13} \mathbf{j} + b\omega_{24} \mathbf{j} \quad (4.23)$$

En la figura 4.4 a se muestra el método de la superposición.

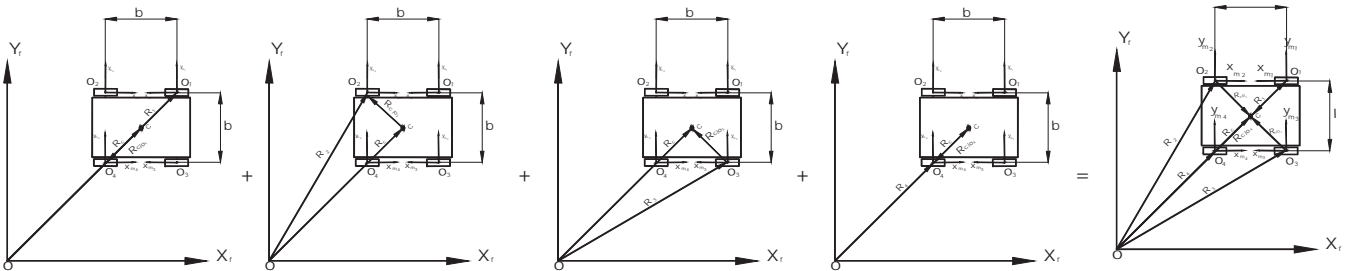


Fig. 4.4a Suma vectorial utilizando el método de superposición.

4.4 Movimiento del robot en el plano

Una vez conocida la velocidad lineal, se debe calcular la velocidad angular del robot, para poder expresar los términos de la velocidad angular de ecuación (4.22) en función de los parámetros de velocidad angular de cada rueda. En la figura 4.5 se muestra los vectores de posición del robot.

De la figura 4.5 se obtiene las ecuaciones vectoriales:

Para el eje O_4O_2 se obtiene:

$$\mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_{O_4/O_2} \quad (4.24)$$

Para el eje O_3O_1 se obtiene:

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_{O_3/O_1} \quad (4.25)$$

Para el movimiento en el plano de las ruedas cruzadas se obtiene:

$$\mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_{O_4/O_1} \quad (4.26)$$

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_{O_3/O_2} \quad (4.27)$$

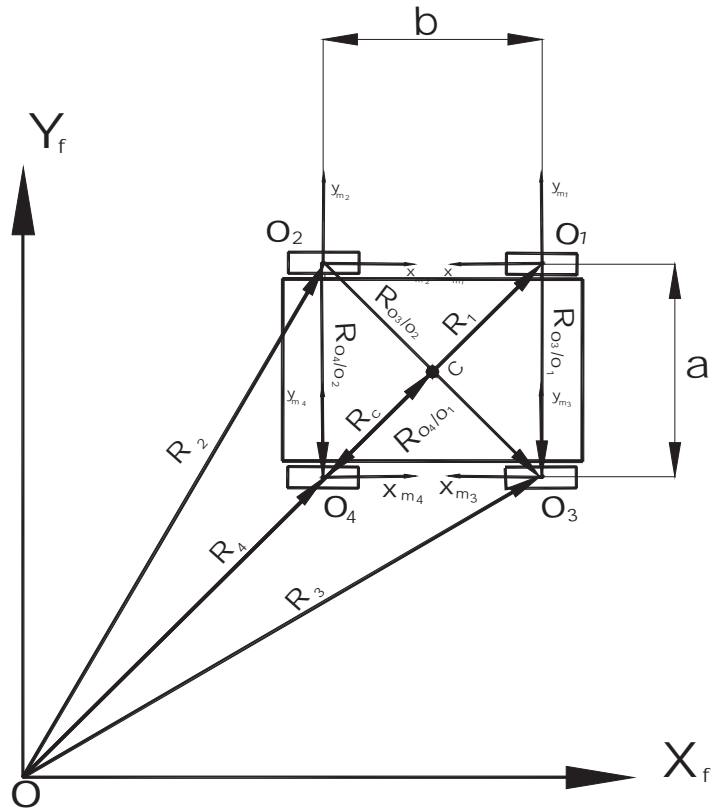


Fig. 4.5 Diagrama de posición de vectores para movimiento plano.

Cálculo de la ecuación de movimiento plano.

Derivando con respecto al tiempo la ec. (4.24) y realizando operaciones para obtener la velocidad angular del movimiento plano:

$$\dot{\mathbf{R}}_4 = \dot{\mathbf{R}}_2 + \omega_{0402} \mathbf{k} \times (-a\mathbf{j}) \quad (4.28)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_4 - \dot{\mathbf{R}}_2 = \omega_{0402} a \mathbf{i} \quad (4.29)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_4 = \dot{\theta}_4 r \mathbf{i} \quad (4.30)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_2 = \dot{\theta}_2 r \mathbf{i} \quad (4.31)$$

$$\dot{\theta}_4 r \mathbf{i} - \dot{\theta}_2 r \mathbf{i} = \omega_{0402} a \mathbf{i} \quad (4.32)$$

$$\frac{(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2)r}{a} = \omega_{0402} \quad (4.33)$$

Para el eje O_3O_1 se tiene:

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_{O_3/O_1} \quad (4.34)$$

derivando con respecto al tiempo y realizando operaciones para obtener la velocidad angular del movimiento plano:

$$\dot{\mathbf{R}}_3 = \dot{\mathbf{R}}_1 + \omega_{0301} \mathbf{k} \times (-a\mathbf{j}) \quad (4.35)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_3 - \dot{\mathbf{R}}_1 = \omega_{0301} a\mathbf{i} \quad (4.36)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_3 = \dot{\theta}_3 r\mathbf{i} \quad (4.37)$$

$$\dot{\mathbf{R}}_1 = \dot{\theta}_1 r\mathbf{i} \quad (4.38)$$

$$\dot{\theta}_3 r\mathbf{i} - \dot{\theta}_1 r\mathbf{i} = \omega_{0301} a\mathbf{i} \quad (4.39)$$

$$\frac{(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1) r}{a} = \omega_{0301} \quad (4.40)$$

Sumando ec. (4.33) y (4.40):

$$\omega_e = \omega_{0301} + \omega_{0402} = \frac{(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1) r}{a} + \frac{(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2) r}{a} \quad (4.41)$$

simplificando la ec. (4.41):

$$\omega = \frac{r}{2a} (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2) \quad (4.42)$$

Para los ejes cruzados, de la figura 4.5, se tiene que:

$$\mathbf{R}_4 = \mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_{O_4/O_1}$$

derivando con respecto al tiempo y realizando operaciones, se obtiene:

$$\dot{\theta}_4 r\mathbf{i} = \dot{\theta}_1 r\mathbf{i} - b\omega_{0401} \mathbf{j} + a\omega_{0401} \mathbf{i} \quad (4.43)$$

$$(\dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_1) r\mathbf{i} = a\omega_{0401} \mathbf{i} \quad (4.44)$$

$$0 = b\omega_{0401} \mathbf{j} \quad (4.45)$$

Tomando la ec. (4.27)

$$\mathbf{R}_3 = \mathbf{R}_2 + \mathbf{R}_{O_3/O_2}$$

derivando con respecto al tiempo y realizando operaciones, se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_3 = \dot{\mathbf{R}}_2 + \omega_{0302} \mathbf{k} \times (b\mathbf{i} - a\mathbf{j}) \quad (4.46)$$

$$\dot{\theta}_3 \mathbf{r}\mathbf{i} = \dot{\theta}_2 \mathbf{r}\mathbf{i} + b\omega_{0302} \mathbf{j} + a\omega_{0302} \mathbf{i} \quad (4.47)$$

$$(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2) \mathbf{r}\mathbf{i} = a\omega_{0302} \mathbf{i} \quad (4.48)$$

$$0 = b\omega_{0302} \mathbf{j} \quad (4.49)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.33) y (4.40) en (4.23) se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_c = \frac{1}{4} ((\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \mathbf{r}\mathbf{i} + \frac{br}{a} (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2) \mathbf{j}) \quad (4.50)$$

Si se analiza la ecuación 4.50, se ve que cuenta con 4 parámetros de diseño; r , a , b y $\dot{\theta}$. Esta ecuación no nos da ninguna restricción con respecto a los parámetros anteriores, es decir pueden tomar cualquier valor, pero si analizamos las ecuaciones (4.45) y (4.49), se observa que la solución para este par de ecuaciones, b ó ω deben ser cero. Si ω es cero, el robot solo puede realizar una trayectoria recta, pero si b es cero, un eje se sobrepone sobre el otro, por lo tanto la deducción de esta condición es que para obtener un modelo óptimo para realizar una rotación, el parámetro b debe tender a cero.

En forma compacta la ec. (4.50) se expresa como[15]:

$$\mathbf{t} = \mathbf{L} \dot{\theta}_a \quad (4.51)$$

\mathbf{t} = vector de giro.

\mathbf{L} = matriz de transformación.

$\dot{\theta}_a$ = matriz de velocidades angulares independientes de las ruedas.

Siendo \mathbf{L} una matriz de 3×4 .

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} -r/2a & -r/2a & r/2a & r/2a \\ \frac{r}{4}\mathbf{i} - \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} - \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} + \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} + \frac{br}{4a}\mathbf{j} \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

donde:

$$\mathbf{t} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} ; \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \equiv \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Sustituyendo (4.52) y (4.53) en ecuación (4.51)

$$\begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/2a & -r/2a & r/2a & r/2a \\ \frac{r}{4}\mathbf{i} - \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} - \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} + \frac{br}{4a}\mathbf{j} & \frac{r}{4}\mathbf{i} + \frac{br}{4a}\mathbf{j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

Comprobación de las ecuaciones (4.42) y (4.50)

Una vez determinadas las ecuaciones cinemáticas que rigen el movimiento del robot, es necesario comprobar su validez. En la figura 4.6 se muestra la trayectoria que debe seguir el robot para velocidades en ruedas 1 y 2 iguales en magnitud y sentido pero menores en magnitud que las ruedas 3 y 4.

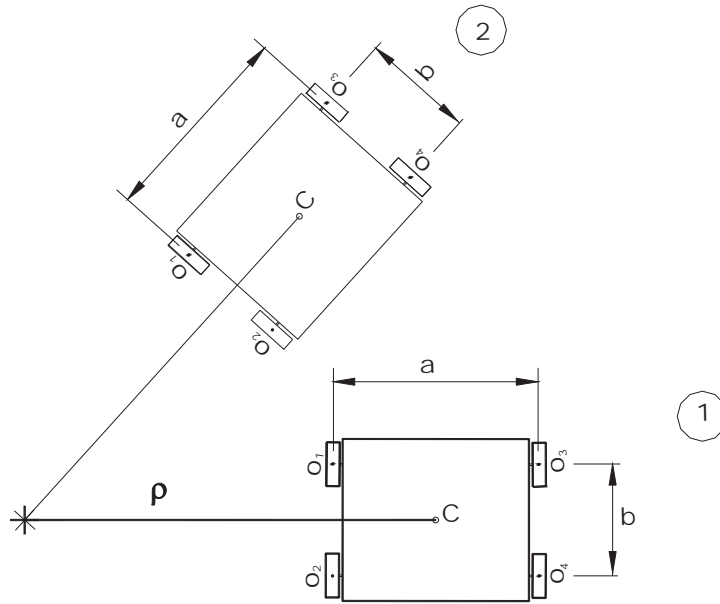


Fig. 4.6 Descripción de trayectoria de robot para diferentes velocidades angulares en pares de ruedas.

Los valores de las velocidades angulares de las ruedas del robot obtenidos en el laboratorio se muestran a continuación:

$$\dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_1 = 8.6 \text{ rpm} = 0.9005 \text{ rad/seg}$$

$$\dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_4 = 16.4 \text{ rpm} = 1.7174 \text{ rad/seg}$$

$$a = 30 \text{ cm}$$

$$b = 15.5 \text{ cm}$$

$$r = 3.75 \text{ cm}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (4.41)

$$\omega = \frac{r}{2a} (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2) = 0.1021 \text{ rad/seg}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (4.49)

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{R}}_c &= \frac{1}{4}((\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)r\mathbf{i} + \frac{br}{a}(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2)\mathbf{j}) \\ &= 4.9087 \mathbf{i} + 0.7912 \mathbf{j}\end{aligned}$$

$$\left| \dot{\mathbf{R}}_c \right| = 4.9712 \text{ cm/seg.}$$

Para calcular el radio de curvatura se utiliza la ecuación (3.1)

$V = \omega \rho$ donde $\rho = V/\omega$, de acuerdo a la nomenclatura usada queda como:

$$\rho = \left| \dot{\mathbf{R}}_c \right| / \omega, \text{ sustituyendo los valores: } \omega = 0.1021 \text{ rad/seg y } \left| \dot{\mathbf{R}}_c \right| = 4.9712 \text{ cm/seg se obtiene:}$$

$\rho =$ radio de curvatura = 48.689 cm.

El valor promedio del radio de curvatura obtenido en el laboratorio: 49.565 cm

error : 1.76 %

Esta diferencia puede ser atribuida a varias condiciones:

- Diferencia al tamaño de ruedas.
- Diferencia en velocidades angulares de las ruedas.
- Variación en las mediciones.
- Colocación del robot.
- Coefficiente de fricción de la superficie.

4.4.1 Cálculo de la cinemática inversa

Es importante obtener la cinemática inversa para determinar la geometría de trayectoria que se requiera que el robot describa, expresando cada junta actuada en función de las restantes.

Las ecuaciones se pueden presentar de la siguiente manera[12]:

$$\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{\theta}}_a = \mathbf{t} \quad (4.55)$$

Donde:

\mathbf{J} = Matriz Jacobiana.

\mathbf{t} = vector de giro.

$\dot{\boldsymbol{\theta}}_a$ = matriz de velocidades angulares independientes de las ruedas.

La matriz Jacobiana se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \dot{\theta}} \quad (4.56)$$

El vector de giro se expresa como:

$$\mathbf{t} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Para el cálculo de la cinemática inversa se utilizara las ecuaciones (4.42) y (4.50). La ecuación 4.42 se multiplica por el vector \mathbf{i} , se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} = \frac{1}{4}(\dot{\theta}_1 r + \dot{\theta}_2 r + \dot{\theta}_3 r + \dot{\theta}_4 r) \quad (4.58)$$

$$\omega = \frac{r}{2a}(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_4 - \dot{\theta}_2) \quad (4.42)$$

Como puede verse, para la cinemática inversa tenemos 2 ecuaciones con 4 incógnitas, para poder resolverla debemos reducirlas con las restricciones del modelo.

Las ecuaciones 4.42 y 4.56 pueden expresarse como:

$$\mathbf{KJ}\dot{\theta}_a = \mathbf{Kt} \quad (4.59)$$

Donde:

\mathbf{J} = Matriz Jacobiana.

\mathbf{t} = vector de giro.

\mathbf{K} = matriz de transformación.

$\dot{\theta}_a$ = matriz de velocidades angulares independientes de las ruedas.

Tenemos 3 diferentes casos:

$$a) \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_4$$

Este caso se presenta cuando el robot describe una trayectoria recta.

$$b) \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 \neq \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_4$$

Estas condiciones se aplican cuando se requiere que el robot describa una trayectoria curva, si tomamos como referencia la figura 4.5, lo que se indica es que, el grupo de ruedas derechas

tiene una velocidad diferente al par de ruedas izquierdas. En magnitud las ruedas de la derecha son menores que las de la izquierda.

$$c) \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 ; -\dot{\theta}_3 = -\dot{\theta}_4 \text{ pero } \dot{\theta}_s \text{ igual en magnitud}$$

Estas condiciones se aplican cuando el robot tiende a girar sobre su centro de masas y son las que se aplican al robot cuando ha terminado la toma de lecturas en forma ascendente o descendente y tiene que cambiarse de línea.

Analizando cada uno de los incisos, tenemos:

Para el inciso a), sustituyendo en ecs. (4.58) y (4.42) las velocidades angulares de las ruedas, se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} = r (\dot{\theta}_1) \quad , \quad \omega = 0 \quad (4.60)$$

Usando la ec. (4.59),
$$\mathbf{KJ}\dot{\boldsymbol{\theta}}_a = \mathbf{Kt}$$

Calculando cada vector:

$$\mathbf{KJ} \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \equiv \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} ; \mathbf{K} \equiv \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}^T \\ 0 & (1/r)\mathbf{i}^T \end{bmatrix} ; \mathbf{t} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.61)$$

Sustituyendo en ec. (4.59) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{0}^T \\ 0 & (1/r)\mathbf{i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.62)$$

Realizando operaciones se obtiene:

$$\dot{\theta}_1 = (1/r)\dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} \quad (4.63)$$

Para el inciso b), sustituyendo en las ecs. (4.58) y (4.42) las velocidades angulares de las ruedas, se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} = \frac{1}{2}(\dot{\theta}_1 r + \dot{\theta}_3 r) \quad ; \quad \omega = \frac{r}{a}(\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_1) \quad (4.64)$$

Usando la ec. (4.59), $\mathbf{KJ}\dot{\boldsymbol{\theta}}_a = \mathbf{Kt}$

Calculando cada vector:

$$\mathbf{KJ} \equiv \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{K} \equiv \begin{bmatrix} a/r & \mathbf{0}^T \\ 0 & (2/r)\mathbf{i}^T \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_a \equiv \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad ; \quad \mathbf{t} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.66)$$

Sustituyendo las ecuaciones (4.65) y (4.66) en ec. (4.59)

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a/r & \mathbf{0}^T \\ 0 & (2/r)\mathbf{i}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.67)$$

Realizando operaciones, se obtiene:

$$\dot{\theta}_1 = (1/r) \dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} - (a/2r) \omega \quad (4.68)$$

$$\dot{\theta}_3 = (1/r) \dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} + (a/2r) \omega \quad (4.69)$$

Para el inciso c), sustituyendo en las ecs. (4.58) y (4.42) las velocidades angulares de las ruedas, se obtiene:

$$\dot{\mathbf{R}}_c \cdot \mathbf{i} = 0 \quad , \quad \omega = \frac{2r}{a} (-\dot{\theta}_1) \quad (4.70)$$

Usando la ec. (4.59),
$$\mathbf{KJ} \dot{\boldsymbol{\theta}}_a = \mathbf{Kt}$$

Calculando cada vector:

$$\mathbf{KJ} \equiv \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \dot{\boldsymbol{\theta}}_a \equiv \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K} \equiv \begin{bmatrix} a/2r & 0^T \\ 0 & 0^T \end{bmatrix}; \quad \mathbf{t} \equiv \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.71)$$

Sustituyendo en ec. (4.59) se obtiene:

$$\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a/2r & 0^T \\ 0 & 0^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \dot{\mathbf{R}}_c \end{bmatrix} \quad (4.72)$$

Realizando operaciones, se obtiene:

$$\dot{\theta}_1 = -(a/2r) \omega \quad (4.73)$$

Una vez calculada la cinemática inversa, cada rueda se puede expresar en función de la velocidad lineal y la velocidad angular. Ahora estamos en la posibilidad de programar cualquier trayectoria deseada. El valor obtenido en el inciso a) e inciso c) es solamente para una rueda, para obtener el valor de las restantes se deben tomar las consideraciones realizadas, lo mismo sucede con el inciso b).

4.5 Cálculo de las fuerzas de fricción

Una de las especificaciones que se estableció fue que la pintura del tanque no se debe dañar (rayar), por lo tanto es necesario tener una idea de la magnitud de la fuerza de fricción, dependiendo de su valor podemos darnos una idea de que tan severo puede ser el daño y tratar de eliminarlo.

Para obtener el valor del coeficiente cinemático, en el laboratorio se utilizó una caja de transmisión a la cual se le adaptó un dinamómetro para medir la magnitud de la fuerza a la cual la rueda empieza a deslizarse. Para realizar la prueba, a la caja de la transmisión se le aplicó un voltaje de 18V DC. El valor de la fuerza fue de 2.5 kg. En la figura 4.7 se muestra la prueba para el cálculo de fricción cinemática.

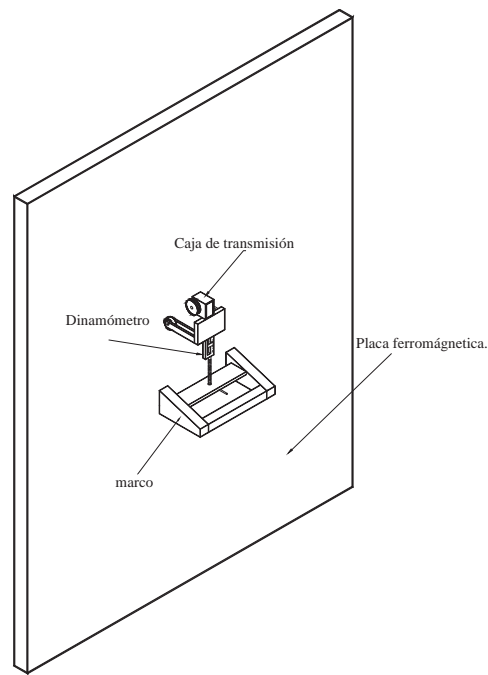


Fig. 4.7 Prueba para el cálculo de coeficiente fricción cinemática.

De la fórmula de fricción tenemos:

$$f / N = \mu_k \quad (4.74)$$

donde:

$$N = 4 \text{ Kg} \quad \text{y} \quad f = 2.5 \text{ Kg}$$

$$\mu_k = 0.625.$$

En la figura 4.8 se muestran los vectores de velocidad y el marco de referencia para el cálculo de las fricciones de las ruedas del robot utilizando un método analítico.

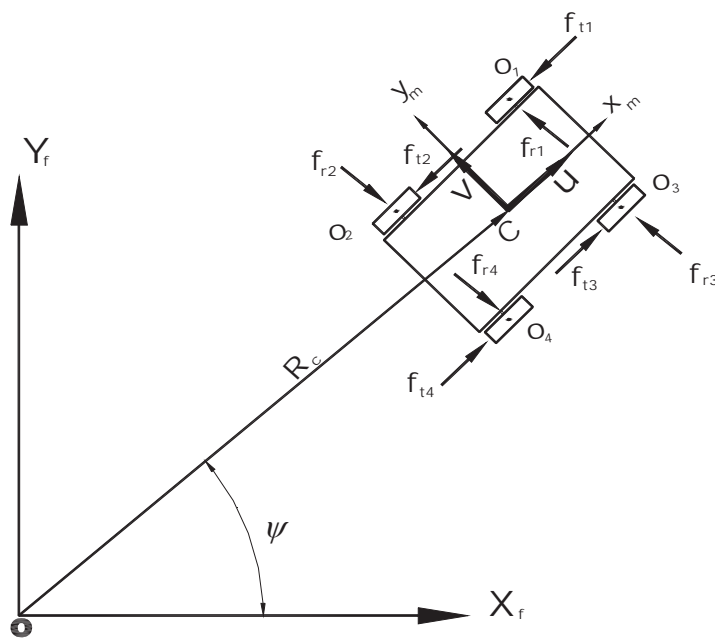


Fig. 4.8 Marco de referencia para el estudio del movimiento de cuerpo rígido.

De la segunda ley de Newton:

$$F = ma \quad (4.75)$$

Expresándolo en términos de los ejes fijos:

$$F_x = m \ddot{X} \quad (4.76)$$

$$F_y = m \ddot{Y} \quad (4.77)$$

Expresando las fuerzas en el sistema de coordenadas móvil:

$$\begin{bmatrix} F_{X\psi} \\ F_{Y\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{xm} \\ F_{ym} \end{bmatrix} \quad (4.78)$$

de la ecuación de energía cinética:

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\psi}^2 + \frac{1}{2} J_z \dot{\psi}^2 \quad (4.79)$$

de la figura 4.8 se obtiene la velocidad del robot en términos de las coordenadas fijas:

$$\dot{\psi} = (\dot{X}, \dot{Y}) \quad (4.80)$$

$$\dot{\psi}^2 = \dot{X}^2 + \dot{Y}^2 \quad (4.81)$$

Utilizando la ecuación de Lagrange y sustituyendo la ec. (4.81) en la ec. (4.79) se obtiene:

$$T = \frac{1}{2} m (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} J_z \dot{\psi}^2 \quad (4.82)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i \quad (4.83)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{X}} = m \dot{X}, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{Y}} = m \dot{Y}, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} = J_z \dot{\psi}, \quad \frac{\partial T}{\partial X} = \frac{\partial T}{\partial Y} = \frac{\partial T}{\partial \psi} = 0 \quad (4.84)$$

Expresando las fuerzas en el sistema de coordenadas móvil:

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4.85)$$

Derivando con respecto al tiempo:

$$(\dot{u} - \dot{\psi} v) \cos(\psi) - (\dot{v} + \dot{\psi} u) \sin(\psi) = \ddot{x}_m / l \quad (4.86)$$

$$(\dot{u} - \dot{\psi} v) \sin(\psi) + (\dot{v} + \dot{\psi} u) \cos(\psi) = \ddot{y}_m / l \quad (4.87)$$

Multiplicando por la inversa de la matriz de rotación las ecuaciones (4.86) y (4.87) e introduciendo las fuerzas F_{x_m} y F_{y_m} expresados con respecto al sistema de coordenadas móvil m.

$$l(\dot{v} - \dot{\psi} u) = F_{y_m} \quad (4.88)$$

$$l(\dot{u} + \dot{\psi} v) = F_{x_m} \quad (4.89)$$

$$\dot{\psi} = \omega; \text{ del centro de masas [16]} \quad (4.90)$$

Para calcular los valores máximos de fricción durante un giro del robot, primero calcularemos las fuerzas normales N.

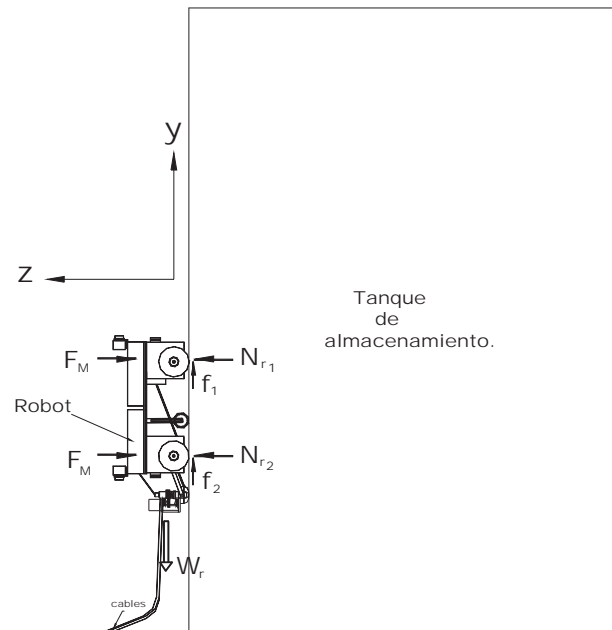


Fig. 4.9 Diagrama de fuerzas entre el robot y el tanque.

Las fuerzas normales que ejercen las ruedas sobre el tanque son 4, por lo que se encuentran indeterminadas[17], si realizamos un análisis estático, solo se pueden obtener 3 ecuaciones y como contamos con 4 incógnitas por lo que el problema es estáticamente indeterminado. Ahora trataremos de resolver las fuerzas de fricción del robot utilizando un modelo de dos ruedas, comúnmente conocida como modelo bicicleta.

De acuerdo a la sección 3.3.2, el peso le provoca a cada rueda un momento de 0.6711Nm, el peso se distribuirá uniformemente en las ruedas traseras y en las ruedas delanteras, tomando como referencia el diagrama de fuerzas de la figura 4.9 tenemos:

$$\sum F_z = 2F_M - N_{r1} - N_{r2} = 0 \quad (4.91)$$

Sumando fuerzas en X e Y

$$\sum F_y = f_{t1} \sin(\psi) + f_{r1} \cos(\psi) + f_{t2} \sin(\psi) + f_{r2} \cos(\psi) - W = m(\dot{u} + \dot{\psi} v) \quad (4.92)$$

$$\sum F_x = f_{t1} \cos(\psi) - f_{r1} \sin(\psi) + f_{t2} \cos(\psi) - f_{r2} \sin(\psi) = m(\dot{v} - \dot{\psi} u) \quad (4.93)$$

como la velocidad es constante, $\dot{v} = 0$ y $\dot{u} = 0$, tomando momentos con respecto a la rueda No. 1.

$$\sum M_1 = W_r(0.037) + b(N_{r2}) - b(F_M) + 2(0.6711) + b(f_{t2}) = 0 \quad (4.94)$$

Como puede observarse contamos con 4 ecuaciones y tenemos 6 incógnitas: $N_{r1}, N_{r2}, f_{x1}, f_{x2}, f_{y1}, f_{y2}$. Por lo que el sistema es indeterminado.

En la figura 4.10 pasamos a un modelo más reducido.

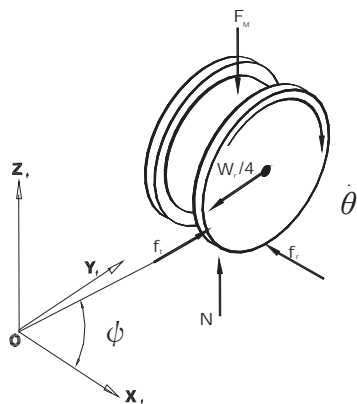


Fig. 4.10 Diagrama de cuerpo libre de rueda de robot.

Calculando suma de fuerzas en x e y

$$\sum F_x = f_t \cos(\psi) - f_r \text{sen}(\psi) = m(\dot{\psi} u) \quad (4.95)$$

$$\sum F_y = f_t \text{sen}(\psi) + f_r \cos(\psi) - W_r / 4 = m(\dot{\psi} v) \quad (4.96)$$

Resolviendo simultáneamente las ecuaciones (4.95) y (4.96), como el término de la derecha de las ecuaciones es muy pequeño, los igualaremos a cero, por lo tanto:

$$f_r = (W_r / 4) \text{sen}(\psi) \quad (4.97)$$

$$f_t = (W_r / 4) \cos(\psi) \quad (4.98)$$

En la ec. (4.97) la fuerza es máxima cuando $\psi = 90^\circ$,

$$f_r = 6.5/4 = 1.625 \text{ Kg} = 15.9412 \text{ N}$$

En la ec. (4.98) la fuerza es máxima cuando $\psi = 0$

$$f_t = 6.5/4 = 1.625 \text{ Kg} = 15.9412 \text{ N}$$

Para obtener un valor de resistencia de la pintura al deslizamiento se realizaron pruebas con las ruedas del robot. Se observó que cuando existe deslizamiento la pintura se daña, por lo tanto su resistencia a la fricción es muy baja, para que no se dañe, el deslizamiento debe ser cero, y por lo tanto la fricción también debe ser cero. Como los valores de fricción obtenidos son muy altos, con este tipo de modelo de robot, este problema no se puede eliminar. Una alternativa para aminorar este problema es vulcanizar las ruedas.

CAPÍTULO 5. EVALUACIÓN DEL ROBOT

En este capítulo se muestran las pruebas más relevantes realizadas durante el desarrollo del robot tanto en laboratorio como en campo.

5.1 Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio marcaron la pauta para señalarnos el camino correcto a tomar para el diseño de los componentes del robot.

5.1.1 Prueba de salto de soldadura para el sistema de tracción individual

Uno de los puntos críticos para la tracción son los cordones de soldadura. Como las ruedas están magnetizadas al momento de saltar una soldadura la rueda tiene dos superficies adheridas al mismo tiempo, la superficie plana y la soldadura, cuando salta la soldadura tiene que desprenderse de la otra superficie, haciendo que el sistema de tracción tenga que incrementar el par de torsión. La dimensión de la soldadura con la que se hicieron las pruebas son de 14 mm de ancho y 4.5 mm de alto.

En las pruebas que se realizaron en el laboratorio, la caja de reducción saltó la soldadura sin ningún problema, obteniéndose un consumo máximo de corriente de 0.52 A.

En la figura 5.1 se muestra la prueba de salto de soldadura de la caja de transmisión.



Cordón de soldadura



Cordón de soldadura

Fig. 5.1 Prueba de salto de soldadura.

5.1. Pruebas de capacidad de adherencia y deslizamiento

Esta prueba fue la primera que se realizó en el laboratorio pero para un modelo estático, faltaba comprobarla con un prototipo en movimiento. En la figura 5.2 se muestra el prototipo empleado, al cual también se le realizó la prueba de salto de soldadura. Las dimensiones de las soldaduras son muy variadas, desde 10 a 15 mm de ancho y hasta 4.5 mm de alto.

Se le agregaron un par de pilas para simular el peso final del robot. El peso total del robot prototipo y las pilas fue de 150 g, superior al peso estimado.

Durante las pruebas el robot no se deslizó, no se desprendió ni tuvo problemas durante el salto de soldadura.

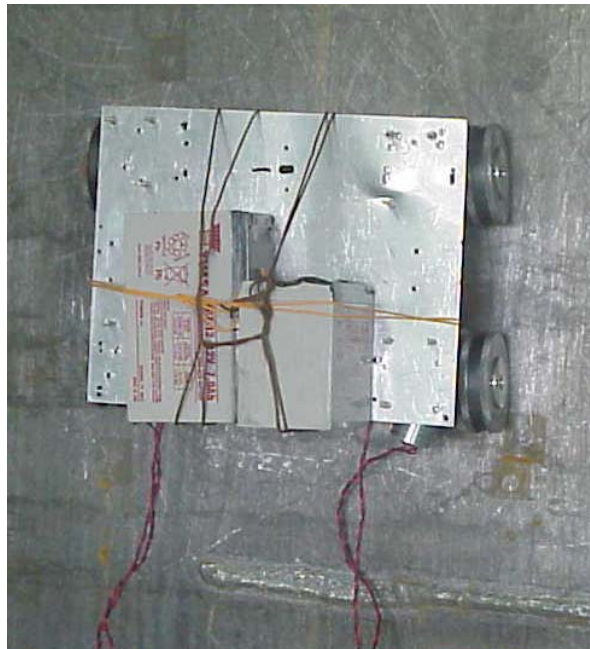


Fig. 5.2 Pruebas de salto de soldadura, adherencia y deslizamiento.

5.1. Característica vertical

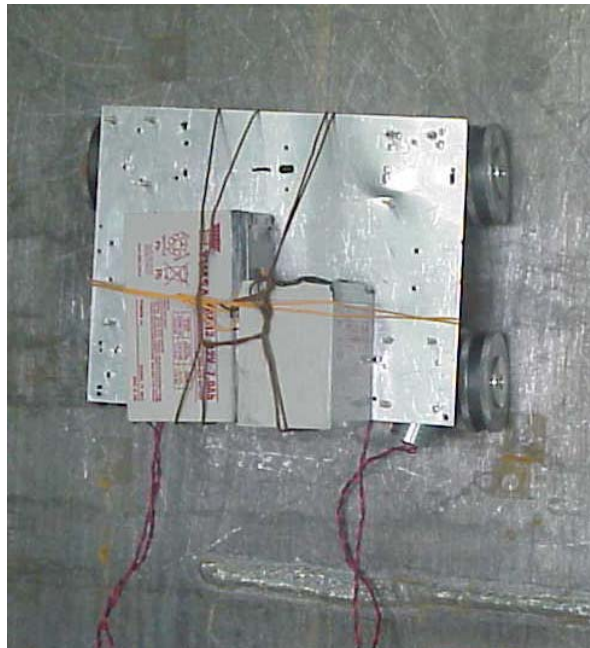
Para estas pruebas se fabricó el sistema electrónico para controlar el movimiento de avance y retroceso de las cajas de tracción. El sistema respondió favorablemente, por lo que no existe ningún impedimento ni problema para su uso.

El consumo de corriente de los motores fue de 0.50 A.

En esta prueba, figura 5.□ el movimiento del sistema no fue lineal tanto en el prototipo de 2 y 4 ruedas, tendía a desviarse a la derecha, aunque no es de extrañarse, debido a que aún no cuenta con un sistema direccionador. Para resolver este problema se utilizará un inclinómetro, que corregirá la verticalidad del robot para realizar una trayectoria recta ascendente y descendente.



a □ Prototipo de 2 ruedas.



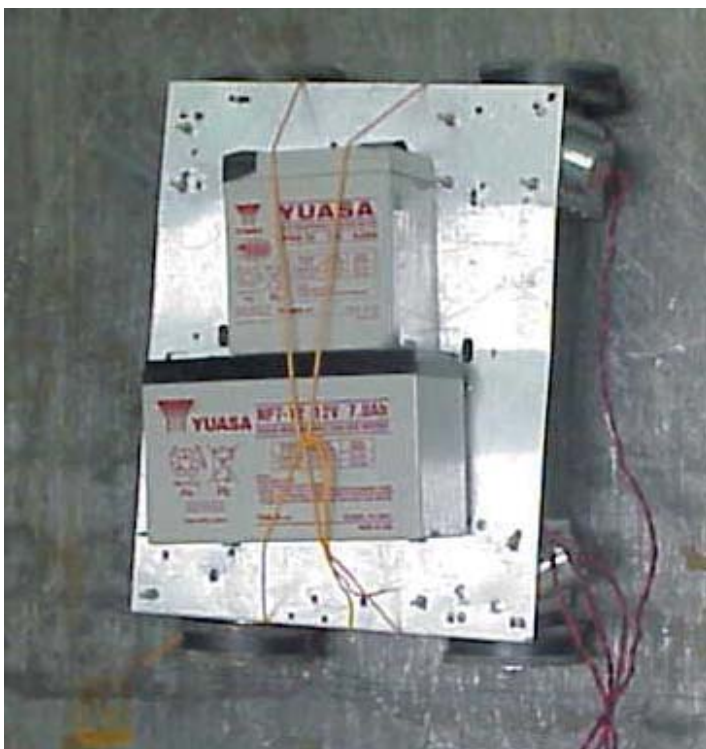
b □ Prototipo de 4 ruedas.

Fig. 5. □ Prueba de laboratorio para desplazamiento vertical.

5.1. Trayectoria horizontal

El prototipo de dos ruedas de la figura 5.1 no es adecuado para realizar una trayectoria horizontal, por lo que solo se realizó la prueba con el prototipo de 4 ruedas.

En la figura 5.4 se muestra el primer prototipo y el robot terminado.



a) Primer prototipo.



b) robot terminado.

Fig. 5.4 Prueba de desplazamiento horizontal.

El movimiento para trayectoria horizontal lo realiza sin ningún problema.

El peso soportado a desprendimiento fue de 1 kg.

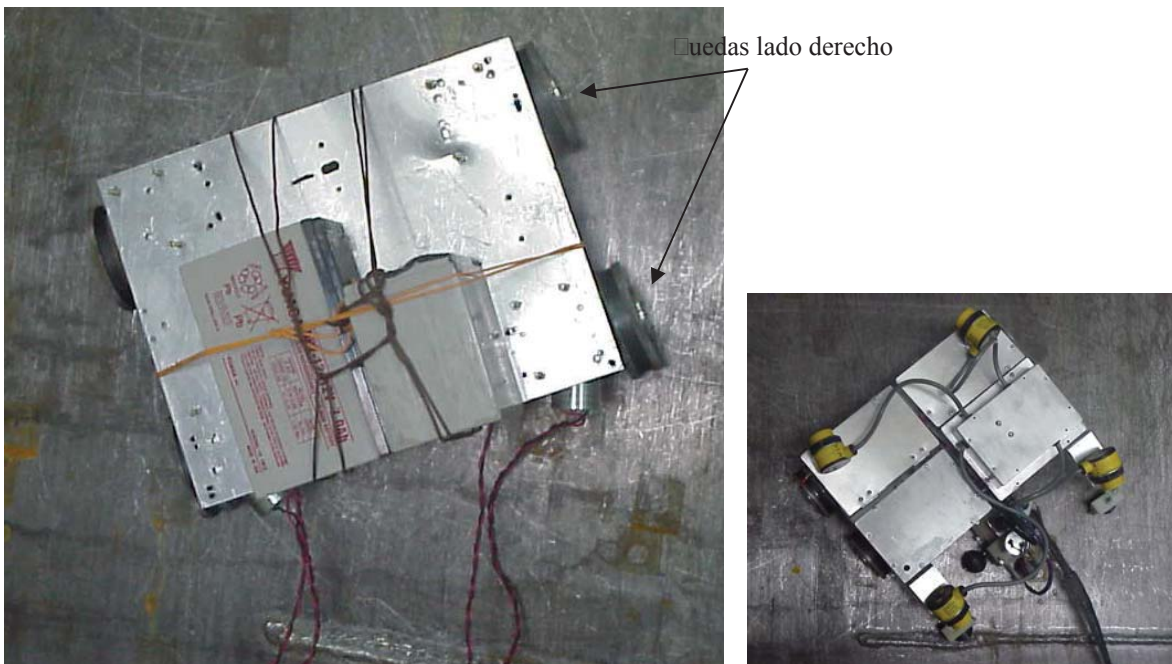
Consumo de corriente de motores 2.2 a 2.2 A.

Velocidad de desplazamiento 10 cm/s.

5.1.5 Traectoria curva

El desplazamiento a lo largo del tanque realizando una trayectoria curva no es usado por el robot en ninguna parte de su recorrido, ya que para cambiar de localización en el tanque, el robot gira sobre su propio eje hasta quedar en posición horizontal o vertical, según sea el caso. Por ejemplo, cuando el robot termina su trayectoria ascendente, gira 90° para quedar en posición horizontal, se desplaza 22.5 cm y de nuevo vuelve a girar 90° hasta quedar en posición vertical y realizar su trayectoria descendente.

Aún así el robot es capaz de realizar este tipo de trayectoria si se requiere, lo que se tiene que hacer es alimentar con diferente voltaje al par de las ruedas derechas e izquierdas. El radio de la curva va a depender que tanta sea la diferencia de voltaje. A menor diferencia de velocidades angulares mayor será el radio. En la figura 5.5 se muestra al robot realizando dicha trayectoria.



a Primer prototipo.

b terminado.

Fig. 5.5 Prueba de trayectoria curva.

5. Pruebas de campo

Una vez realizada la prueba de laboratorio se procedió a las pruebas de campo, estas se realizaron en las instalaciones de Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales (LAPE) ubicada en Tlapuato, Guanajuato. En la figura 5. se muestra el prototipo de doble tracción independiente escalando tanque de almacenamiento.

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



Fig. 5. Prototipo escalando tanque de almacenamiento.

Los resultados fueron los siguientes

- a) La adherencia de las ruedas fue de 100 g de resistencia al desprendimiento.
- b) Al prototipo se le cargo la batería de 2 kg más su propio peso, que en total dan 5.4 kg. Durante las pruebas el peso no provoco ningún problema de inestabilidad.
- c) El consumo de corriente fue de 1 a 1.2 A, este aumentó de corriente debido al peso extra de la batería.
- d) La velocidad fue de 100 cm seg.

Pruebas de prototipo de 4 ruedas de tracción independiente

Para el prototipo de 4 ruedas, se le montó la parte electrónica, con la finalidad de direccionarlo durante el recorrido. Esta prueba se realizó en las instalaciones del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDEI). En la figura 5. se muestra el prototipo de 4 ruedas de tracción independiente con sistema electrónico.

Los parámetros a evaluar fueron los siguientes:

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



Fig. 5. Prototipo inalámbrico escalando tanque de almacenamiento.

Los resultados fueron los siguientes:

- a) La adherencia de las ruedas fue de 15 kg de resistencia al desprendimiento.
- b) Al prototipo se le cargo un peso total de 10 kg. Durante las pruebas el peso lo traslado sin ningún problema.
- c) El consumo de corriente fue de 2 a 2.5 A. Cargando un peso de 10 kg.
- d) La velocidad fue de 10 cm seg.

Pruebas de robot de 4 ruedas de tracción independiente

Para el robot de 4 ruedas, se realizaron las pruebas para la evaluación de los siguientes parámetros:

- a) Adherencia de las ruedas al tanque.
- b) Resistencia al deslizamiento.
- c) Consumo de corriente de los motores.
- e) Velocidad de desplazamiento.
- f) Toma de lecturas del sistema posicionador del transductor.

Los resultados fueron los siguientes:

- a) La adherencia de las ruedas fue de 15 g de resistencia al desprendimiento.
- b) Al robot se le cargo un peso total de 40 g. El valor de la resistencia al deslizamiento fue de 11 g.

Durante las pruebas el peso lo traslado sin ningún problema.
- c) El consumo de corriente fue de 2.1 A.
- d) La velocidad fue de 40 cm seg.
- e) La toma de lecturas de medición de espesores del transductor por medio del sistema posicionador del mismo es confiable, comparándolas con las lecturas manuales, un 5 % de las lecturas coinciden, con las restantes la variacion es de 0.010 mm promedio en espesor.

A continuación en la figura 5. se muestra la foto del robot de medición de espesores fabricado escalando tanque ferromagnético. Este tanque se encuentra en las instalaciones de LAPE [Laboratorio de pruebas de equipos y materiales] ubicado en Tapuato Guanajuato, sus dimensiones son de 1.5m alto y 1.5m radio.

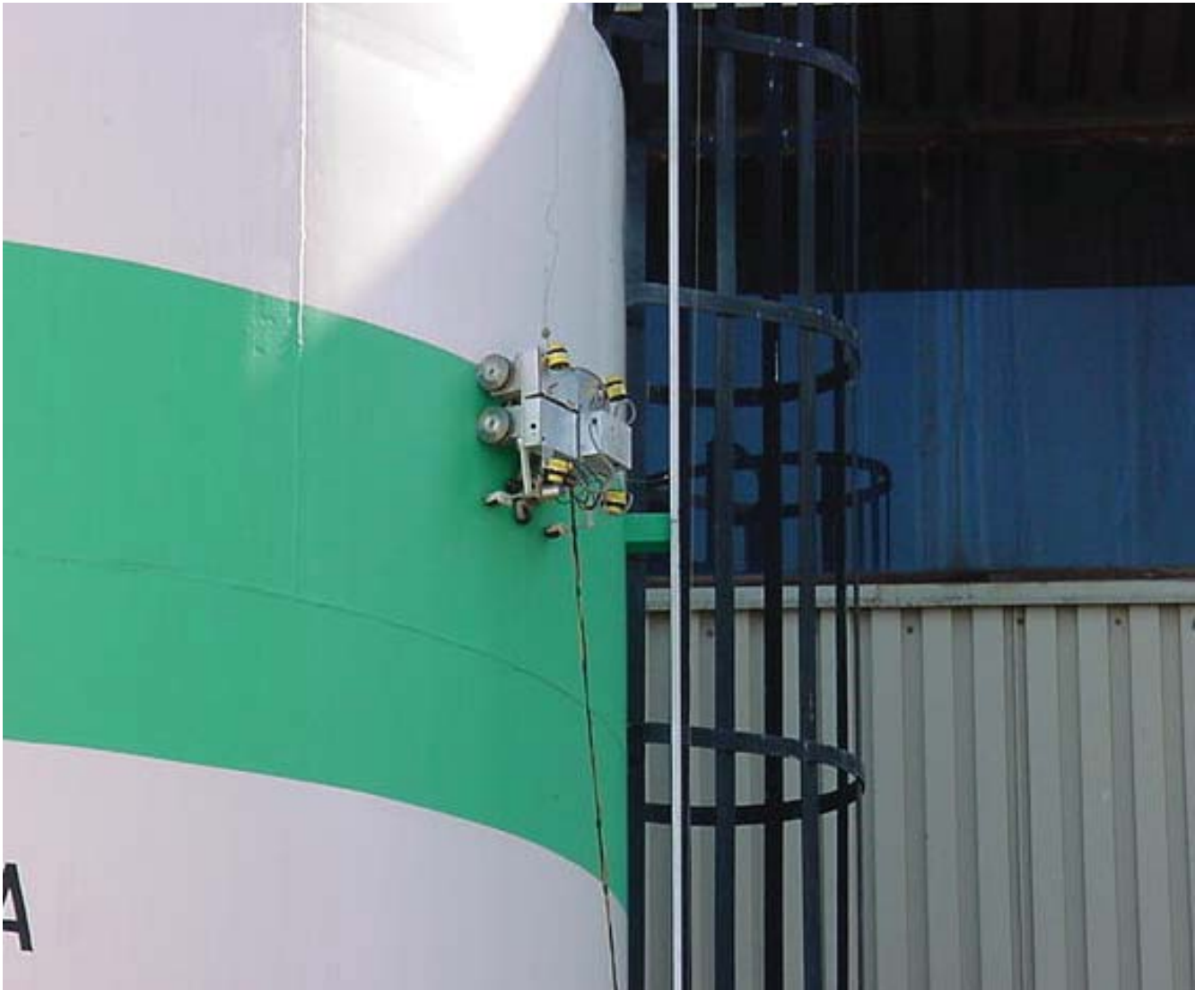


Fig. 5. Robot medidor de espesores por ultrasonido.

5.1 Robot final

En la Fig. 5.1 se muestra el robot terminado y en la tabla 5.1 se muestran los pesos de cada una de las partes del robot. El peso total del robot es menor en 10gr al estimado.

Descripción	Peso (g)
Ruedas	1.424
Cajas de transmisión	1.500
Sistema de transductor	0.400
Chasis	0.004
Cables	1.000
Bomba de agua	0.254
Tarjetas electrónicas	0.050
Sensores ultrasonido	0.000
PE 00 000AL	0.002

Tabla 5.1 desglose de pesos del robot.

Las dimensiones del robot son de 100 x 200 x 15 mm.

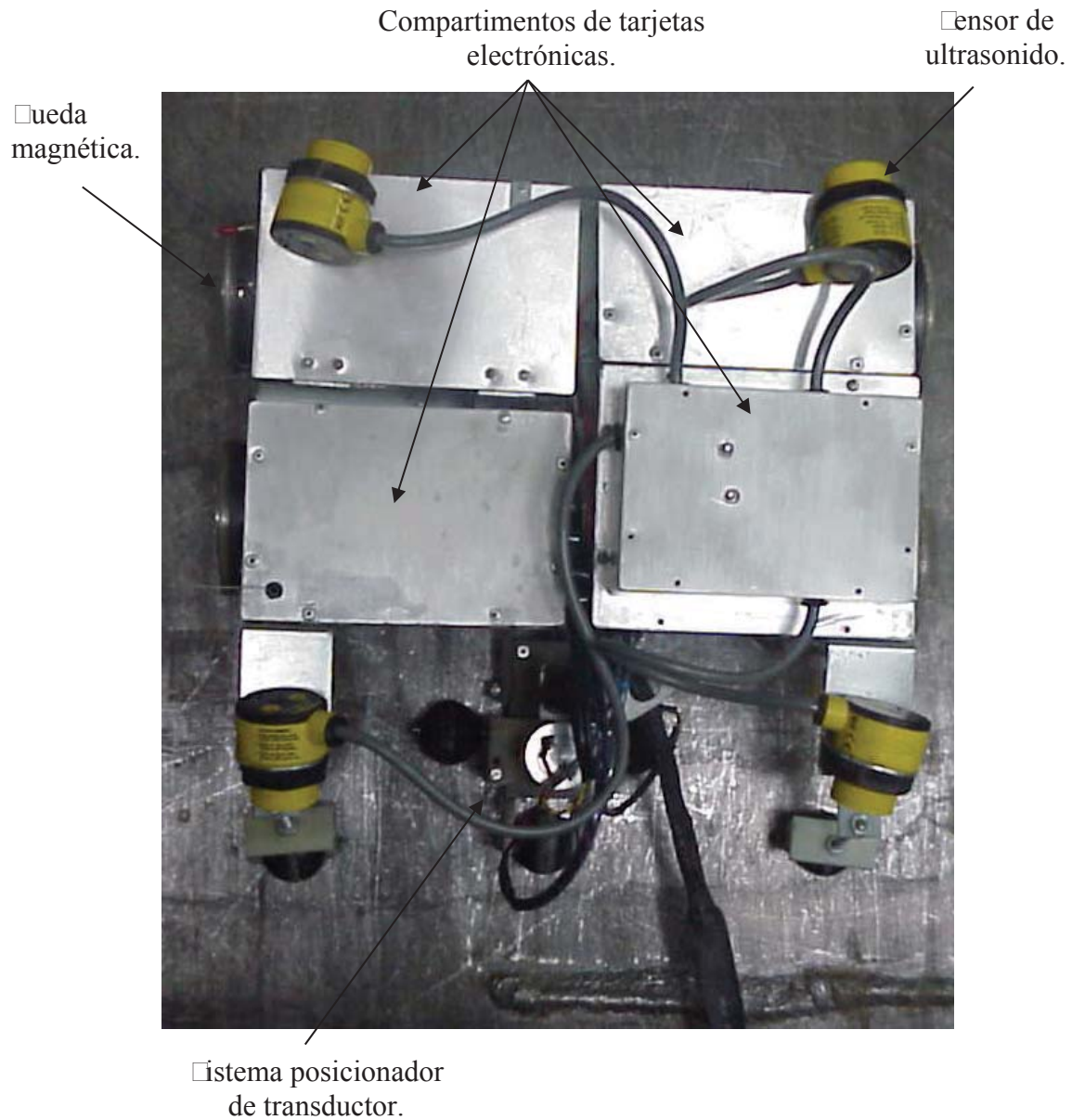


Fig. 5. Robot para medición de espesores por ultrasonido.

De acuerdo a las pruebas de campo y laboratorio realizadas con el robot final, se calculó una eficiencia del 99% en la medición del espesor de las placas con una variación de 0.00% con respecto a la medición manual.

CONCLUSIONES

Este proyecto se ha concluido, logrando un desarrollo tecnológico en los ensayos no destructivos para el CEE y para México, ya que introduce tecnología de vanguardia a sistemas que se venían realizando en forma manual.

El método de medición de espesores por ultrasonido es uno de los más solicitados por la industria, debido a que tiene que verificar que sus tanques de almacenamiento no han sufrido desgaste en las paredes de las placas.

Entre las aportaciones más importantes asociadas al trabajo presentado, se pueden mencionar las siguientes:

- a) Mostrar el conocimiento adquirido durante el desarrollo de un robot móvil diseñado para efectuar tareas de inspección de medición de espesores sobre las paredes de grandes tanques ferromagnéticos.
- b) Uso de una metodología que ha permitido integrar los conocimientos asociados al diseño y manufactura del robot.
- c) Eliminación de andamios, arneses o grúas.
- d) Realiza mediciones más exactas y repetibles.
- e) El trabajo se realiza en menor tiempo.

Aún cuando en éste proyecto se pensó utilizar el robot únicamente para tanques de almacenamiento de grandes dimensiones, como lo son de 15 m de alto por 25 m de radio, esto no impide que se pueda utilizar en tanques de menor tamaño, utilizando robots de menor escala o de mayor flexibilidad.

Otro aspecto importante es que se pueden respetar las normas para tanques de almacenamiento, las cuales indican que las lecturas de medición de espesores deben realizarse cada 22.5 cm de separación entre lecturas (norma ASME de la AEE), lo cual actualmente algunas compañías no lo respetan, realizando las lecturas cada 100 cm. Esto por la dificultad que representa tomar lecturas a altas alturas.

El presente proyecto convierte las actividades manuales de menor eficiencia a actividades robotizadas, reduciendo tiempo y a la vez costos, así como haciendo más confiables este tipo

de lecturas y sobre todo, lo que es aún más importante, el desarrollo se realizó con mano de obra y tecnología mexicana.

Con referencia a los resultados sobre la funcionalidad y realización de las actividades del robot, se puede decir que se lograron, el robot es capaz de desplazar la carga que debe llevar a cuestas y es capaz de realizar las lecturas en forma confiable.

Así el proyecto resulta de gran utilidad y justifica la inversión tanto en investigación y desarrollo, como su aplicación en la industria.

Una de las mejoras que se le pueden realizar al robot, es utilizar materiales de menor peso, porque entre menor sea éste, mayor será la confiabilidad de que el robot no llegue a desprenderse de la pared del tanque.

Existen aplicaciones potenciales de nuevos métodos de inspección en los ensayos no destructivos, como pueden ser radiografía y Partículas magnéticas o actividades como el despintado o pintado de tanques de grandes alturas entre otros, en donde es posible utilizar robots como el descrito en este trabajo.

Referencias

1. Stan inspection, repair, alteration, API Standard 5 second edition, December 195.
2. The American society of mechanical engineers, 195 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, 195.
3. <http://www.elanet.com/el0000.htm>.
4. Muñoz Alcocer José Luis Nivel A, Curso Industrial de Ultrasonido, CEI, 195.
5. Ángel Usategui José A., Robótica práctica, Paraninfo, 1999.
6. McCloy, Robótica una introducción, Prentice Hall, 1999.
7. <http://www.mecamex.net>
8. <http://www.iespana.es/gaixxi/nanotecnologia.htm>.
9. <http://www.darvahouse.com/nanorobots>
10. Higley, Edward Joseph, Manual de diseño mecánico, McGraw-Hill, 1999.
11. Maumeister, Theodore Charles, Manual del ingeniero mecánico, McGraw-Hill, 1990.
12. Higley, Edward Joseph, Theory of machines and mechanisms, McGraw-Hill, 1990.
13. P. Perlov, Ingeniería de diseño, Mir Moscú, 195.
14. Higley, Edward Joseph, Análisis Cinématico de Mecanismos, McGraw-Hill, 1990.
15. Angeles Jorge, Fundamentals of Robotic Mechanical Systems. Springer, 1999.
16. Beer P. Ferdinand y Johnston Russell E., Mecánica vectorial para ingenieros.
17. Benta Giancarlo, Motor Vehicle Dynamics, Modeling and Simulation, World Scientific 1999 McGraw-Hill, 1999.