



**SISTEMA DE CONTROL DE ROBOT MÓVIL PARA TRANSPORTE
DE MATERIAL**

T e s i s

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

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

PRESENTA

ING. JORGE LUIS PÉREZ RAMOS

DIRIGIDA POR

MC y T **JULIO CÉSAR SOLANO VARGAS**

Santiago de Querétaro, Qro., México, Septiembre del 2016

Página dejada intencionalmente en blanco

Página dejada intencionalmente en blanco

A mi familia.

Agradecimientos

A mis padres que han sido un impulso siempre constante durante toda mi vida, ellos que siempre velan por mi bienestar y todo lo que he alcanzado es gracias a ellos, gracias al apoyo, confianza y motivación, por ser las bases que me ayudaron a llegar hasta aquí.

A mis hermanos que me motivan siempre a seguir adelante y ser una persona de bien, agradezco todo el apoyo, la hermandad y la confianza que nos une, y con el paso del tiempo se va reforzando.

Agradezco, a todos mis maestros, gracias por compartir su conocimiento con las nuevas generaciones, aprovecharemos ese conocimiento para bien, todas esas horas de clase no serán en vano.

Agradezco a mi novia, que a pesar de la distancia siempre tengo su apoyo incondicional y todas esas palabras de aliento que no me dejan flaquear, siempre me levanta el ánimo y día a día me da razones para seguir adelante y dar todo de mí en esta gran etapa de mi vida, muchas gracias.

Por último me tomo el espacio para agradecer a dos grandes instituciones, al CONACYT y a CIDESI que sin estos no tendría esta gran oportunidad de seguir preparándome profesionalmente.

¡¡Muchas gracias!!

RESUMEN

En el desarrollo del presente trabajo se describen la metodología en conjunto para poder tener el control de posición aplicado a un robot móvil de tres grados de libertad tipo AGV (Automated Guided Vehicle) con una configuración de ruedas y estructura mecánica en forma de un triciclo convencional, en base a un robot móvil comercial, se realiza la adaptación mecánica y electrónica de sensores mediante la cual se obtendrán las señales para poder tener información acerca del entorno en el que transita el móvil, esto permite manipular de forma precisa y eficiente la traslación y rotación del mismo en un plano cartesiano conocido.

Se implementa una metodología de control en base a algoritmos estudiados y aplicados a nivel industrial, modificando parámetros para efectuar la adaptación en presencia de cambios en la dinámica del sistema, es por eso que el modelo del robot es sometido a una señal de entrada para analizar la respuesta respecto a la conducta deseada, dicha respuesta no es estrictamente la esperada siendo de gran importancia adaptar dichos parámetros del sistema. El robot móvil utiliza un motor de gran potencia acoplado a la rueda delantera que tiene la función de proporcionar la tracción al vehículo en cuestión, mediante un reductor tipo sinfín corona el cual modifica la salida en los ejes en 90° uno respecto a otro, por otro lado se tienen dos ruedas con movimiento libre en la parte posterior del vehículo tal cual triciclo convencional. En el caso de la dirección se hicieron los acoples mecánicos necesarios para colocar un motor-reductor, el cual se encarga de mover la dirección en la que el motor de tracción actúa. El sistema cuenta con un encoder incremental para el motor de tracción el cual nos proporciona la velocidad angular de la rueda motriz, por otro lado un encoder absoluto para el motor de dirección el cual proporciona la posición en la que se encuentra avanzando el motor de tracción conociendo así la orientación final del robot.

Se tienen variables de entrada en el sistema que pueden ser determinadas, una de ellas es la velocidad angular de la rueda de tracción y la posición con respecto al eje de simetría del móvil en la cual está actuando los motores y por los sensores, estas son procesadas mediante el DSP (sigla en inglés Digital Signal Processor) y posteriormente mediante la técnica de odometría se estima la posición y orientación del robot móvil en un marco generalizado con base a los resultados obtenidos del procesamiento realizado por el DSP y el algoritmo de control.

Palabras clave

Robot móvil autónomo, Control adaptativo, MRAC, DSP.

ABSTRACT

This paper describes the methodology, to apply a position control to three degrees of freedom of an AGV (Automated Guided Vehicle). Such vehicle has a wheel configuration and mechanical structure based on a conventional tricycle form. Using a commercial ready to work robot, mechanical and sensor adaptations are performed to the vehicle in order to have signals of the surroundings of the route where the robot is operating. This adaptations to the AGV allow an accurate and efficient displacement of the vehicle over the Cartesian Plane.

Well known previously applied in the Industry Control algorithms are implemented to the vehicle, The methodology of control is implemented based on a studied algorithm and applied to industrial level with some variations in the dynamic changes adaptation of system, therefore that the robot model is submit to an input signal to analyze the response in regard to the desired conduct, this response isn't strictly the expected, adapt this system parameters are very important. The mobil robot used a big powerful motor coupled to the front wheel that work how vehicle traction through to worm gear reducer with a output of axis to 90° relative to each other, on the other hand have two wheels with free movement in back like a conventional tricycle. The direction have the mechanicals couples needed for put a gearmotor that is responsible tha move de direction of robot.

The system has an incremental encoder applied to the traction motor which provides the angular velocity of drive wheel, also has an absolute encoder to the drive motor. We have a lot of input variables in the system that can be determined, one of them is the angular velocity of traction wheel and position with respect to vehicle axis of symmetry where act the motor and sensors, these are processed through the DSP (Digital Signal Processor) and later by means of odometry technique the position and orientation of movil robot is approximates on a generalized framework references based on results obtained from DSP prosecution and algorithm control.

Keywords

Autonomous mobile robot, Adaptive control, MRAC, DSP.

Índice general

RESUMEN	III
ABSTRACT	V
Índice de cuadros	XI
Índice de figuras	XIV
Nomenclatura	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ESTADO DEL ARTE	2
1.2. ANTECEDENTES	4
1.3. DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA	5
1.4. JUSTIFICACIÓN	6
1.5. OBJETIVOS	7
1.5.1. Objetivo General	7
1.5.2. Objetivos Particulares	7
1.6. METODOLOGÍA	8
1.7. HIPÓTESIS	9
1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES	9
1.8.1. Alcances	9
1.8.2. Limitaciones	9
1.9. ORGANIZACIÓN DE TESIS	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	11
2.2. RESEÑA HISTÓRICA	12
2.3. Robótica móvil	12
2.3.1. Configuración Ackerman	13
2.3.2. Configuración triciclo	14
2.3.3. Configuración diferencial	15
2.3.4. Configuraciones no convencionales	17
2.3.4.1. Síncrona	17
2.3.4.2. Omnidireccional	18
2.4. Características adicionales	19
2.4.1. Grados de libertad (GLD)	19
2.4.2. Cinemática de robots móviles	19
2.4.3. Centro instantáneo de rotación (CIR)	20
2.5. Modelos cinemáticos de robots móviles	21

2.5.1.	Hipótesis básicas	21
2.5.2.	Restricciones holonómicas	21
2.5.3.	Modelo Jacobiano general	22
2.5.3.1.	Modelo Jacobiano general inverso	22
2.5.4.	Modelo de un robot diferencial	22
2.5.5.	Modelo de un robot triciclo	23
2.5.5.1.	Jacobiano inverso de configuración triciclo	23
2.6.	Odometría	23
2.7.	Control adaptativo	24
2.7.1.	Control adaptativo (MRAC)	25
2.8.	Procesador digital de señales (DSP)	26
2.8.1.	Ventajas	27
2.8.2.	Consumo y velocidad de reloj	27
2.8.3.	Coste	28
2.8.4.	DSP DE TEXAS INSTRUMENTS	29
2.9.	Sensor tipo giroscopio	30
2.9.1.	Sensibilidad, alcance y Off set	31
2.10.	Modelado matemático de sistemas eléctricos	31
2.10.1.	Cálculo de algunos parámetros	32
2.11.	Robot móvil comercial	33
2.11.1.	Especificaciones técnicas	34
3.	PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS	35
3.1.	Mecanismo de dirección	35
3.1.1.	Pruebas de toque para la dirección	36
3.1.2.	Motor de dirección	38
3.1.3.	Controlador serie MMT-4Q	39
3.2.	Modelado del motor EC600.240BR	41
3.2.1.	Cálculo de parámetros desconocidos	42
3.2.2.	Función de transferencia	42
3.2.2.1.	Simplificación de orden	43
3.2.3.	Espacio de estados	43
3.3.	Diseño de controlador adaptativo (MRAC)	45
3.3.1.	Ley de adaptación	47
3.3.2.	Valor optimo de γ	49
3.4.	Pruebas de odometría	49
3.4.1.	Recorridos largos	53
3.4.2.	Recorridos definidos	58
3.5.	Selección del sensor tipo giroscopio	63
3.5.1.	Características generales	63
3.5.2.	Acondicionamiento de señales	65
3.5.3.	Interpretación de la señal	66
4.	CONCLUSIONES	69
4.1.	TRABAJOS FUTUROS	69
	BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE GENERAL

I	APÉNDICE A	77
II	APÉNDICE B	81
III	APÉNDICE C	85
IV	APÉNDICE D	89

Índice de cuadros

2.8.1. Principales fabricantes de DPS's.	29
2.11.1. Especificaciones técnicas del Tugger.	34
3.1.1. Pruebas de torque para rotas la dirección en Nm	37
3.1.2. Opciones de motores de CD para la dirección.	38
3.1.3. Motor - Reductor ECMB 600 marca TRANSTECNO.	38
3.1.4. Parámetros del controlador MMT-DC24RT100BL	40
3.4.1. Cálculos odométricos teóricos.	53
3.4.2. Datos de prueba número 11.	58
3.5.1. Tabla comparativa de sensores tipo giroscopio.	63
3.5.2. Asignación y lugar de los pines.	64
3.5.3. Especificaciones técnicas del sensor GyroChip II.	65
4.1.1. Pruebas completas de torque para rotar la dirección en Nm	83
4.1.2. Pruebas completas de torque para rotar la dirección en Nm	87

Índice de figuras

1.6.1. Metodología de solución.	8
2.3.1. Esquema general de la configuración Ackerman.	13
2.3.2. Configuración triciclo convencional.	14
2.3.3. Configuración tipo diferencial.	16
2.3.4. Esquema básico de control para seguimiento de trayectoria en arquitectura diferencial.	17
2.3.5. Vista superior de un robot móvil con arquitectura síncrona.	18
2.3.6. a) Diseño de rueda omnidireccional clásica y b) el diseño de una Mecanum wheel.	18
2.3.7. Configuración especial de ruedas sin restricción Holonómica.	19
2.4.1. Variables y relación entre cinemática directa e inversa de forma general.	20
2.4.2. Localización del CIR para algunas configuraciones de robots móviles.	20
2.5.1. Robot no holonómico con arquitectura diferencial.	21
2.7.1. Sistema adaptativo en bucle abierto.	24
2.8.1. Aplicación compleja de DSP.	26
2.8.2. Proceso general de un ADC.	28
2.8.3. Familias de DSP según aplicaciones.	29
2.9.1. Giroscopio de un solo eje de detección.	30
2.11.1. Montacargas NISSAN FORKLIFT modelo 2W4 TGX.	33
3.1.1. Vehículo con sistema mecánico adaptado y sensores instalados.	35
3.1.2. Pruebas de torque en el vehículo sin movimiento lineal.	36
3.1.3. Pruebas de torque en el vehículo sin movimiento lineal.	37
3.1.4. Motor-reductor TRANSTECNO EC600.240BR.	39
3.1.5. Controlador MMT-DC24RT100BL adquirido.	40
3.2.1. Circuito equivalente de armadura de un motor de CD [1].	41
3.2.2. Diagrama de bloques de ecuaciones de estados.	44
3.3.1. Diagrama de bloques de un control adaptable por modelo de referencia (MRAC).	45
3.3.2. Diagrama de bloques desglosado del control adaptable.	48
3.3.3. Simulación para obtener el valor de γ	49
3.4.1. Posición inicial del móvil antes de iniciar la prueba.	50
3.4.2. Marcado del punto de llegada final del móvil.	51
3.4.3. Punto final de recorrido lineal y medición.	51
3.4.4. Gráfica en papel normal.	52
3.4.5. Análisis de las muestras odométricas para distancias cortas.	53
3.4.6. Primera pruebas de recorrido lineal y lectura odométrica.	54
3.4.7. Prueba de recorrido en línea recta.	55
3.4.8. Recorrido de un semi circuito de forma arbitraria.	56
3.4.9. Recorrido de semicircuito puramente odométrico.	57
3.4.10. Recorrido de la prueba número 11.	58

3.4.11. Estimación del error cuadrático medio en la prueba 11.	59
3.4.12. Recorrido experimental número 15.	60
3.4.13. Zona recordada del recorrido total.	61
3.4.14. Estimación del error cuadrático medio en la prueba 15.	62
3.5.1. Configuración de cables del sensor GyroChip II.	64
3.5.2. Diagrama para montaje del sensor.	64
3.5.3. Proceso general de para acondicionamiento de señales.	65
3.5.4. Escala de voltajes a la entrada y salida del giroscopio.	66
3.5.5. Simulación de lectura de giroscopio.	67
4.1.1. Orientación global en grados de giro del motor en la prueba número 11.	91

Nomenclatura

<i>CIR</i>	Centro Instantáneo de Rotación
<i>A</i>	matriz característica
\tilde{a}	error paramétrico
<i>ADC</i>	Analog to Digital Converter
α	ángulo de posición de la rueda de tracción [$^{\circ}$]
<i>B</i>	matriz de entrada
<i>b</i>	vía en configuración diferencial [<i>m</i>]
b_m	coeficiente de fricción viscosa [<i>N/m/s</i>]
<i>C</i>	matriz de salida
<i>CA</i>	corriente alterna
<i>CD</i>	corriente directa
<i>D</i>	matriz de salida directa
$\frac{\Delta\theta}{\Delta t}$	variación de orientación general del vehículo [$^{\circ}/seg$]
Δx	evolución de la posición en <i>x</i>
Δy	evolución de la posición en <i>y</i>
<i>e</i>	tensión inducida [<i>volts</i>]
\ddot{e}	error en la posición
<i>EMC</i>	Error Cuadrático Medio
<i>MRAC</i>	Model Reference Adaptive Control
<i>L</i>	función candidata de Lyapunov
<i>FE</i>	factor de escalameinto
<i>FEM</i>	fuerza electromotriz
<i>G(s)</i>	Función de tranferencia
γ	ganancia de adaptación
<i>GLD</i>	grados de libertad

i_a	corriente de armadura [<i>ampers</i>]
J	momento de inercia [Kgm^2]
$J(p)$	Jacobiano
J^T	Jacobiano traspuesto
$K_m - K$	constante de fuerza electromotriz [$V/rad/s$]
l	Vía del vehículo
\dot{L}	1a derivada de la función candidata de Lyapunov
L_a	inductancia de armadura [H]
LA	lectura actual del giróscopio
LE	lectura escalada del giróscopio
MAC	Unidad Multiplicador - Acumulador
MCU	Microcontroller Unit
$MEMS$	Microelectromechanical Systems
$MIPS$	millones de operaciones por segundo
ω_t	velocidad angular de la rueda propulsora [RPM]
ω_d	velocidad angular de la rueda derecha [RPM]
ω_i	velocidad angular de la rueda izquierda [RPM]
ω_m	velocidad angulas del eje de salida del motor [RPM]
ω_α	velocidad de giro de orientación de la rueda [RPM]
ω	velocidad angular del cuerpo del vehículo [RPM]
p	vector de coordenadas generalizadas
PPR	Pulsos por revolución
q	vector de variables de actuación
R	radio de giro [m]
r	Radio de la rueda propulsora [cm]
R_a	resistencia de armadura [Ω]
RPM	revoluciones por minuto
K_t	par constante de torque del motor [Nm/a]
T_e	par electromagnético [Nm]
θ	ángulo de orientación general del vehículo [$^\circ$]
θ'	variación del ángulo de orientación general del vehículo [$^\circ/seg$]

Nomenclatura

θ_m	posición angular del eje del motor [°]
T_l	Tiempo de lectura del giróscopio
T_L	par de carga [Nm]
\bar{u}	vector de entradas
v	velocidad lineal del heviculo completo [$\frac{m}{s}$]
v_a	voltaje de armadura [volts]
v_d	velocidad lineal de la rueda derecha [$\frac{m}{s}$]
v_i	velocidad lineal de la rueda izquierda [$\frac{m}{s}$]
V_m	Voltaje del motor [volts]
V_{pp}	Voltaje pico-pico de alimentación al giróscopio
v_t	velocidad lineal de la rueda propulsora [$\frac{m}{s}$]
x'	variación de posición en el eje X [m]
\bar{x}	vector de estados
X_G, Y_G	marco de referencia global
y'	variación de posición en el eje Y [m]
\bar{y}	vector de salida

Página dejada intencionalmente en blanco

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En décadas recientes con ayuda de los avances en tecnología han transformado por completo la forma en la que se trabaja en la industria, esto gracias a la implementación de sistemas móviles o robots manipuladores fijos los cuales tuvieron un desarrollo explosivo en la década de los ochenta y noventa como estudio J. Faber et al. en 2013 [2]. En la robótica se analizan distintos puntos de interés como lo son la descripción del sistema físico modelando el sistema tanto con ecuaciones de la dinámica y cinemática, el control (arquitecturas, algoritmos, sistemas, etc.), planificación de rutas, interacción con entornos, evasión de obstáculos, así como la configuración de la rueda que es un punto de análisis importante como muestra Anibal Ollero en su obra «Modelos cinemáticos de robots» en el 2001 [3]. Resultado de esto se obtiene un modelo cinemático que describe las características del sistema de forma matemática modelando las variables de interés para poder hacer un control del sistema [4].

En la década de los cincuenta se comienza a realizar estudios sobre técnicas nuevas de control cuya característica era la de adaptar parámetros de control antes sistemas de alta variabilidad como el de los sistemas de vuelo de aviones, uno de los más utilizados por su eficacia es el control adaptativo con modelo de referencia (MRAC), este tipo de control adapta cambios dinámicos de la planta ante entradas variantes de perturbaciones no programadas y desconocidas; se implementa la teoría de estabilidad basadas en Lyapunov [5, 6]. En cuanto a la velocidad del móvil, para efectos de seguridad y estipulaciones de alcances del proyecto se tiene un control previo implementado el cual garantizará tener una velocidad aproximadamente constante que será el equivalente a la velocidad con la cual un ser humano camina la cual es de $1.39 \frac{m}{seg}$. Es de vital importancia poder tener conocimiento de las perturbaciones a la cual está sometido el sistema, por lo tanto es necesario tener una magnitud de las perturbaciones pudiendo saber así cual es la posible causa que las ocasionan.

El resultado final de la investigación consiste en implementar un sistema de control adaptativo para el motor de dirección del robot móvil, y mediante sensores y la técnica de odometría poder obtener información acerca de la trayectoria descrita por el robot y poder saber así donde está posicionado el mismo durante el trayecto, y mediante estos obtener una posición real del robot mediante la fusión de las señales de los sensores y de la odometría en recorridos con distancias considerables mayores a 100 metros [7]. Así pues, el presente trabajo de investigación surge de la existente necesidad de obtener un sistema confiable de ubicación de un robot móvil tipo AGV el cual se encarga de trasladar material de ensamblado entre estaciones de trabajo de forma eficiente y confiable.

1.1. ESTADO DEL ARTE

En el mercado actual se pueden hallar una gran variedad de robots móviles cuyo objetivo principal es remolcar cargas con el fin de realizar actividades indispensables dentro de la industria; la forma, tamaño y funciones varían en magnitud a las necesidades del cliente. Suelen ir desde los de tipo manipulador mediante controles manuales manejados por personal experto hasta robots móviles dotados de tecnología que les permite seguir rutas predeterminadas mediante el almacenamiento de la ruta. El uso de los robots móviles tipo AGV va en ascenso por su eficiencia a la hora de realizar su trabajo [2]. Para cumplir con una trayectoria establecida los AGV's se guían con claves enterradas en el suelo, líneas magnéticas o líneas pintadas en el suelo de la fábrica el cual les marca el camino a seguir, pero estos métodos son muy ineficientes, caros y necesitan de mantenimiento continuo [8]. Las investigaciones en su mayoría se dirigen al estudio de robots móviles con diferentes tipos de locomoción ya que cada uno tiene un diferente punto de análisis y diferentes sistemas de ecuaciones que describen su capacidad de movimiento y maniobrabilidad. Esto tiene una razón, que este tipo de locomoción mediante ruedas es más eficiente en comparativa ya que las ruedas proveen de buena tracción, buena resistencia al desgaste y tienen un mejor aprovechamiento de la energía que provee el motor en comparación a los sistemas de locomoción tipo oruga o de patas. Aunado a una disminución en la complejidad de mecanismos lo cual los hace la mejor opción para tener un buen control del sistema [9]. Un factor muy importante a considerar al momento de comenzar el diseño general de un robot móvil es la configuración que tendrán las ruedas o mecanismos propulsores (motores de tracción) del sistema según su aplicación [10], esto tendrá un impacto importante al determinar la complejidad del análisis cinemática o dinámico cual es el punto de partida para poder diseñar el sistema de control que será necesario para el robot y estimadores de posición [11]. El motor que se encarga de direccionar al móvil es de vital importancia, ya que se necesita tener un control robusto que garantice colocar el eje del motor en la posición deseada de eso depende el posicionamiento global del vehículo, como en su momento fue estudiado por diversas investigaciones [12, 13, 14, 15, 16]. Por otro lado se estudió que al tener sistemas con cambios presentes en sus dinámicas de forma constante era necesario utilizar algoritmos que absorbieran en su análisis dichos cambios como trabajó Kolsal Muahammet et al. en 2007 [17] implementado control adaptativo en un motor de CD o en el caso de Sayed Ahmed quien trabajó con un control tipo Sliding Mode en el 2008 [18] teniendo buenos resultados para su aplicación e particular.

La configuración de las ruedas es parte fundamental porque de este proceso dependerá el método que se elige para el control de móvil [19], ya que cada configuración tiene restricciones de movimiento o complejidades que son muy importantes consideraciones al momento de implementar métodos de posicionamiento como en el caso de implementar odometría [20], en casos particulares es necesario contar con un sistema redundante de sensores que ayuden a reducir errores acumulados durante trayectorias de grandes distancias [21], los sistemas de sensores más utilizados en estos tipos de aplicaciones es la fusión sensorial de sistemas de visión o sensores tipo escáner los cuales tienen costos muy elevados y son difíciles de controlar [22, 23, 24]. Por otro lado configuraciones que tienen mejor movilidad en espacios pequeños ya que no cuentan con restricciones holonómicas son los móviles con locomoción de ruedas tipo omnidireccional [25, 26], pero estas configuraciones son más difíciles de controlar y necesitan un mejor control, por lo cual es necesario implementarles métodos de control inteligente con sistemas de navegación inercial los cuales garantizan el buen seguimiento de trayectoria [27], pero esto encarece el costo de operación, mantenimiento y construcción del mismo.

Los algoritmos de control aplicados en este tipo de sistemas van desde los convencionales como lo trabajó N. Bacac et al. en el 2014 [14] quien comparó distintos algoritmos convencionales y modificaciones de los mismos para comparar sus desempeños. Por otro lado se analiza la forma en la que el vehículo se guiará para poder seguir la trayectoria como lo implementó Z. Kats y G. Bright en 1992 [9] utilizando guías fluorescentes en el suelo a forma de referencia para el AGV, entre otras técnicas que además para el robot proporcionan información útil para implementar algoritmos inteligentes

que sirven para hacer evasión de obstáculos [28, 29, 30].

Con base a la evidencia de trabajos anteriores mencionados se puede decir que es posible poder contar con una tecnología propia aplicada a la construcción de los robots móviles tipo AGV; con esto dejar de depender completamente del mercado internacional como se hace hasta el momento a falta del desarrollo tecnológico en este tipo de robots.

1.2. ANTECEDENTES

Hoy en día es muy común encontrar a un sinnúmero de tipos y configuraciones de robots móviles tipo AGV (por sus siglas en inglés Automated Guided Vehicle) de uso industrial, que desarrollan tareas desde transporte de materiales dentro de una línea de producción, aumentando significativamente la productividad, ya que esta tarea la hace de forma automática con la menor intervención humana posible a excepción de casos en las que el robot móvil llegue a sufrir una avería o algún inconveniente. Una de las causas por la cual el uso de estos robots móviles se encuentra en constante ascenso es consecuencia de su flexibilidad en cuanto a cambios en el papel que desempeñen esto está ligado al método utilizado como en 1992 donde Z. Katz y G. Bright [9] quienes emplearon sistemas de guías luminosas, los cuales presentaban problemas con sistemas luminosos externos, los cuales son encontrados con frecuencia en un ambiente industrial, por otro lado en el 2002 T. Park et al. [24] trabajaron con un AGV al cual le implementaron una plataforma giratoria para un sensor escáner que se encargó de hacer reconocimiento del ambiente para poder hacer un seguimiento de trayectorias el cual quedó solo en simulación.

Este tipo de robots móviles sufren de muchos inconvenientes como el seguimiento de una trayectoria, ya que de gran dificultad tener un control apropiado de su orientación y ubicación en todo momento, ya que se necesita de sistemas de dirección precisos como investigo Shang-zun Y. et al. en el 2009 [31] quien implementó control de velocidad en este caso en un motor de CD mediante métodos avanzados como fue un control adaptativo difuso.

Para poder contar con información real del posicionamiento del cuerpo del robot se usan sistemas de instrumentos que den referencias redundantes y datos que ayuden al sistema a saber su ubicación, pero muchos de estos como las cámaras de video u otras combinaciones de sensores son de costo muy elevado encareciendo el desarrollo de este tipo de proyectos. Estos métodos hacen que el costo de los Robot móviles comerciales sea elevado, ya que se requiere de una arquitectura electrónica robusta y un sistema de control capaz de desarrollar tareas complejas y tomas de decisiones por sí solo, este control es implementado en computadoras que tiene buena velocidad de procesamiento, en PLC de gama alta o más recientemente en DSP los cuales cumplen ampliamente con las necesidades de este tipo de proyectos [32, 33]. Por otro lado los sensores son propensos a ruido ocasionado por el medio en el que transita ya que es el caso de nuestro robot el cual estará sometido a ambientes con fuentes de ruido no controladas, F. Rohit et al. que implementaron en el 2015 [34] un análisis y estimación de parámetros para lecturas de errores y poder obtener aproximaciones más certeras considerando los efectos del ruido y el error que este podía llegar a producir. J. Llagunes Font y J. Battle emplearon en el 2006 [35] un sistema de posicionamiento de un robot en configuración triciclo mediante un sistema de un goniómetro láser y un conjunto de reflectores.

Es importante mencionar que este proyecto tuvo como antecedente la implementación de un robot seguidor de líneas, esto como primer intento de solución del problema, sin tener éxito alguno, debido a la demanda de mantenimiento, poca robustez del sistema y pobre desempeño ante cambios en la dinámica del sistema. En este caso el sistema de control aplicado fue algoritmo de control convencional, el cual no era capaz de operar bajo cambios constantes en la dinámica del sistema, además de no cumplir con los tiempos estipulados por la línea de producción. Este sistema de arrastre presentaba serios problemas al momento de hacer seguimiento de la trayectoria, ya que tenía la necesidad de mantener en óptimas condiciones el área de tránsito siendo susceptible a desorientarse. Cuando el robot perdía el curso se reorientaba de manera manual y esto representaba pérdidas enormes de tiempo y personal, lo que no permitía cumplir con el tiempo objetivo de producción.

1.3. DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

En un gran número de empresas se requiere de transportar material de una estación de trabajo a otra dentro de naves para procesarlas o realizar trabajos diversos, consecuentemente se tiene la problemática de trasladar dichos materiales en grandes cantidades por pasillos reducidos y difíciles de maniobrar, en tiempo y forma según lo planeado.

El AGV predecesor demostró tener un sistema de control con un pobre desempeño, esto ante cambios continuos y no parametrizados de las perturbaciones en las que operaba, estas perturbaciones eran por varias causas las cuales representaban serios cambios en la dinámica.

Dada la naturaleza cambiante del sistema, es indispensable contar con una metodología de control con el propósito de absorber cambios no considerados en la dinámica inicial del modelado, también obtener evidencia de la posición y ubicación del móvil dentro de un marco de referencia global descrito por un recorrido definido, en cualquier momento que se necesitara saber de esta información, esto con el fin de poder saber donde el robot se localiza en un determinado tiempo de recorrido, que es información vital para tener un control en los tiempos de entrega de materiales entre las líneas de producción de la empresa.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El aumento en la exigencia en la producción de las fabricas conlleva a automatizar sus procesos haciéndolos mas eficientes, esta es la causa principal del por que el uso de la robótica móvil va en aumento gracias a su flexibilidad y enorme campo de aplicación. En consecuencia se requiere de un sistema de control robusto ya que el espacio y movilidad del robot móvil están limitadas por la geografía del área de trabajo. El uso de los vehículos guiados automáticamente (AGV) va en aumento, por su enorme campo de aplicación, y por la flexibilidad en el seguimiento de rutas, estos se usan en la industria para traslado de materiales, estibado de productos, movilidad, entre otras muchas aplicaciones.

Un controlador convencional de ganancias fijas son aplicados en sistemas en la mayoría de las veces lineales, donde los parámetros permaneces constantes en el tiempo. Dada la naturaleza que presentan este tipo de sistemas los cuales operan en presencia continua de perturbaciones de diferentes tipos, es necesario contar con un algoritmo de control que sea capaz de seguir operando en presencia de cambios continuos de la dinámica del sistema sin poner en peligro la estabilidad del sistema en un tiempo determinado.

Los controles de tipo convencional no son capaces de absorber perturbaciones de magnitudes considerables por lo tanto es necesario la aplicación de un sistema de control adaptable el cual si pueda absorber estos cambios sin poner en riesgo la operación del sistema. Por la naturaleza del sistema implicado se ajusta a un sistema de control adaptable por modelo de referencia (MRAC), que tenga la capacidad de adaptar los cambios en la dinámica a fin de mantener un funcionamiento adecuado del proceso.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Este proyecto tiene como principal objetivo desarrollar y aplicar un método de control adaptativo con modelo de referencia (MRAC), que permita tener conocimiento de la orientación y ubicación del robot móvil, absorbiendo los cambios de la dinámica presentes durante el recorrido.

1.5.2. Objetivos Particulares

- Diseñar un controlador (MRAC) que tenga la capacidad de adaptarse a cambios en la dinámica del proceso.
- Obtener un valor adecuado para la velocidad de adaptación dada por el parámetro γ mediante simulaciones.
- Realizar pruebas de recorrido para comprobar el error con odometría.
- Obtener un conocimiento de la posición y ubicación a lo largo de una trayectoria conocida.
- Determinar la magnitud de error en posición y determinar posibles causas.

1.6. METODOLOGÍA

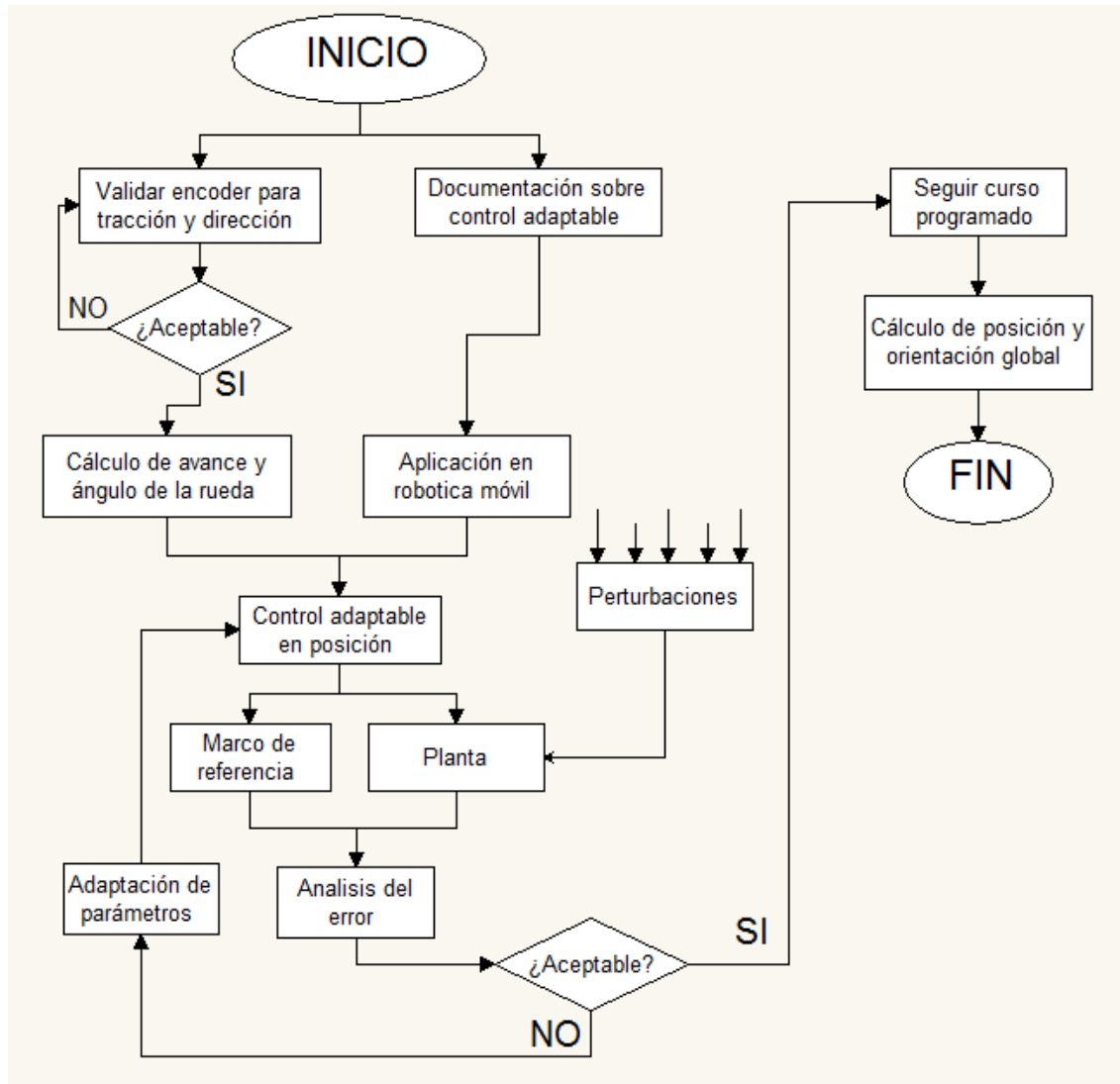


Figura 1.6.1: Metodología de solución.

1.7. HIPÓTESIS

Si se cuenta con un robot móvil instrumentado y una ruta definida por la cual transita, entonces es posible aplicar un sistema de control adaptativo con modelo de referencia (MRAC), que se adapte a perturbaciones en la dinámica del sistema y permita tener conocimiento de su ubicación y posición durante el recorrido.

1.8. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.8.1. Alcances

- Velocidad máxima de operación permitida para el robot es de 1.39 m/seg.
- El robot se detendrá en presencia de obstáculos dinámicos o estáticos.
- Se remolcará una carga máxima total de hasta 2.5 toneladas.
- Diseñar y aplicar un controlador capaz de adaptarse a cambios en la dinámica del sistema.
- Tener conocimiento de la posición y orientación del móvil en un marco global, en un determinado tiempo del recorrido.

1.8.2. Limitaciones

- No se considera el desgaste en las ruedas que pueden provocar lecturas erróneas para la odometría.
- Tiempo limitado para efectuar experimentación en planta.
- Eficiencia disminuida al transitar en terrenos con inclinaciones considerables.
- No se puede modificar el control para aumentar o disminuir la velocidad del móvil.

1.9. ORGANIZACIÓN DE TESIS

Esta tesis de maestría esta estructurada en capítulos incluyendo éste de la siguiente forma:

- El capítulo dos, **MARCO TEÓRICO**, es el la parte preliminar de gran importancia que contiene la teoría necesaria para poder entender la temática de la tesis, así como también el conjunto de metodologías y ecuaciones necesarias para poder aplicar lo necesario para solucionar el problema, así como una pequeña reseña historia sobre los avances tecnológicos sobre el tema tanto como una investigación documentada sobre publicaciones científicas que trabajan con temas relacionados.
- El capítulo tres, **PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS**, en este se describe cada unos de las modificaciones hechas al sistema con el fin de hacer las adaptaciones tanto electrónicas como mecánicas para poder aplicar el control a robot móvil. Se obtiene la caracterización del robot móvil y de los sensores que servirán para hacer las pruebas de odometría y recorrido. Se obtienen gráficas del comportamiento de cada uno de los subsistemas analizados.
- El capítulo cuatro, **CONCLUSIONES**, se destacan las conclusiones más relevantes y se propone una serie de trabajos futuros para distintas líneas de investigación.

La tesis tiene, por último, un apéndice que, contiene tablas de pruebas en extenso, algunas hojas de datos, pruebas de recorrido en gráficas y demás contenido de vital importancia en la investigación.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

En concepto, los robots móviles son dispositivos electromecánicos capaces de efectuar un desplazamiento en un espacio de trabajo. Esto depende principalmente de la configuración de locomoción que tenga, estos pueden ser clasificados según la locomoción que tengan como:

- Orugas.
- Bípedos.
- Arañas o Hexápodos.
- Con ruedas.

Este trabajo de investigación está enfocado en los robots móviles que efectúan su locomoción mediante ruedas en distintas configuraciones como se platicará en temas posteriores. Se analizarán los efectos que tienen las distintas configuraciones de ruedas en los robots móviles y el impacto que estas producen a la hora de realizar un modelado matemático y de proponer un algoritmo de control.

La naturaleza del proyecto nos obliga a direccionar los esfuerzos en los móviles con una configuración motriz en forma de triciclo convencional, la cual será analizada después. Teniendo este arreglo se analiza de forma cinemática directa e inversa tomando en cuenta todas las variables a controlar las cuales serán de suma importancia en el desarrollo de la investigación.

Comprendiendo como las variables mecánicas intervienen en el movimiento del robot, pasaremos a centrarnos en la parte de instrumentación del mismo, ya que los sensores constituyen una parte fundamental del robot, ya que con ellas se puede tener una idea del ambiente que rodea al robot y poder así tomar decisiones en este caso el direccionamiento del sistema.

Este trabajo de tesis presenta el análisis necesario para poder desarrollar un control de dirección en un robot con configuración triciclo convencional para ser aplicado en un robot industrial real, no obstante las pruebas se realizan en un modelo escalado del robot real.

2.2. RESEÑA HISTÓRICA

Por muchos años el ser humano ha manufacturado máquinas con el objetivo primordial de imitar partes y movimientos realizados por el cuerpo humano. En el antiguo Egipto escultores ensamblaban brazos móviles a las estatuas de los dioses las cuales eran accionadas mediante cuerdas por sacerdotes, los cuales adjudicaban que dichos movimientos eran inspirados por sus dioses. Por otro lado los griegos construyeron estatuas y sistemas de complejidad sencilla efectuando movimientos mediante sistemas hidráulicos, los cuales servían como entretenimientos para gobernantes y personas acaudaladas.

Transcurrido el tiempo, en los siglos *XVII* y *XVIII* en Europa se manufacturaban muñecos humanoides de tamaño real con sistemas ingenioso para efectuar movimientos muy parecidos a los que realiza un ser humano. Hablando puntualmente, en los siglos antes mencionado el inventor Jacques de Vaucansos construyó sistemas mecánicos parecidos a humanos los cuales para diversión de los espectadores podían simular tocar instrumentos musicales.

Henri Maillardert construyó en 1805 un humanoide, el cual era capaz de hacer dibujos de una forma ingeniosa mediante poleas y cuerdas que accionaban las extremidades del mismo. Los esfuerzos no solo se centraban en formas nuevas de entretenimiento si no también estaban pensada para efectuar tareas repetitivas que los humanos hacían, en un principio para ser un poco más específicos por citar una de ellas fue el desarrollo de hiladoras giratorias como las creadas por Hargreaver, Crompton, Cartwright y Jacquart en el lapso de 1770 y 1801. En décadas recientes, los avances en la tecnología han permitido contar con sistemas de computadoras electrónicas, actuadores con sistemas retroalimentados, teologiza de sensores mas sofisticados y sistemas mecánicos cada vez más complejos, en conjunción son factores determinantes para el desarrollo de la robótica como los fue en la década de los 50's. Temas actuales de investigación es la parte de dotar de inteligencia artificial a los robot apara toma de decisiones tan como lo haría un humano experto, por otro lado también se trabaja mucho en la parte de hacer a los robots cada vez mas parecidos a los humanos.

Como tal la robótica surgió con un concepto aceptado en los años 60's donde se asumió que es una tecnología multidisciplinaria, por usar recursos proporcionados por otras ciencias, ya que se requiere de un proceso de diseño, construcción del robot donde intervienen ciencias como: la electrónica, matemáticas, mecánica e informática, todas ellas conjugadas en armonía. Se podría seguir hablando de los adelantos tecnológicos en la materia, pero no es el tema de estudio de eta investigación, solo mencionaremos que la automatización y la robótica tienen una estrecha relación tecnológicamente hablando dentro del contexto industrial donde se aplican sistemas automatizados capaces de efectuar tareas repetitivas en tiempos y de formas muy exactas mejorando la producción entre otras tantas ventajas.

2.3. Robótica móvil

El estudio de la robótica móvil con ruedas se encarga de encontrar una solución simple para conseguir movilidad en terrenos con superficies no precisamente uniformes en presencia o no se obstáculos obteniendo funciones muy especializadas de los sistemas para resolver problemas en tareas cotidianas hasta tareas muy especializadas que en algunos casos puedan realizar tareas que son peligrosas para los humanos, aburridos, sucios o imposibles de realizar por un ser vivo.

Al momento comenzar con el desarrollo de un sistema móvil se deben considerar las limitaciones y dificultades que se tendrán una de ellas y más importante es el deslizamiento en la rueda motriz la cual proporcionara la tracción y la capacidad de movimiento el robot móvil. En la mayoría de los modelos se tienen que considerar hipótesis de trabajo como:

1. El robot se mueve en una superficie plana.
2. Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo.
3. Se supone que las ruedas se mueven con rodadura pura; es decir, el deslizamiento es despreciable en el periodo de control.
4. El robot no tiene partes flexibles.
5. Durante un periodo de tiempo suficientemente pequeño en el que se mantienen constante la consigna de dirección, el vehículo se moverá de un punto al siguiente a lo largo de un arco de circunferencia.
6. El robot se comporta como un sólido rígido, de forma que si existen partes móviles (ruedas de dirección), éstas se situarán en la posición adecuada mediante el sistema de control.

Se pueden diseñar robots móviles con distintos tipos y configuraciones de locomoción, todas ellas diferentes entre si, desde su constitución mecánica hasta las ecuaciones matemáticas que las rigen, reflejando la aplicación para cada una, movilidad, maniobrabilidad, dimensiones, carga útil, fuerza de arrastre, entre otros aspectos. En subtemas subsecuentes analizaremos cada una de las configuraciones de rueda para analizar ventajas y desventajas de los sistemas.

Los modelos geométricos de los robots guardan una estrecha relación entre los valores de las variables asociadas y los actuadores (velocidad y posición de la rueda) con respecto a la postura del robot (orientación o posición general) de un marco de referencia generalizado.

2.3.1. Configuración Ackerman

Este tipo de configuración de ruedas es el mas utilizado en la actualidad, ya que es el modelo que utilizan la mayoría de los vehículos motores comerciales. Básicamente el sistema consiste en dos ruedas traseras que proporcionan la tracción al vehículo estas no proporcionan dirección, mientras que las dos delanteras mediante un movimiento sincrónico de giro dan la dirección en la trayectoria del vehículo siempre una de las ruedas esta ligeramente direccionada a un ángulo mayor a la otra, esto por cuestiones mecánicas y de localización de su *CIR* (centro instantáneo de rotación), como se puede observar en la fig. 2.3.1.

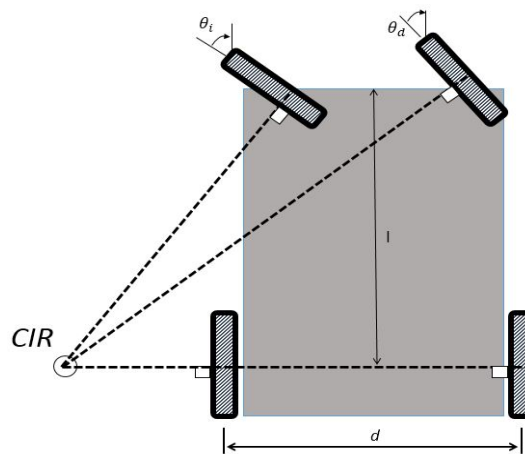


Figura 2.3.1: Esquema general de la configuración Ackerman.

Este tipo de configuraciones como se mencionó se tienen dos ángulos de giro independientes por rueda, esto dificulta mucho al momento de implementar control, por lo tanto eso se soluciona alineando las ruedas a un punto en común.

2.3.2. Configuración triciclo

A grandes rasgos esta configuración a diferencia de las otras antes mencionadas se basa en dos ruedas fijas traseras subactuadas, no obstante la rueda única delantera es la que se encarga al mismo tiempo de dos funciones, una es dar la tracción al robot móvil y la otra es dar también la dirección en la que se esta accionando dicha tracción. por esta razón su complejidad es menos a la de Ackerman por tanto es un poco más sencillo al momento de maniobrar, no obstante esto también trae desventajas importante a considerar en las aplicaciones. Una de ellas es la falta de estabilidad en terrenos difíciles, y problemas serios al circular por superficies con pendientes pronunciadas ya que el centro de gravedad tiende a desplazarse esto conlleva a una pérdida seria de tracción o en caso más graves a velocidades considerables el móvil puede llegar a sufrir volcaduras.

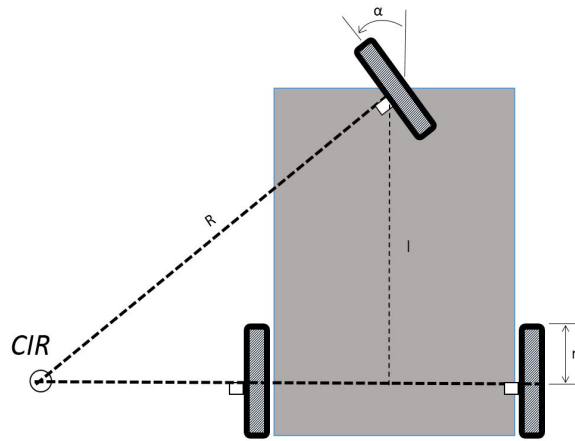


Figura 2.3.2: Configuración triciclo convencional.

Como se logra apreciar en la imagen pasada, este tipo de configuración tiene estrictas restricciones al momento de dar giro, no se pueden realizar giros de $\pm 90^\circ$. Una ventaja es el fácil posicionamiento del CIR ya que se encuentra en el punto donde coinciden las líneas entre las ruedas traseras y la única rueda motriz. También se tiene establecido que las variables de control de este sistema son las velocidades tanto angular como lineal de la rueda de tracción, con esto y mediante el modelo cinemático del robot se puede saber con precisión las trayectorias deseadas y con ello poder obtener el posicionamiento del mismo.

Para poder conocer, la posición del cuerpo se focaliza el CIR que es la intersección entre la línea de acción de las ruedas traseras con la línea de acción de la rueda motriz, la distancia entre las ruedas traseras y la de acción es denotado por l (vía del vehículo). El radio de la rueda propulsora, su velocidad de giro de la rueda (o su velocidad lineal $v_t = r \cdot \omega_t$) y el ángulo de orientación r , ω_t y α respectivamente.

Teniendo los datos anteriores, tomando como punto central del vehículo justamente a la mitad de la línea entre las dos ruedas traseras y sabiendo el radio de giro R podemos la velocidad lineal del vehículo y la velocidad angular, los cuales son factores importantes para realizar el control.

$$R \cdot \omega = v \quad (2.3.1)$$

La ec. 2.3.1 puede ser definida con ayuda de la velocidad de giro de la rueda motriz y de su ángulo de direccionamiento, entendiéndose que como

$$v = r \cdot \omega_t \cdot \cos \alpha \quad (2.3.2)$$

$$\alpha' = \omega_\alpha \quad (2.3.3)$$

obteniendo la variación del ángulo de orientación del vehículo en general calculada de forma sencilla con

$$\omega = \theta' = \frac{d\theta}{dt} = \frac{r \cdot \omega_t \cdot \sen \alpha}{l} = \frac{v \cdot \sen \alpha}{l} \quad (2.3.4)$$

Sabiendo la ubicación del centro del vehículo considerado como el punto que corta entre la línea de acción de l y una perpendicular a la rueda motriz; descrita por las ecuaciones:

$$x' = \frac{dx}{dt} = v \cdot \cos \theta \quad (2.3.5)$$

$$y' = \frac{dy}{dt} = v \cdot \sen \theta \quad (2.3.6)$$

Teniendo claras las velocidades deseadas tanto lineal v como angular ω , se obtienen las variables de control α y ω_t se obtienen mediante:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{l}{R} \right) = \arctg \left(\frac{l \cdot \omega}{v} \right) \quad (2.3.7)$$

$$\omega_t = \frac{v_t}{r} = \frac{\sqrt{v^2 + \omega^2 \cdot l^2}}{r} \quad (2.3.8)$$

Analizando la postura del vehículo en el transcurso del tiempo en función de las ecuaciones anteriormente analizadas se tiene:

$$R = \frac{l}{\tan \alpha} \quad (2.3.9)$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta t} = \frac{r \cdot \omega_t \cdot \sin \alpha}{l} \quad (2.3.10)$$

2.3.3. Configuración diferencial

Arquitectura generalmente caracterizada por contar con dos ruedas motrices independientes, esto quiere decir que cada rueda va acoplada a un motor con velocidad y aceleración independiente, en dado caso que estas sean de la misma magnitud y sentido el robot tiende a tener una trayectoria en línea recta. Con la variación de las velocidades se puede conseguir que el robot de giro hasta en su propio eje, esto es una clara ventaja ante otras arquitecturas analizadas en temas anteriores.

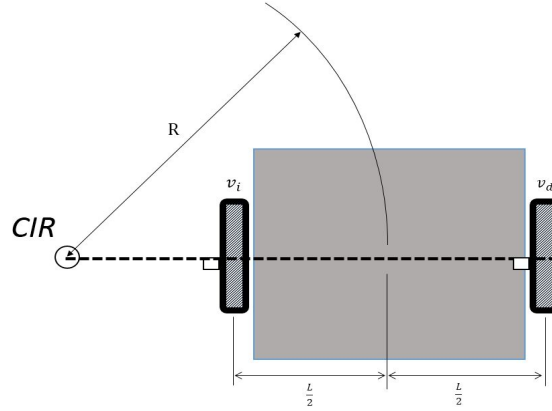


Figura 2.3.3: Configuración tipo diferencial.

Como se observa en la figura 2.3.3 la cinemática de este modelo es muy utilizada en la robótica que esta definida por su posición en el plano con respecto a un marco de referencia global (X_G, Y_G) y una orientación del eje principal del cuerpo θ con respecto al eje de la horizontal. Por otro lado describimos las variables de control como ω_i y ω_d que representan a la velocidad angular de la rueda izquierda y derecha respectivamente. El radio de las ruedas son datos relevante representada por la letra r , la velocidad lineal y angular del vehículo en un marco general de análisis esta dada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{v_d + v_i}{2} = \frac{(\omega_d + \omega_i) \cdot r}{2} \quad (2.3.11)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_i}{b} = \frac{(\omega_d - \omega_i) \cdot r}{b} \quad (2.3.12)$$

Donde $v_i = \omega_i \cdot r$, $v_d = \omega_d \cdot r$ y por último b es la llamada vía que representa la distancia entre las rudas motrices.

El sistema evolución en la postura del robot en función de las variables de control se expresan como:

$$R = \frac{b}{2} \cdot \frac{v_i + v_d}{v_d + v_i} \quad (2.3.13)$$

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{v_d - v_i}{b} \quad (2.3.14)$$

Siendo; R el radio de giro y $\Delta\theta$ es el ángulo girando por el robot, podemos obtener fácilmente la evolución de las coordenadas de posición del robot en cualquier momento.

$$\Delta x = R(\text{sen}(\theta + \Delta\theta) - \text{sen} \theta) \quad (2.3.15)$$

$$\Delta y = -R(\text{cos}(\theta + \Delta\theta) - \text{cos} \theta) \quad (2.3.16)$$

Esta arquitectura es muy usada en la robótica por la simplicidad a la hora de realizar control. Para un seguimiento de trayectoria podemos analizarla en la siguiente imagen.

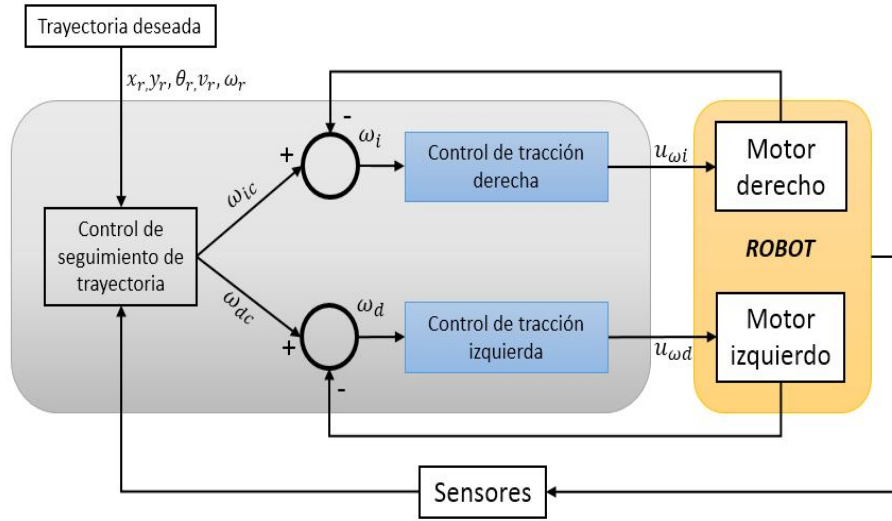


Figura 2.3.4: Esquema básico de control para seguimiento de trayectoria en arquitectura diferencial.

2.3.4. Configuraciones no convencionales

Existen una variedad enorme de diseños de ruedas no convencionales, estas ruedas tienen muchas ventajas en cuanto a movilidad, eliminando restricciones holonómicas, resultado en movimientos omnidireccionales de los robot haciéndolo útiles para transitar en secciones y caminos limitados en dimensiones, y dar vueltas en sus mismo centro de gravedad sin dificultad alguna. Esto también conlleva a tener ciertas desventajas que son de vital importancia en aplicaciones específicas. Una de ellas es la disminución de la tracción con el suelo, al tener una menor área de contacto, sin ahondar más en el tema mencionaremos algunos de los tipos más emblemáticos de ruedas de tipo no convencional.

2.3.4.1. Síncrona

Consiste generalmente en la actuación simultánea de todas las ruedas del móvil, estas giran de forma sincronizada. en esta configuración la transmisión de potencia se desarrolla por medio de engranajes (synchro drive) o por medio de bandas. Existen modelos un poco más especiales donde el sincronizado de las ruedas no se hace de forma mecánica sino de forma electrónica colocando un motor en cada una de las ruedas, este tipo de robot por la naturaleza de su arquitectura recae en lo de tipo holonómico ya que no tiene restricciones de movimiento en un plano 2D.

En un marco generalizado esta configuración está compuesta por un mínimo de tres ruedas, todas ellas rotan en la misma dirección mediante un acople de cadenas o bandas dentadas, de este modo se garantiza una rotación sincrónica de las ruedas en cuanto a dirección y velocidad, con lo cual se puede controlar la orientación del móvil.

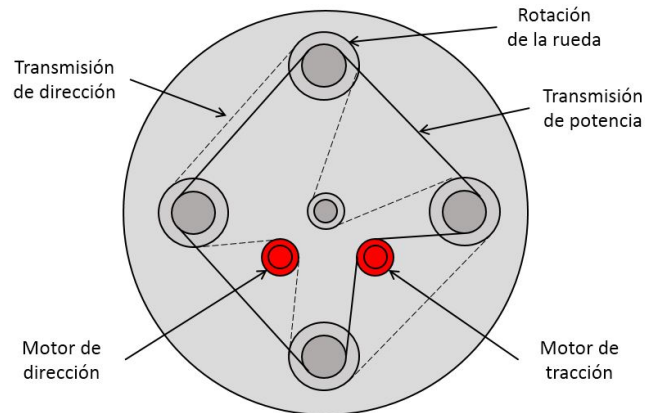


Figura 2.3.5: Vista superior de un robot móvil con arquitectura síncrona.

Cabe mencionar que los CIR tienden a infinito por ser paralelos en todo instante de tiempo, ya que no hay posibilidad de que estas líneas de acción se crucen entre si, lo cual es beneficioso para realizar el control, simplemente se necesita variar la orientación de las ruedas para poder manipular la posición del móvil. Otra ventaja de esta configuración es que permite mejorar los cálculos odométricos, minimizando el deslizamiento de las ruedas por el efecto obtenido al sincronizar las fuerzas generadas por las ruedas en el vector de fuerza en misma magnitud y dirección en todo instante de tiempo.

2.3.4.2. Omnidireccional

En especial este tipo de arquitectura está en pleno desarrollo, ya que ofrece muchas ventajas a la hora de realizar movimientos complejos por un área reducida con el inconveniente de la pérdida de tracción por el tipo de ruedas especialmente diseñadas que utiliza, es por eso que realizar los cálculos de odometría son más complicados de realizar en comparación a otras arquitecturas antes mencionadas.

Las ruedas que utilizan este tipo de móviles pueden definirse como una rueda convencional a la cual se le dota de una corona de rodillos perpendiculares al eje de avance de la rueda o a un cierto ángulo de desfase como en el caso de las Mecanum wheels como se aprecia en la siguiente figura.

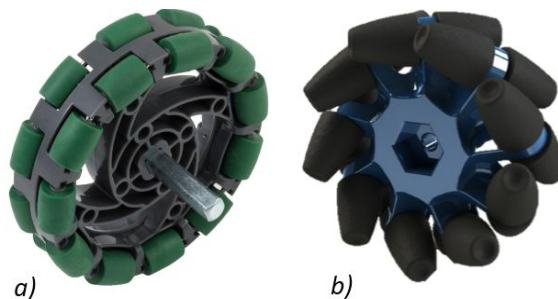


Figura 2.3.6: a) Diseño de rueda omnidireccional clásica y b) el diseño de una Mecanum wheel.

Dada esta configuración (Fig. 2.3.7) podemos observar que al aplicarle una fuerza lateral, los rodillos giran sobre sí mismo y permiten que la componente de la velocidad sobre el eje X generalizado no sea nulo, lo que permite movimientos complejos, con esto podemos decir que el robot es completamente holonómico.

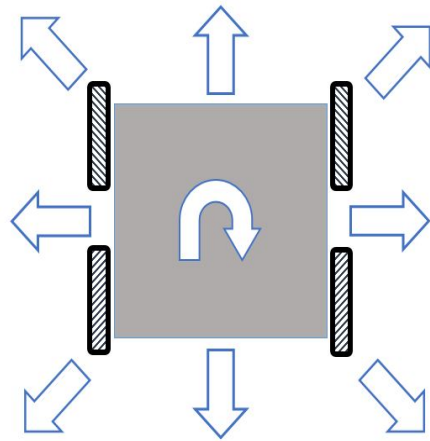


Figura 2.3.7: Configuración especial de ruedas sin restricción Holonómica.

2.4. Características adicionales

2.4.1. Grados de libertad (GLD)

Se describe como grados de libertad como a todo aquel movimiento de desplazamiento o rotación que pueda ser efectuado mediante la configuración del sistema, en general:

- Un sistema que puede desplazarse en dos dimensiones tiene un total de tres GLD, dos de traslación sobre los ejes X, Y y uno sobre un eje de rotación.
- Un sistema que puede moverse en tres dimensiones se dice que tiene seis GLD, 3 de desplazamiento sobre ejes X, Y, Z y respectivamente tres ejes de rotación.

Dependiendo de la capacidad y características que tenga el movimiento se puede asumir si dicho sistema es o no holonómico como se plantea en el apartado 2.4.1 de este capítulo. Se puede generalizar que un robot de dos ruedas es por ende no holonómico por sus restricciones de movimiento lateral.

2.4.2. Cinemática de robots móviles

Parte de la física que estudia el movimiento de sistemas mecánicos, esto sin considerar las fuerzas que originan dicho movimiento, por lo tanto no se consideran ecuaciones diferenciales al hacer el modelado como en el caso de la dinámica. En robótica móvil se analizan las relaciones cinemáticas entre los distintos tipos de variables que intervienen en el movimiento del vehículo. Considerando, movimiento del vehículo, estructura y configuración podemos generalizar tres variables escalares, dos de naturaleza lineal y una angular (x, y, θ) que definen la postura en un instante determinado de

tiempo, esto sin tener un marco general fijo a diferencia de los manipuladores, en este caso se manejan coordenadas iniciales en un instante $t = 0$. Derivando este vector de postura se obtiene el vector de velocidades del vehículo (v_x, v_y, ω) . Por otro lado también se consideran las partes móviles en este caso las ruedas encontrando el vector de velocidades de la rueda o ruedas, depende de la arquitectura del vehículo. Análogamente se puede calcular la cinemática inversa del modelo, esto con el afán de poder realizar el control del móvil, considerando las velocidades de las ruedas y del sistema, podemos obtener un punto final al cual llegara el robot, en la Fig. 2.4.1 ilustra la relación existente entre la cinemática directa y la inversa.

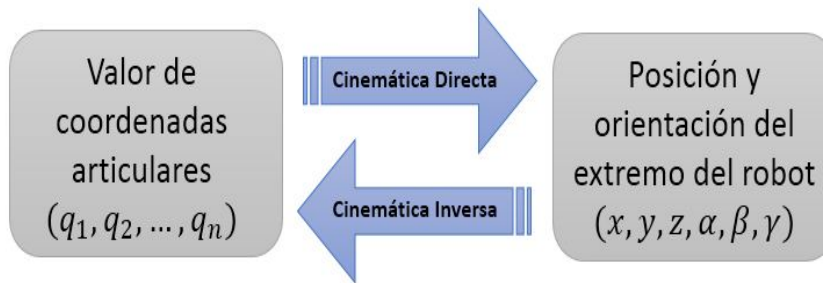


Figura 2.4.1: Variables y relación entre cinemática directa e inversa de forma general.

2.4.3. Centro instantáneo de rotación (CIR)

Este concepto aplicado en la robótica se define como el punto imaginario por el cual se cruzan los ejes perpendiculares a la línea de acción de avance de todas las ruedas en un sistema móvil, se considera a este punto al cual el robot gira en un instante determinado, en la Fig. 2.4.2 podemos apreciar el CIR para algunas configuraciones de ruedas en robots móviles.

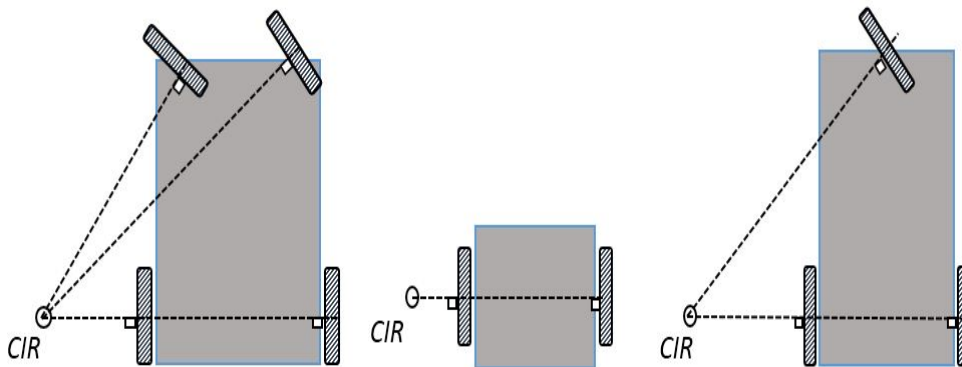


Figura 2.4.2: Localización del CIR para algunas configuraciones de robots móviles.

2.5. Modelos cinemáticos de robots móviles

2.5.1. Hipótesis básicas

Antes de comenzar con el modelado de las distintas configuraciones estudiadas en secciones anteriores (2.3.1 - 2.3.4) en las cuales se analizan para casos ideales es por eso que se deben adoptar una serie de hipótesis resumidas como sigue:

1. El móvil se efectuará su operación en una superficie perfectamente plana.
2. Los ejes de guiado son perpendiculares al suelo en todo momento.
3. Se considera que no existe desplazamiento de la rueda por baja tracción del material, así que se desprecia del análisis.
4. El móvil no cuenta con partes flexibles.
5. Calculado el CIR; durante un periodo corto de tiempo se asume que el vehículo sigue una trayectoria perfectamente lo largo de un arco de circunferencia.
6. Se considera que el sistema se comporta como un sólido rígido, de tal modo las ruedas de dirección, de así tenerlas, estas modificaran su posición mediante el sistema de control.

2.5.2. Restricciones holonómicas

Se puede llegar a clasificar a los robots móviles en dos grandes grupos los que son de tipo holonómico y los que no lo son. Esta es una distinción que relaciona directamente la movilidad de robot, se puede decir que los sistemas holonómicos son aquellos que son capaces de modificar su dirección instantáneamente, sin una necesidad de una rotación previa.

Un sencillo ejemplo y de uso cotidiano es un sistema automóvil como el que usamos todo los días, el cual para poder realizar un movimiento en sentido lateral necesita de una serie de combinaciones de movimiento previos para poder maniobrar dicho movimiento latera, por ende este tipo de sistema es no holonómico.

Bajo la misma primicia se puede asumir que un robot con dos ruedas es no holonómico por la incapacidad de realizar movimiento laterales, siempre realiza movimientos previos en dirección hacia delante o hacia atrás, definidas por las velocidades de la ruedas como se aprecia en la siguiente figura.

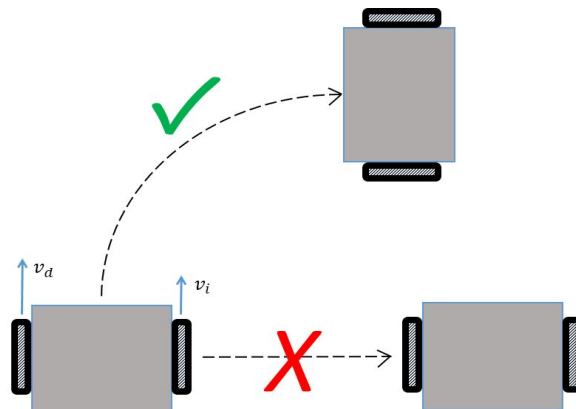


Figura 2.5.1: Robot no holonómico con arquitectura diferencial.

2.5.3. Modelo Jacobiano general

Estableciendo a p como el vector representativo a cualquier punto en el espacio de n coordenadas generalizadas, respectivamente q siendo un vector de m variables de actuación, cuidado que $n > m$. Serán p' y q' las derivadas respecto al tiempo correspondientes. Por tanto, el modelo directo es,

$$p' = J(p) q' \quad (2.5.1)$$

definido $J(p)$ como el Jacobiano. Retomando la descripción de $p = [x \ y \ \theta]^T$ como un vector de coordenadas articulares de guía de la ubicación y orientación de un sistema para un robot móvil cualquiera, sabiendo que $x' = -v \cdot \text{sen } \theta$, $y' = v \cdot \text{cos } \theta$ y $\theta' = \omega$ que son las componentes que describe la variación de la orientación del móvil podemos reescribir la ec.(2.5.1) como

$$p' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta & 0 \\ \text{cos } \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (2.5.2)$$

siendo v y ω la velocidad lineal y angular respectivamente del vehículo, y $q' = [v \ \omega]^T$ el correspondiente vector de variables de entrada.

2.5.3.1. Modelo Jacobiano general inverso

Para obtener tenemos que calcular la inversa del Jacobiano, el cual al no ser una matriz cuadrada se tiene que aplicar técnicas de pseudo inversa multiplicando ambos componentes por J^T y se despeja p' como se muestra en la ec. 2.5.3

$$q' = \{[J(p)]^T \cdot J(p)\}^{-1} \cdot [J(p)]^T p' \quad (2.5.3)$$

obteniendo finalmente de forma de matriz teniendo como entrada v y ω .

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta & \text{cos } \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} \quad (2.5.4)$$

2.5.4. Modelo de un robot diferencial

De la ec. 2.3.11 relacionadas con la arquitectura diferencial podemos obtener las velocidades angulares respectivas a cada rueda del vehículo [36] como

$$\omega_i = \frac{v - (\frac{b}{2}) \cdot \omega}{r} \quad (2.5.5)$$

$$\omega_d = \frac{v + (\frac{b}{2}) \cdot \omega}{r} \quad (2.5.6)$$

las cuales al ser sustituidas en la ec. (2.3.10) y ec. (2.3.11) y colocarla en la forma que dicta la ec. (2.5.2) queda de la forma siguiente:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(r \cdot \text{sen } \theta)}{2} \\ \frac{(r \cdot \text{cos } \theta)}{2} \\ -\frac{r}{b} \end{bmatrix} \omega_i + \begin{bmatrix} \frac{-(r \cdot \text{sen } \theta)}{2} \\ \frac{(r \cdot \text{cos } \theta)}{2} \\ \frac{r}{b} \end{bmatrix} \omega_d \quad (2.5.7)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-(r \cdot \text{sen } \theta)}{2} & \frac{-(r \cdot \text{sen } \theta)}{2} \\ \frac{(r \cdot \text{cos } \theta)}{2} & \frac{(r \cdot \text{cos } \theta)}{2} \\ -\frac{r}{b} & \frac{r}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_i \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (2.5.8)$$

2.5.5. Modelo de un robot triciclo

Para la arquitectura de un triciclo convencional podemos retomar las ec. (2.3.3 a 2.3.6) previamente obtenidas del modelado y sustituyéndolas en la ec. (2.5.2) queda el modelo siguiente todo en función de las velocidades de control v_t y ω_α .

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \\ \alpha' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta \cdot \text{cos } \alpha \\ \text{cos } \theta \cdot \text{cos } \alpha \\ \frac{\text{sen } \alpha}{l} \\ 0 \end{bmatrix} v_t + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega_\alpha \quad (2.5.9)$$

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \theta' \\ \alpha' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen } \theta \cdot \text{cos } \alpha & 0 \\ \text{cos } \theta \cdot \text{cos } \alpha & 0 \\ \frac{\text{sen } \alpha}{l} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_t \\ \omega_\alpha \end{bmatrix} \quad (2.5.10)$$

2.5.5.1. Jacobiano inverso de configuración triciclo

Por ser el modelo de interés nos enfocaremos a obtener el modelo inverso analizado en la ec. (2.5.10) del Jacobiano y se aplica de la misma forma la pseudo inversa para obtenerlo al igual que en el modelo diferencial como se obtuvo en la ec. (2.5.4).

$$\begin{bmatrix} v_t \\ \omega_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-l^2 \text{sen } \theta \cdot \text{cos } \alpha}{(l \cdot \text{cos } \alpha)^2 + \text{sen}^2 \alpha} & \frac{l^2 \text{sen } \theta \cdot \text{cos } \alpha}{(l \cdot \text{cos } \alpha)^2 + \text{sen}^2 \alpha} & \frac{l \cdot \text{sen } \theta}{(l \cdot \text{cos } \alpha)^2 + \text{sen}^2 \alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5.11)$$

Considerando la suposición de que el centro guía del robot se encuentra en el punto medio exacto de la distancia entre las dos ruedas traseras.

2.6. Odometría

Es una herramienta que consiste en el cálculo de ecuaciones geométricas basadas en la información recabada por encoder, estos son dispositivos muy usados en la robótica móvil lo cuales describen la rotación de una rueda o rotación de la dirección general del móvil. Esta herramienta es utilizada para estimar la posición relativa de un robot móvil en nuestro caso es de interés tener completo conocimiento del vector de coordenadas generalizadas (x, y, θ) utilizando el método de posicionamiento relativo.

La ventaja mas sobresaliente sobre este método de posicionamiento es que no se necesita de sistemas complejos para tener una buena aproximación de la ubicación global del robot, por otro lado acarrea la desventaja de acumular el error de la posición creciendo de forma divergente, cosa que se puede remediar tomando una referencia periódica de otro tipo de sensor externo al sistema odométrico que ayudará a reducir el error de forma periódica.

En la odometría existes dos tipos de errores que se pueden obtener y se clasifica en:

- **Errores de tipo no sistemático:** son aquellos cuya causa reside en la interacción del móvil con el medio en el que opera, estas causas por lo general no pueden ser controladas en las cuales destacan el suelo resbaladizo, patinaje de rueda, pendientes pronunciadas, pérdida de contacto de la rueda para con el suelo, entre muchas otras.

- **Errores de tipo sistemático:** para este caso son causados por características del mismo robot y no dependen en absoluto del medio por que transita, entre ellas se puede encontrar como causa probable discrepancias en los radios de las ruedas, problemas de alineación de la rueda motriz, mala resolución del encoder, entre otras.

2.7. Control adaptativo

En primera instancia el paso inicial para poder diseñar un sistema de control es encontrar un modelo matemático de un proceso físico real, como se realizó en secciones anteriores, estos pueden ser de comportamiento no lineales (con mayor frecuencia), con parámetros distribuidos o de alto orden. Un modelo de este tipo de orden elevado y de alta complejidad no es muy útil por la dificultad del proceso, es por esta razón que se debe de buscar y obtener un modelo simple sin dejar a un lado las características que reflejan todo el proceso, es bien sabido que se tiene que verificar el controlador diseñado con respecto al error obtenido y es cuando surge la pregunta de si el diseño o selección de controlador es el correcto y funcionará en una aplicación real de la planta.

Cuando se habla de adaptación se entiende por concepto que es el cambio en el comportamiento conforme a nuevas circunstancias. En este caso en particular un controlador adaptativo modifica su comportamiento ante cambios en la respuesta de la dinámica del sistema y a perturbaciones externas de la cual se sabe que serán variantes en el tiempo.

Se ha investigado mucho sobre controladores que proporciona buenas características a la hora de tener cambios en los parámetros de un sistema no obstante lo que se ha hablado con anterioridad estos no son realmente adaptativos ya que la adaptación la efectúa en bucle abierto. Un ejemplo de estos controladores es el control denominado Gain Scheduling (Ganancias Programadas) que consiste en una tabla de cambios que realiza modificaciones de los parámetros del controlador a partir de una tabla que es calculada previamente para distintos valores en cuanto a los cambios en la dinámica en función a una variable auxiliar como se ve en la siguiente figura.

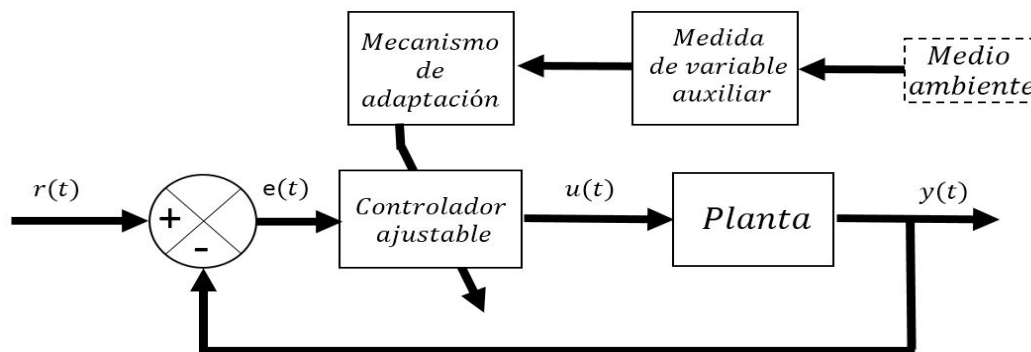


Figura 2.7.1: Sistema adaptativo en bucle abierto.

En algunos casos este controlador presenta la ventaja de realizar cambios de manera muy rápida, esto depende de la velocidad con la cual la variable auxiliar muestre los cambios en la dinámica del proceso, pero se debe considerar que esto hace que el regulador consuma mucho tiempo de proceso al realizar la tabla de parámetros obteniendo así problemas de gran importancia en el cambio de los parámetros.

En esta tesis trabajaremos con controladores adaptativos con modelo de referencia, los cuales se caracterizan por intentar alcanzar una señal referencia de entrada previamente definida, este comportamiento en bucle cerrado esta determinado por un modelo de referencia. Los sistemas de control clásico están pensado para controlar sistemas (en su mayoría lineales), cuya naturaleza del sistema se comporta de forma constante en el tiempo. Los controladores de ganancias fijas tienen un desempeño pobre cuando los parámetros de la planta cambian constantemente o se desconocen. Cuando el sistema tiene una perturbación constante en forma de carga, por pequeñas que sean estas, las técnicas dejan de ser eficientes. Cuando no se tiene la certeza de los parámetros de la planta y se tiene limitado conocimiento de las características de la dinámica, aunada la variación en el tiempo, surge la necesidad de aplicar una técnica de control avanzada, cuyo método no dependa directamente del modelo matemático del sistema a controlar.

Los avances efectuado en los estudios de las teorías de control adaptativo o adaptable, como también son llamados, surgen de la necesidad de tener técnicas de control con adaptación de parámetros como lo requiere un sistema de vuelo de los aviones; en la década de los 60's se implementaron técnicas de espacio de estados en conjunción a la teoría de estabilidad de Lyapunov logrando mejoras en el esquema de control adaptativo con modelo de referencia conocido como MRAC.

En esta técnica se caracteriza por imponer el comportamiento deseado del sistema mediante un modelo referenciado, y los parámetros del control se ajustan basándose en el comportamiento del error, este se obtiene de la diferencia en la salida del sistema en lazo cerrado sistema. Se efectúa la adaptación de parámetros mediante un mecanismo específico.

2.7.1. Control adaptativo (MRAC)

Este tipo particular de control adaptativos fueron diseñados con el objeto de ser implementados en sistemas continuos por minimización de un índice de actuación, que se representa como la integral del cuadrado del error, dicha regla de diseño fue conocida posteriormente como la regla del MIT. Por otro lado la configuración más usual y utilizada es la de un modelo paralelo como se verá en la figura 3.3.1 en una sección posterior. En este caso se puede hacer el control de posición para el eje de un motor como lo hizo M. Koksall y F. Yenici en el 2007 [17] donde aplicaron un control MRAC para un sistema el cual no se tenía certeza de los parámetros teniendo buenos resultados de captación, teniendo resultados similares en cuanto a adaptación en un sin fin de aplicaciones como estabilidad de mesas vibratorias [37] o sistemas de los cuales se tiene conocimiento limitado de los parámetros de control [38, 39, 40]. Este tipo de controladores han ido ganando fama, por su gran campo de aplicaciones en sistemas con presencias de perturbaciones no parametrizados, o sistemas complejos los cuales son difíciles de describir mediante ecuaciones diferenciales.

El marco de referencia de forma sencilla describe la forma en la que se quiere que se comporte el sistema en un determinado momento, es capaz de absorber cambios en la dinámica del sistema sin poner en riesgo la estabilidad del sistema, en este caso se utiliza una herramienta para garantizar la estabilidad descrita por los teoremas de Lyapunov de forma sencilla, la cual nos garantiza la estabilidad del sistema. El sistema de control esta descrito por una función de transferencia que se ajusta en todo momento, al variar un parámetro, el cual se encarga de hacer los ajustes de los parámetros para garantizar el control del sistema, donde como en todo algoritmo de control lo que se busca es reducir el error de comparativa entre el sistema real y el sistema de referencia tienda a cero.

2.8. Procesador digital de señales (DSP)

Se puede definir un sistema procesador de señales como un sistema cualquiera que realice procesamiento de señales, con esto se entiende que es la aplicación de operaciones matemáticas a señales que a su vez se representan de forma digital.

Dichas señales son representada de forma digital mediante secuencias de muestreo. Con frecuencia, este muestreo se obtiene de señales físicas utilizando transductores y ADC (convertidores analógico-digital).

Para efectos de este trabajo de investigación nos limitaremos a hablar de los DSP marca TEXAS INSTRUMENTS, así también, de sus características más básicas como el formato aritmético, la velocidad de procesamiento, la organización de la memoria o de la arquitectura interna dependiendo de la aplicación como se observa en la figura siguiente.

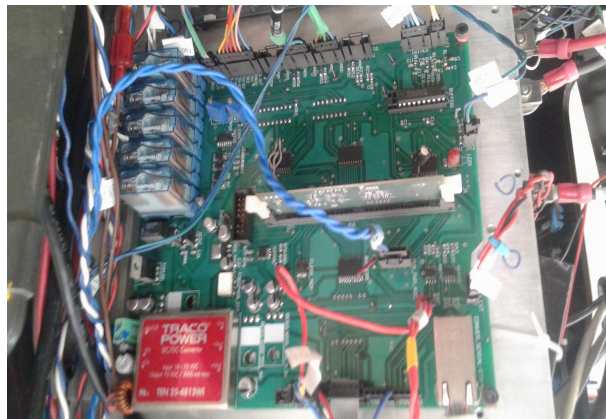


Figura 2.8.1: Aplicación compleja de DSP.

Históricamente hablando la aparición de los microprocesadores revolucionó el diseño electrónico, especialmente de los sistemas de control. La tendencia del uso de este tipo de microprocesadores es aumentar la velocidad de procesamiento.

Un DSP es un tipo de microprocesador increíblemente rápido y poderoso que realiza procesamiento de datos en tiempo real. Esta capacidad de operación en tiempo real hace del DSP una opción perfecta para aplicaciones en las que no se toleran retrasos. El DSP adquiere una señal digital y la procesa para mejorar la misma.

En el mercado existen muchas marcas que trabajan con la tecnología DSP pero la mayoría se enfoca a diseños con las mismas características básicas. Estas se dividen en tres generalidades:

- Alta velocidad de cálculo aritméticos.
- Transferencia de datos hacia y desde el mundo real.
- Arquitectura de memoria de múltiple acceso.

2.8.1. Ventajas

El procesamiento digital de señales ofrece diversas ventajas sobre los sistemas tradicionales analógicos. El más significativo es que los sistemas basados en DSP son capaces de lograr un menor costo en la implementación de algunas tareas que podrían ser difíciles o imposibles usando sistemas analógicos. También su versatilidad para cambiar valores o consignas en un programa los hace altamente competitivos. Ejemplos de dichas aplicaciones incluyen la síntesis y reconocimiento de lenguaje, módems de alta velocidad con corrección de error de código, etc. Todas estas tareas involucran una combinación de control y procesamiento de señales (tomando decisiones respecto a bits o instrucciones recibidos). Otras ventajas adicionales sobre los sistemas analógicos son:

- **Estabilidad, repetitividad y comportamiento previsible.** En ocasiones se observa que en un sistema analógico algunas condiciones lo hacen variar, tales como cambios en la temperatura de los componentes, que modifican su valor; a esto se agregan las derivas por el envejecimiento de los componentes y las tolerancias de éstos. Otro factor a tomar en cuenta es el calibrar estos sistemas para que operen con precisión. La salida de un sistema de procesamiento digital de señal no depende de factores ambientales o variaciones en el valor nominal de los componentes, es posible obtener sistemas con una respuesta exacta, conocida y sin variación de un equipo a otro.
- **Tamaño.** El tamaño de los componentes analógicos varía con sus valores; por ejemplo, el tamaño de un capacitor de $100\ \mu F$ difiere de uno de $10\ pF$, en la implementación de un filtro analógico. En contraste, en un filtro digital implementado en DSP bastaría con programar sus coeficientes.
- **Funciones especiales.** Hoy en día, algunos de los DSP de última generación cuentan con periféricos apropiados para ejecutar algoritmos característicos de ciertas aplicaciones para el procesamiento de señales de audio, de imagen o video y que no podrían implementarse por medios analógicos.
- **Programabilidad.** El sistema DSP puede re-programarse en campo para ejecutar nuevos algoritmos. En contraste, con los sistemas analógicos que requieren de diversos componentes físicos para realizar diferentes tareas.
- **Inmunidad al ruido en la transmisión y almacenamiento de la información.** Las señales digitales son mucho más inmunes al ruido que las analógicas, no obstante, también pueden verse afectadas por este factor. En cuanto a capacidad de almacenamiento, esta es cada vez mayor en menor área física del DSP. Es conveniente tomar en consideración que para aplicaciones sencillas la complejidad de un sistema analógico es menor, lo que se traduce en un menor costo. Si lo que se necesita son aplicaciones de tiempo real para un muestreo de la señal, es necesario realizar todos los cálculos que requiere el algoritmo. Para señales de gran ancho de banda, la frecuencia de muestreo puede ser tan elevada que impida su cálculo mediante técnicas digitales.

2.8.2. Consumo y velocidad de reloj

El uso cada vez más extendido de los DSP en aplicaciones portátiles como la telefonía celular hace que el consumo sea un factor a tener muy en cuenta en el momento de decidirse por un DSP u otro. Conscientes de esta necesidad, los fabricantes de DSP ya fabrican DSP para tensiones bajas de trabajo ($3.3\ V - 3\ V$) que incorporan prestaciones para la gestión de energía, como pueden ser los modos “sleep” o “idle” que inhiben el reloj del DSP a todas o sólo algunas partes del mismo, divisores programables del reloj para permitir la realización de determinadas tareas a velocidad inferior o en control directo de periféricos, lo que permite la desactivación de algunos de ellos si no se prevé su aplicación.

- Velocidad de Reloj:** Los sistemas electrónicos digitales se caracterizan por su velocidad de reloj. La velocidad de reloj se refiere a la velocidad a la cual el sistema ejecuta sus unidades de trabajo más básicas. Para los sistemas de DSP, la relación de la velocidad del reloj y la velocidad de muestreo es una de las características más importantes usadas para determinar cómo será implementado el sistema. Es decir, esta relación determina parcialmente el monto de hardware necesario para implementar un algoritmo con una complejidad dada.
- Velocidad de muestreo:** Una característica clave de los sistemas DSP es su tasa de muestreo (sample rate). El muestreo es el proceso de convertir una señal en tiempo continuo a una señal en tiempo discreto, en intervalos de muestreo también discretos. Las amplitudes de las señales en tiempo discreto se cuantifican en valores digitales con un ancho de palabra $N = 2^n$ (donde n es el número de bits) dado. Un ADC realiza los procesos de muestreo y cuantificación de una señal como se ve en la siguiente figura.

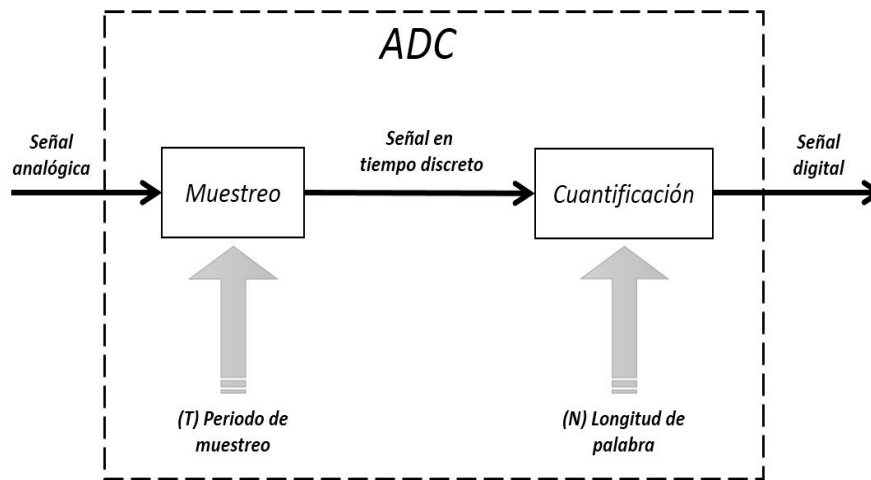


Figura 2.8.2: Proceso general de un ADC.

2.8.3. Coste

Generalmente el coste del DSP es el principal parámetro en todos aquellos productos que se van a fabricar en grandes volúmenes. En tales aplicaciones, el diseñador intenta utilizar el DSP con coste inferior y que satisfaga las necesidades de la aplicación aun cuando ese dispositivo pueda ser considerado poco flexible y más difícil de programar que otros DSP más caros. De entre las familias de DSP, el más barato será aquel que tenga menos características funcionales, menos memoria interna y probablemente menos prestaciones que otro más caro. Sin embargo, una diferencia clave en el precio está en el encapsulado.

2.8.4. DSP DE TEXAS INSTRUMENTS

En la siguiente tabla en la figura podemos ver a forma de comparada podemos ver las compañías que se encargan de fabricar tecnología DSP.

Fabricantes	DSP 16 bits	DSP 32 bits	DSP 64 bits
Analog Devices	ADSP-2100	—	ADSP-21020
	ADSP21cspxx	—	ADSP2106x
Hitachi	SH-DSP	—	—
Motorola	DSP561xx	DSP5600x	DSP96002
	DSP568xx	DSP563xx	—
SGC-Thomson	D950	—	—
Texas Instruments	TMS320C1x	—	TMS320C3x
	TMS320C2000	—	TMS320C4x
	TMS320C5000	—	TMS320C6000
	TMS320C8x	—	—
NEC	$\mu PD7701$	—	—
Zilog	Z893xx	—	—
	Z894xx	—	—

Cuadro 2.8.1: Principales fabricantes de DPS's.

Hablaremos de esta compañía en particular por que es la marca que se utiliza en nuestro instituto y con la cual se esta impartiendo la clase de procesadores digitales, pero también cabe mencionar que es una de las compañías con más repunte en cuanto a tecnología e investigación aplicada a estos dispositivos.

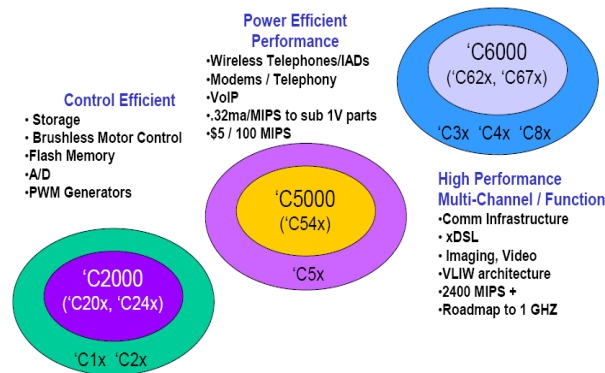


Figura 2.8.3: Familias de DSP según aplicaciones.

En la figura 2.8.5 podemos observar las familias mas conocidas y usadas de los DSP marca Texas Instruments que están asociada a algunas aplicaciones comunes en la electrónica.

La familia de procesadores *TMS320* de Texas Instruments se compone básicamente de tres generaciones basadas en DSP de punto fijo; la *C2000* con sus familias *C24x* y *C28x*; la *C5000*

la integran *C54x* y *C55x*; y *C6000* con su *C62x*, *C64x* y la familia de punto flotante *C67x*. Los procesadores tienen arquitecturas diferentes diseñadas específicamente para aplicaciones en tiempo real, que difieren en variedad de memoria y configuración de periféricos.

Entre las ventajas más importantes que ofrece T.I. se puede mencionar que existe una amplia información de sus productos a través de su página en Internet [«http://www.ti.com»](http://www.ti.com), una red de fabricantes de “tercera parte” que hacen uso de sus DSP y ofrecen sistemas de desarrollo para aplicaciones específicas, además de software y librerías de aplicación que permiten optimizar el código de programa. En cuanto a herramientas de desarrollo Texas Instruments cuenta con su sistema llamado CCS (Code Composer Estudio), cuya última versión simplifica procesos en aplicaciones muy complejas. La ventaja que ofrece este sistema es que da soporte a la serie *C6000*, *C5000*, *.C2000*, OMAP y DaVinci, evitando el uso de diversas versiones del mismo programa.

2.9. Sensor tipo giroscopio

Los giroscopios presentan un alevé ventaja en aplicación de robots móviles comparado a los magnetómetros o brújulas digitales, ya que estos no son tan sensibles a los cambios o anomalías electromagnéticas y ferromagnéticas, que tienen gran presencia en cualquier industria, por el tipo de maquinaria que se maneja, es por eso que esos sistemas son más susceptibles, haciendo que un giroscopio sea una mejor opción para la aplicación. Aun así estos campos locales pueden llegar a provocar importantes perturbaciones.



Figura 2.9.1: Giroscopio de un solo eje de detección.

Hablando conceptualmente estos son dispositivos que realizan mediciones en relación a giros o rotaciones, para ello cuenta con tecnología MEMS (sistemas microelectromecánicos) que resulta de bajo costo para poder medir la velocidad angular de un sistema. Este dispositivo mide el cambio de posición rotacional por unidad de tiempo $\left(\frac{\circ}{seg}\right)$ o *RPM*. Estos sistemas son utilizados para determinar la orientación y pueden ser encontrados en la mayoría de los sistemas autónomos.

2.9.1. Sensibilidad, alcance y Off set

Para este tipo de sensores cuando hablamos sobre la característica de alcance se refiere al rango propio de medición del dispositivo, o al rango completo de escala de lectura; en este caso en particular hace referencia a la velocidad angular máxima que el giroscopio puede llegar a detectar en determinado momento, se representa en $^{\circ}/\text{seg}$. Por ejemplo un giroscopio con un rango de lectura de $100^{\circ}/\text{seg}$ puede leer hasta esa velocidad angular máxima, en dado caso que se llegue a superar esa velocidad el sensor perdería rango de lectura y se obtendría una señal desbordada dando lectura gravemente erróneas, siendo este un factor muy importante a la hora de seleccionar un giroscopio.

Por otro lado la característica de sensibilidad se dimensiona en $(\text{mV}/^{\circ}/\text{seg})$ esta unidad se ve de naturaleza muy extraña, pero tiene lógica, ya que indica el cambio de velocidad angular del sistema en mV, con esto se puede realizar una conversión para poder saber el cambio de velocidad angular por cada mV variado. Dichas características antes abordadas son de suma importancia ya que se relacionan una con la otra, al tener un mayor alcance o rango de medición se tiene un menor contraste ante cambios de la lectura, hay que tener en cuenta esto antes de seleccionar el sensor más adecuado para la aplicación.

Por su naturaleza los sensores presentan errores en las lecturas o también llamados corrimientos, esto se puede observar claramente cuando tenemos a sistema completamente estático y aún así se obtienen pequeñas lecturas que obviamente son erróneas en la salida. Las razones pueden ser muchas, pero la más importante es debido a los cambios de temperatura que repercuten gravemente en estos sensores con alta sensibilidad, como medida para reducir el error se tiene que algunos sensores son dotados de otros sensores que se encargan especialmente del monitoreo de la temperatura en el sensor y con el afán de poder compensar dichas lecturas erróneas o de otra forma utilizados para calibrar el sensor obteniendo resultados más exactos.

2.10. Modelado matemático de sistemas eléctricos

Los motores de corriente directa (CD) desde su invención hace muchas décadas han revolucionado el campo de los accionamientos de velocidad y posición variable, lo cual es resultado de sus características de funcionamiento y facilidad de control a diferencia de los motores de CA que son de estructura más complejas a la hora de hacer mantenimiento, son de alto costo y más difíciles de controlar en comparación a los antes mencionados. La posición, velocidad y corriente de un motor de CD pueden ser controlados variando la tensión de armadura, por lo tanto se debe utilizar un convertidor de potencia que permita realizar dicha regulación de manera eficiente.

La eficiencia que aportan este tipo de motores con imanes permanentes lo hacen muy confiables y son usados como en este caso en aplicaciones de robótica móvil para tracción de los mismos, adicionalmente se caracterizan por su alto coeficiente de torque nominal y su gran rango de velocidad que pueden alcanzar. Seleccionado el motor que se encargará de realizar el direccionamiento del vehículo el cual es el antes mencionado motor CD con imán permanente marca Transtecno de 24 voltios, podemos observar las características generales del motor.

Una función de transferencia está definida por el cociente de dos polinomios, uno que corresponde a la salida del sistema en el numerador y otro que corresponde a la entrada. Sea el caso de desconocer los parámetros del motor, siendo estos mecánicos o eléctricos, es posible obtener la función de transferencia basándose en la respuesta transitoria de un sistema. Para esto se considera que se tiene un sistema de segundo orden y que este tiene dos polos alejados aproximadamente tres veces entre sí, correspondiente a las máquinas eléctricas.

En este caso representaremos las magnitudes y variables físicas presente en el sistema mediante una función de transferencia describiendo la dinámica mediante ecuaciones matemáticas que rela-

cionan la una entrada y una salida, la entrada en esta caso sera V_m y la salida sera el angulo de posición del eje del motor denotado como θ_m .

2.10.1. Cálculo de algunos parámetros

El fabricante no proporciona todo los parámetros del motor por cuestiones de patentes y políticas de privacidad, pero no todo está perdido, existen ecuaciones las cuales contando con mínimos datos pueden ayudar a calcular los parámetros desconocidos como la siguiente formula que relacionan el voltaje, la resistencia y la corriente de armadura para obtener:

$$e_b = e_a - R_a i_a \quad (2.10.1)$$

$$e_b = K \omega_m \quad (2.10.2)$$

de las cuales se obtiene K ,

$$K = \frac{e_a - R_a i_a}{\omega_m} \quad (2.10.3)$$

Utilizando los datos obtenidos de la descripción del motor podemos obtener una buena aproximación de K , y teniendo la constante electromotriz K_m , se determina directamente la constante mecánica a través de la siguiente relación:

$$K_m = K_t \left[\frac{N m}{A}; \frac{V}{RPM} \right] \quad (2.10.4)$$

Por otro lado analizando la parte mecánica del motor se procede a obtener mediante cálculos y los datos conocidos el valor del momento de inercia equivalente, con la siguiente formula:

$$J = \frac{M R^2}{2} \quad (2.10.5)$$

Por ultimo debemos encontrar el valor del coeficiente de amortiguamiento se obtuvo información relacionada a motores que tienen características muy similares al motor DC que se utilizó y tomamos el valor de referencia de $b_m = 0.05 \frac{N \cdot m}{rad/s}$.

2.11. Robot móvil comercial

Para cumplir con necesidades varias del proyecto como el arrastre, capacidad de carga, normas de seguridad, entre los clientes y el equipo de trabajo decidió adquirir un robot móvil comercial marca NISSAN Forklift CO. tipo Montacargas con tractor de Remolque 2W4 (TGX).



Figura 2.11.1: Montacargas NISSAN FORKLIFT modelo 2W4 TGX.

Con una capacidad nominal de arrastre de $10,000\text{ lb}$ ($4,500\text{ Kg}$ aprox.) lo cual satisface las necesidades del proyecto en cuanto a capacidad de manejo de materiales. Este móvil es accionado mediante un motor eléctrico de AC de 24 volts con una potencia de 5.2 HP , con una configuración de triciclo convencional como se analiza en capítulos anteriores, esto significa que cuenta con tres ruedas, una de ellas, la delantera, es la responsable de accionar el avance del vehículo mediante el motor antes mencionado adherido a la rueda, este tipo de sistemas son conocidos como MotorWheel.

La dirección es proporcionada en este caso por un operador calificado, por necesidades del proyecto, sustituiremos el operador experimentado por un sistema de control que sea responsable de direccionar el robot mediante un nuevo motor adaptado concéntricamente al eje de giro de la rueda motriz.

2.11.1. Especificaciones técnicas

En la siguiente tabla podremos ver las especificaciones técnicas mas importantes que fueron tomadas en consideración al momento de adquirir el vehículo.

Especificación	Unidades	Magnitud
Modelo	–	TGX 2W4
Capacidad de carga	Kg	4,500
Llanta propulsora	—	Caucho solido
Núm. de ruedas	—	3
Dimensiones en general	Ancho (m)	0.890
	Largo (m)	1.340
	Alto (m)	1.415
Peso (sin bateria)	kg	545
Peso bateria	kg	680
Autonomia (6 Hrs.)	Ah	840
Velocidad	Kph (máx)	14.6
	Kph (min)	9.0

Cuadro 2.11.1: Especificaciones técnicas del Tugger.

Como se puede ver el robot es accionado por un único motor de CA Brushless de 24 *volts*, además de contar con una pantalla que monitorea la velocidad del vehículo y marca en todo momento el estado de carga de la batería. Un dato importante a la hora de seleccionar el vehículo fue el ángulo máximo de giro de la rueda de dirección que en este caso es de 190° lo cual nos permite saber cual la magnitud de maniobrabilidad que tendrá el robot. Por la velocidad y la carga que llega a manejar un punto importante de análisis fue el freno; este modelo cuenta con un freno eléctrico de torque regenerativo que esta normalmente cerrado esto significa que el freno siempre esta activado por seguridad y se libera al recibir la señal de avance de parte del control, como resultado se tiene un sistema bastante eficiente y seguro, reduciendo el mantenimiento del vehículo.

Las ruedas de caucho sólido están diseñadas para tener en todo momento el máximo contacto con la superficie aumentando la fricción de la rueda, ya que es de vital importancia por ser la debilidad del modelo triciclo contar con solo una rueda de tracción. Por ultimo es importante mencionar que el sistema esta construido y diseñado para poder operar óptimamente abajo condiciones duras de trabajo todos los componentes tanto mecánicos como electrónicos; también bajo condiciones bajas o altas de temperatura sin afectar su funcionamiento. En caso se presencia de humedad y polvo como condiciones normales de operación dentro de la industria cuenta con un rango de protección de IP65 significa que el sistema esta completamente protegido contra intrusiones de polvo y contra líquidos soportando un chorro de agua arrojado por medio de una boquilla de 6.3 *mm* de diámetro a un promedio de $12.5 \frac{Lts}{Seg}$ y una presión de $30 \frac{kN}{m^2}$.

En cuanto a las dimensiones del robot móvil se puede apreciar de forma más detallada en la hoja de datos proporcionada por el vendedor en el *Apendice A*.

Capítulo 3

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

3.1. Mecanismo de dirección

Durante el desarrollo del proyecto se realizaron muchas adaptaciones mecánicas, y de la misma forma la instalación de todos los diferentes sistemas sensoriales en el robot móvil para poder realizar las pruebas, en la figura siguiente podemos ver una vista general de como se modificó el vehículo adquirido por el proyecto, donde se puede observar con mayor claridad el motor que realiza la función de darle dirección a la rueda motriz, también se puede observar la tarjeta de control, sensores ultrasónicos utilizados para la detección de obstáculos en los trayectos y otros subsistemas que componen al móvil.

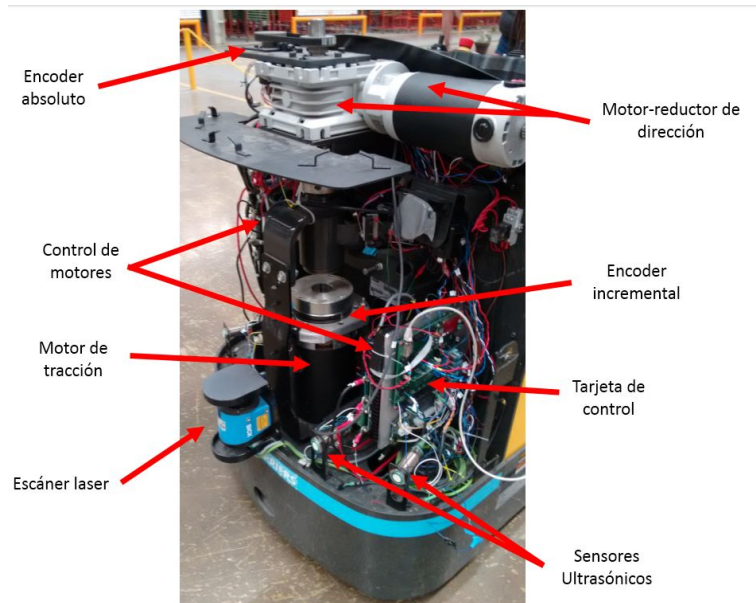


Figura 3.1.1: Vehículo con sistema mecánico adaptado y sensores instalados.

3.1.1. Pruebas de toque para la dirección

En la parte inicial del proyecto una vez adquirido el robot móvil comercial antes descrito, se procede a desarmar y analizar las partes móviles que serán necesarias articular y/o actuar para realizar el control del movimiento del motor de tracción, para esto se colocó al móvil sobre bases para que quedase en una posición elevada del suelo evitando el contacto entre el suelo y la rueda frontal del vehículo, esto con el fin de poder analizar el sistema de tracción y dirección sin tener un avance del vehículo para evitar accidentes.

Una vez analizado y comprendido el mecanismo se realizaron pruebas de toque las cuales son necesarias para poder saber la magnitud del toque necesario para el motor de dirección pueda efectuar el giro de la dirección, esto en el robot en movimiento, sin embargo se concluyó que el torque máximo requerido es cuando las pruebas de torque se realizan con el robot en estado estacionario, ya que es cuando existe la mayor superficie de contacto y máxima fricción entre la rueda y el suelo.

El procedimiento que se siguió para realizar esta parte de la experimentación consistió en fijar un torquímetro de forma concéntrica al eje del cuerpo del motor, el motor esta sujeto a un mecanismo móvil el cual estaba inicial mente unido al volante del móvil, el cual reemplazaremos por el motor que ejecutará la dirección, en la siguiente imagen podemos observar claramente el proceso de esta parte del experimento.

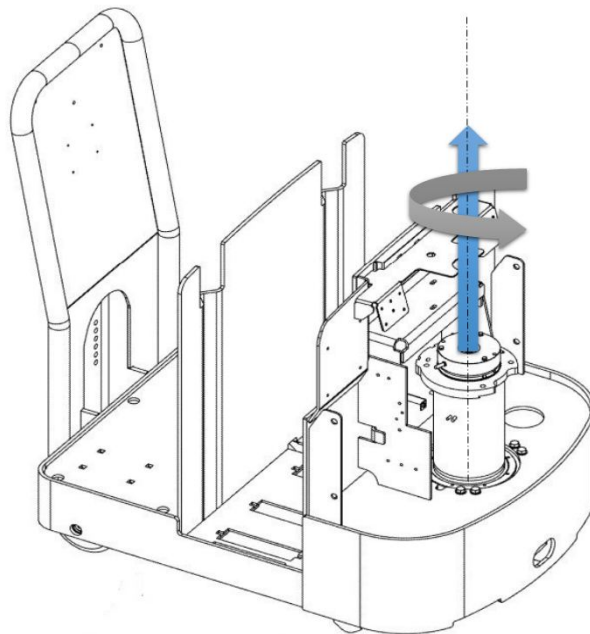


Figura 3.1.2: Pruebas de torque en el vehículo sin movimiento lineal.

Una vez alineada la rueda para que el robot se procede a girar la rueda hasta el tope de giro que por especificación del fabricante es de $\pm 95^\circ$ (fig. 3.1.3) teniendo la consideración de aplicar una fuerza constante para obtener una lectura lo más aproximada a lo real, estas pruebas se realizaron en repetidas ocasiones hasta poder estar seguros de obtener datos verdaderamente significativos para poder analizarlos y determinar un resultado.



Figura 3.1.3: Pruebas de torque en el vehículo sin movimiento lineal.

Por la complejidad y el tiempo necesario para hacer las pruebas, se realizaron de forma repetida $N > 30$ número de pruebas del torque que sera necesarias para poder iniciar el giro a la dirección del vehículo obteniendo los siguientes datos representativos, la tabla completa se puede ver en el Apéndice B.

# de prueba	Torque necesario (Nm)
1	136.6
2	137.3
3	134.9
4	135.6
5	134.2
6	136.0
7	135.7
8	133.5
9	133.0

Cuadro 3.1.1: Pruebas de torque para rotas la dirección en Nm .

Teniendo la tabla con los 30 experimentos se puede analizaron de forma estadística de la cual se obtuvieron un torque máximo y uno mínimo con magnitud de 137.9 y 132.2 Nm , donde se consideró desechar algunos datos aberrantes que arrojaban valores muy por debajo o por encima del mínimo y máximo, los cuales podían afectar al tratar de obtener un valor promedio de torque, discriminando estos valores aberrantes en promedio se encontró que es necesario un torque de 134.9 Nm para poder vencer el estado estático de la rueda y poder girarla sobre su propio eje, con ese dato se prosigue a investigar un modelo comercial de modelos de motores de CD que sean capaces de cumplir con los requerimientos de torque tomando en cuenta la autonomía de la batería, el espacio y la electrónica disponible.

3.1.2. Motor de dirección

Una vez que tenemos claras las especificaciones de necesidad de torque, y dimensiones disponible se procede a seleccionar el motor apropiado para poder efectuar el movimiento rotacional de la dirección del motor de tracción. Se prosiguió a hacer la selección de una gran lista de proveedores de motores con esas especificaciones cabe mencionar que todos ellos trabajan a un voltaje estándar de 24 volts, las opciones más apropiadas se analizaron en la siguiente tabla:

Marca	Modelo	Potencia	Reductor	Torque	Velocidad*	Precio**
Bonfiglioli	BC310-24-2000-950	950W	NO	4.5 Nm	2000	1,399.00
Bodine Elec.	N4862	$\frac{1}{4}$ HP	SI	32.7 Nm	21	765.00
Transtecno	ECMB600/633-U.61	500W	SI	148 Nm	49	990.00
	ECMB600/071/075	800W	SI	144 Nm	40	1,095.00
Taylor-Dunn	AMD 3256	1.5 HP	NO	6.67 Nm	1600	601.95
	AMD 3257	1.5 HP	NO	7.02 Nm	1450	657.95
Motor D&D	ES-80A	2.3 HP	NO	8.95 Nm	1830	547.50

* en RPM.

** en Dolares.

Cuadro 3.1.2: Opciones de motores de CD para la dirección.

Analizando cada una de las opciones por sus características, precio y disponibilidad, se llegó a la conclusión de que el motor apto para esta aplicación sería el modelo EC600.240BR de la marca TRANSTECNO (Fig. 3.1.3), con un reductor acoplado que permite tener el eje de salida a 90° con respecto al eje de salida del motor, su modelo completo es ECMB600/071/075. En la siguiente tabla resumimos las características generales de este motor-reductor.

Característica motor	Magnitud	Unidad	Característica Reductor	Magnitud
Torque	2.54	Nm	No. de reductores	2
Potencia	800	Watts	Toque salida	144 Nm
Alimentación	24	Volts	Velocidad salida	40 RPM
Consumo	47.2	Amp	Eficiencia	0.7 - 0.85
Velocidad	3,000	RPM	Relación reducción	1:57
Peso	7.9	Kg	Eje de salida	90°

Cuadro 3.1.3: Motor - Reductor ECMB 600 marca TRANSTECNO.

Teniendo conocimiento de las características generales del motor y en conjunto con un controlador adecuado (la selección se encuentra en la siguiente sección) se puede comenzar a hacer pruebas con el motor antes de instalarlo en el robot móvil, el motor se puede apreciar en la siguiente figura.



Figura 3.1.4: Motor-reductor TRANSTECNO EC600.240BR.

3.1.3. Controlador serie MMT-4Q

La serie de controladores MMT-DC24RT100BL son controladores de bajo voltaje en un rango de operación entre 12 – 48 *volts* y una corriente a la entrada de 10 – 100 *A*, se caracteriza por manejar cuatro cuadrantes de operación y un sistema de modulación de ancho de pulso (PWM). El MCU (Microcontroller Unit) tiene un sistema inteligente de control interno que permite tener una respuesta rápida de operación, control del motor en modo bidireccional esto sin dejar aun lado la protección del sistema.

En cuanto a sus características generales podemos puntualizar las siguiente:

- Aplicable directamente a los imanes permanentes, excitación separada.
- Inicio de operación con gran par a baja velocidad.
- Tasa de error estático de 1 %.
- Gran resolución de regulación de velocidad (0-Máx).
- Proceso automático de suavizado durante la aceleración y desaceleración.
- Control de sobre flujo de corriente para protección del motor y controlador (ajustable).
- Regulación ajustable de tiempo de parada o arranque suave.
- Doble control PI (proporcional - integral) en lazo cerrado para para voltaje y corriente.
- Modo ajustable de velocidad y par.
- Apagado inercial y frenado seleccionable.
- Los valores de voltajes a la entrada y salida son seleccionables.



Figura 3.1.5: Controlador MMT-DC24RT100BL adquirido.

Este tipo de controladores utiliza dispositivos de alto rendimiento para baja tensión de operación, la marca tiene experiencia en controlar motores con aplicaciones en AGV's, sistemas de cruceo automático, sistemas de logística de almacenamiento, etc. En cuanto a la seguridad de aplicación el controlador esta fabricado para trabajar en ambientes rudos de trabajo, cuenta con protección interna contra sobre cargas y cargas por debajo del mínimo de operación, cortando el flujo de energía para evitar daños en el controlado o en el mismo motor. Por otro lado podemos observar los parámetros técnicos en la siguiente tabla.

Parámetro	magnitud	unidades
Voltaje de operación	24	V
Voltaje de salida	24	V
Corriente de salida	100	A
Rampa de inicio suave	0.2-20	seg
Rampa de frenado suave	0.2-20	seg
Señal analógica	0-5	V
Impedancia entrada	$\geq 200k$	—
Temperatura de operación	$-10 \sim 60$	C°
Protección corto-circuito	50	μseg
Dimensiones	154 x 135 x 75	mm
Peso con disipador	1.3	Kg

Cuadro 3.1.4: Parámetros del controlador MMT-DC24RT100BL

3.2. Modelado del motor EC600.240BR

Para obtener la ecuación equivalente a la parte eléctrica del motor aplicaremos dos leyes muy bien conocidas que nos ayudaran a describir el sistema, estas son las dos leyes de Kirchoff (citar un libro de análisis de circuitos). Teniendo la idea clara del circuito básico de un motor de CD que analizaremos como se aprecia en la figura siguiente.

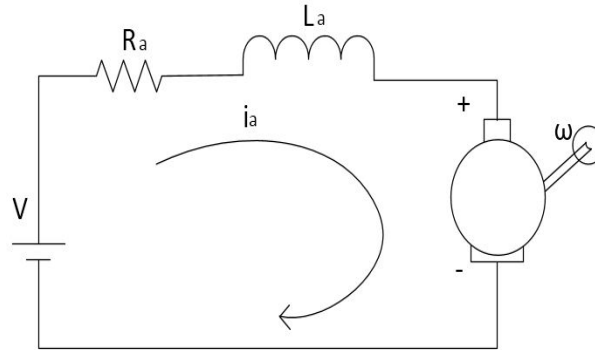


Figura 3.2.1: Circuito equivalente de armadura de un motor de CD [1].

Ley 1. La primera Ley de Kirchoff enuncia que en cualquier nodo, la suma de las corrientes que entran en ese nodo es igual a la suma de las corrientes que salen. De forma equivalente, la suma de todas las corrientes que pasan por el nodo es igual a cero.

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + I_2 + I_3 \dots I_n = 0$$

Ley 2. La segunda Ley de Kirchoff enuncia que en un lazo cerrado, la suma de todas las caídas de tensión es igual a la tensión total suministrada. De forma equivalente, la suma algebraica de las diferencias de potencial eléctrico en un lazo es igual a cero.

$$\sum_{k=1}^n V_k = V_1 + V_2 + V_3 \dots V_n = 0$$

El circuito equivalente de armadura del motor de CD mostrado en la Figura 3.2.1 y conociendo la ecuación dinámica de la corriente de armadura aplicando la Ley 1 y Ley 2 está dada por:

$$v_a(t) = e(t) + R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a(t)}{dt} \quad (3.2.1)$$

donde v_a e i_a son la tensión y la corriente de armadura, R_a y L_a , la resistencia e inductancia de armadura y e es la tensión inducida, que se puede modelar como::

$$e(t) = K_m \cdot \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (3.2.2)$$

donde K_m es la constante de fuerza electromotriz y ω_m es la velocidad mecánica del eje del rotor. El par electromagnético T_e es proporcional a la corriente de armadura,

$$T_e(t) = K_t \cdot i_a(t) \quad (3.2.3)$$

en la cual K_t es la constante de par.

En la parte mecánica del motor se tiene la siguiente ecuación representativa del motor de CD:

$$T_e(t) = J \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + b_m \cdot \frac{d\theta(t)}{dt} + T_L(t) \quad (3.2.4)$$

donde J es el momento de inercia, b_m es el coeficiente de fricción viscosa y T_L es el par de carga (en algunos casos se puede llegar a omitir al ser desconocido $T_L = 0$).

3.2.1. Cálculo de parámetros desconocidos

Una vez seleccionado y adquirido el motor que efectuará el movimiento de rotación de la dirección de la rueda motriz del vehículo, se procesa a examinar de forma mas minuciosa las características del mismo, para obtener la información necesaria que ayudara a realizar el modelado del moto. Con ayuda de los datos que conocemos y son proporcionados por parte del fabricante que se pueden observar en la tabla 3.3 y mediante algunos cálculos sencillos podemos obtener los datos desconocidos.

Como primer paso y debido a la sencillez de obtención calcularemos el valor de K que para nuestra fortuna es considerada equivalente al valor de K_t y K_m , esto considerando inicialmente que el eje se encuentra en ausencia de carga o en pocas palabras no se encuentra acoplado a ningún sistema secundario.

3.2.2. Función de transferencia

Aplicando herramientas de la transformada de Laplace a la ec. 3.2.1 y ec. 3.2.4 del modelado del motor, pasa a ser expresados en términos de «s» de Laplace.

$$s(Js + b_m) \cdot \theta_m(s) = K \cdot I_a(s) \quad (3.2.5)$$

$$(L_a s + R_a) \cdot I(s) = V_m(s) - Ks \cdot \theta_m(s) \quad (3.2.6)$$

Puesto que es una función de transferencia en lazo abierto se procede a eliminar $I_a(s)$ de las dos ecuaciones anteriores.

$$I_a(s) = \frac{s(Js + b_m) \cdot \theta_m(s)}{K} \quad (3.2.7)$$

y,

$$I_a(s) = \frac{V_m(s) - Ks \cdot \theta_m(s)}{(L_a s + R_a)} \quad (3.2.8)$$

se iguala las dos funciones anteriores:

$$\frac{s(Js + b_m) \cdot \theta_m(s)}{K} = \frac{V_m(s) - Ks \cdot \theta_m(s)}{(L_a s + R_a)} \quad (3.2.9)$$

por último se procede a hacer el despeje de los parámetros considerados como entrada y salida el sistema.

$$[s(Js + b_m) \cdot \theta_m(s)] \cdot (L_a s + R_a) = V_m(s) \cdot K - K^2 s \cdot \theta_m(s)$$

$$s(Js + b_m) \cdot (L_a s + R_a) = \frac{V_m(s) \cdot K - K^2 s \cdot \theta_m(s)}{\theta_m(s)}$$

$$s(Js + b_m) \cdot (L_a s + R_a) = \frac{V_m(s) \cdot K}{\theta_m(s)} - K^2 s$$

$$\frac{[s(Js + b_m) \cdot (L_a s + R_a)] + K^2 s}{K} = \frac{V_m(s)}{\theta_m(s)}$$

Realizando el reacomodo de entrada y salida deseada la función de transferencia queda de la siguiente forma.

$$G(s) = \frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s[(Js + b_m) \cdot (L_a s + R_a) + K^2]} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (3.2.10)$$

3.2.2.1. Simplificación de orden

Dado que por lo general en casos de aplicación real los valores del momento de inercia, el coeficiente de roce y la inductancia de la armadura son valores muy pequeños casi insignificantes se pueden llegar a despreciar del análisis, por tanto la función de transferencia se simplifica, y se asimila al siguiente modelo.

De la ec. 3.2.10 tomamos la consideración de que la inductancia «L» del circuito de armadura es muy pequeña, casi cero, por lo tanto generalmente puede despreciarse.

$$\frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{s[(L_a J s^2 + J R_a s + b_m L_a s + b_m R_a + K^2)]} \quad (3.2.11)$$

$$\frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{L_a J s^3 + J R_a s^2 + b_m L_a s^2 + b_m R_a s + K^2 s} \quad (3.2.12)$$

donde $L_a \approx 0$.

$$\frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{J R_a s^2 + b_m R_a s + K^2 s} \quad (3.2.13)$$

$$G(s) = \frac{\theta_m(s)}{V_m(s)} = \frac{K}{(J R_a) s^2 + (b_m R_a + K^2) s} \left[\frac{rad}{V} \right] \quad (3.2.14)$$

3.2.3. Espacio de estados

Las ecuaciones (3.2.5) y (3.2.6) también pueden expresarse en forma de espacio de estado por la elección de la posición del motor, velocidad del motor y la corriente del inducido como las variables de dicho espacio de estados. Una vez más la tensión de armadura se trata como la entrada y la posición de giro es elegido como el de salida.

A través del método de la representación en variables de estado, se definen las ecuaciones que relacionan sus entradas y salidas; las cuales se identificarán con la tensión aplicada a la armadura (v_m) y la posición angular, sobre esta base se produce a manipular las ecuaciones planteadas anteriormente, simplificándolas y relacionándolas de la siguiente forma:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.2.15)$$

$$\alpha_m = -\frac{b_m}{J} \omega + \frac{K}{J} i_a \quad (3.2.16)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{K}{L_a} \theta_m - \frac{R_a}{L_a} i_a + \frac{1}{L_a} e \quad (3.2.17)$$

Se selecciona la posición (θ_m), la velocidad (ω_m) y la corriente (i_a) como variables de estado, obteniendo los siguientes cambios de variables.

$$x_1 = \theta_m \Rightarrow \dot{x}_1 = \omega_m \quad (3.2.18)$$

$$x_2 = \omega_m \Rightarrow \dot{x}_2 = \alpha_m \quad (3.2.19)$$

$$x_3 = i_a \Rightarrow \dot{x}_3 = \frac{di_a}{dt} \quad (3.2.20)$$

$$v_m = e \quad (3.2.21)$$

$$y = \theta_m \Rightarrow y = x_1 \quad (3.2.22)$$

Efectuando la sustitución de las nuevas variables en la ecuación (3.2.15), (3.2.16) y (3.2.17).

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.2.23)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{b_m}{J}x_2 + \frac{K}{J}x_3 \quad (3.2.24)$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{K}{L_a}x_2 - \frac{R_a}{L_a}x_3 + \frac{1}{L_a}v_m \quad (3.2.25)$$

Por ultimo se procede a hacer la representación en espacio de estados, que tiene características matriciales, de la forma $\dot{\bar{x}} = \bar{A}\bar{x} + \bar{B}\bar{u}$ para la entrada, y $\bar{y} = \bar{C}\bar{x} + \bar{D}\bar{u}$ para la salida, en la siguiente figura se puede observar el diagrama de bloques que representa a las dos ecuaciones anteriores.

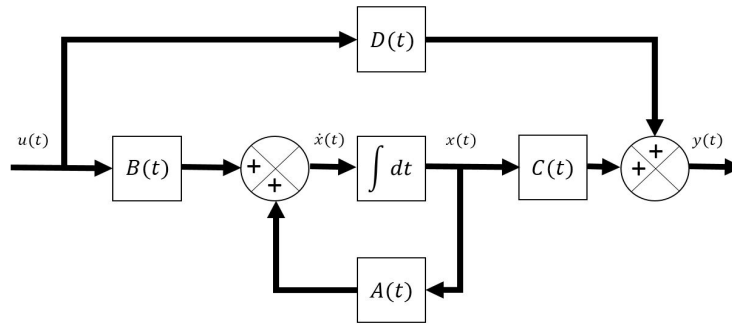


Figura 3.2.2: Diagrama de bloques de ecuaciones de estados.

donde,

- \bar{x} es un vector de estados.
- \bar{u} es el vector de estradas.
- \bar{y} es el vector de salidas.
- A es la matriz característica.
- B es la matriz de entradas.

- C es la matriz de salida.
- D es una matriz de salida directa.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ i_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{b_m}{J} & \frac{K}{JR_a} \\ 0 & -\frac{K}{L_a} & -\frac{R_a}{L_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ i_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_a} \end{bmatrix} V_m \quad (3.2.26)$$

Para el caso de la matriz salida, al no haber perturbaciones se considera que $D = 0$ por lo tanto se reduce a la siguiente forma.

$$y = [1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta_m \\ \dot{\theta}_m \\ i_a \end{bmatrix} \quad (3.2.27)$$

3.3. Diseño de controlador adaptativo (MRAC)

El primordial objetivo de un control adaptativo por modelo de referencia es tener la certeza de que el comportamiento en lazo cerrado del control siga un comportamiento dinámico deseado, analizaremos en la figura siguiente mediante un diagrama de bloques para ver como efectúa el control este tipo de técnicas a diferencia de un control clásico convencional.

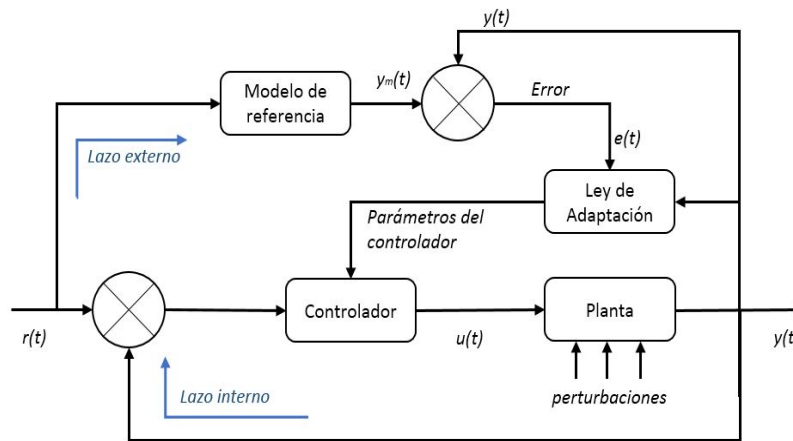


Figura 3.3.1: Diagrama de bloques de un control adaptable por modelo de referencia (MRAC).

Como puede apreciarse el control cuenta con dos lazos uno interno que comprende al controlador y a la planta con presencia de perturbaciones; y el lazo externo que contiene el modelo de referencia al cual deseamos llegar, y la parte importante es la ley de adaptación que rige el comportamiento que deberá seguir el sistema para llegar a reducir el error, este marco o modelo de referencia es un modelo arbitrario al que deseamos llegar puesto que en estos sistemas es muy difícil modelar u obtener todas las variables necesarias para obtener una función de transferencia, en este caso se aplicó un control adaptativo, no por la dificultad de modelar el sistema, si no, por la continua variación en el comportamiento en la dinámica de las perturbaciones del sistema. La principal limitante es

conseguir un mecanismo idóneo de ajuste de parámetros que permita y garantice la estabilidad del sistema, como consecuencia tendríamos un error con tendencia a cero en la salida.

El lazo interno de realimentación compensa la planta y el externo actúa ajustando los parámetros del controlador de tal forma que el error « $e(t)$ » sea de magnitud mínima, este error es derivado de la diferencia entre el error de la salida y la salida del modelo de referencia.

El modelo ajustable necesita de un modelo de referencia, para este caso tomaremos el modelo básico de un motor de CD,

$$F(s) = \frac{b}{s + a} \quad (3.3.1)$$

en consecuencia el modelo de referencia debe tener una forma similar, aplicaremos el subíndice «m» para diferenciar las variables del modelo original al del modelo de referencia, el cual queda descrito así:

$$F_m(s) = \frac{\beta}{s + \alpha} \quad (3.3.2)$$

De forma alternativa la expresamos en el espacio de estados de la forma,

$$\ddot{y} = -a\dot{y} + bu \quad (3.3.3)$$

se asume este modelo como estable y completamente controlable. Siguiendo con el procedimiento se plantea una ley de control para el sistema,

$$u = \frac{1}{b} [\beta r + \hat{a}\dot{y} - \alpha\dot{y}] \quad (3.3.4)$$

ahora toca el turno de plantear el modelo de referencia en espacio de estados para la posición,

$$\ddot{y}_m = -\alpha\dot{y}_m + \beta r \quad (3.3.5)$$

que satisface para los valores comprendidos de $\alpha > 0$ y $\beta > 0$. Ahora bien, podemos sustituir la ley de control (ec. 3.3.4) en el modelo (ec. 3.3.3) obteniendo:

$$\ddot{y} = -a\dot{y} + b \left[\frac{1}{b} (\beta r + \hat{a}\dot{y} - \alpha\dot{y}) \right] \quad (3.3.6)$$

desarrollando y simplificando se tiene que,

$$\ddot{y} = -\alpha\dot{y} + (\hat{a} - a)\dot{y} + \beta r \quad (3.3.7)$$

Por otro lado como se mencionó en secciones anteriores el error se obtiene mediante la diferencia entre la salida del marco de referencia y la salida de la planta, de este modo también podemos exponer las derivadas para obtener el error en la posición.

$$e = y_m - y \quad (3.3.8)$$

$$\dot{e} = \dot{y}_m - \dot{y} \quad (3.3.9)$$

$$\ddot{e} = \ddot{y}_m - \ddot{y} \quad (3.3.10)$$

teniendo las ecuaciones que describen el modelo de referencia para la posición (ec. 3.3.5) y el modelo obtenido en la ec. 3.3.7 procedemos a sustituirlas en la ecuación del error en la posición descrita por la ec. 3.3.10

$$\ddot{e} = \underbrace{(-\alpha\dot{y}_m + \beta r)}_{\ddot{y}_m} - \underbrace{[-\alpha\dot{y} + (\hat{a} - a)\dot{y} + \beta r]}_{\ddot{y}} \quad (3.3.11)$$

aplicando artilugios algebraicos se logra simplificar la expresión de la ec. 3.3.11 quedando el error en la posición descrito por,

$$\ddot{e} = -\alpha\dot{e} - (\hat{a} - a)\dot{y} \quad (3.3.12)$$

donde $\hat{a} = a$, y se asume que el termino general $(\hat{a} - a)\dot{y}$ es aproximadamente igual a cero, con estas aseveraciones la dinámica del error en la posición se reduce a ser descrita por:

$$\ddot{e} = -\alpha\dot{e} \quad (3.3.13)$$

o bien,

$$e(t) = e^{-\alpha t} e(0) \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} (e) = 0; \quad \alpha = 0$$

despreciamos este último caso ya que para nosotros el factor $\hat{a} \neq a$ en consecuencia la expresión $(\hat{a} - a)\dot{y}$ es diferente de cero excepto para valores de $\dot{y} = 0$. Para este caso la dinámica del error se comporta como se planteo en la ec. 3.3.12 donde definimos al error paramétrico como $\tilde{a} = (\hat{a} - a)$ simplificando la expresión del error en la posición a la siguiente expresión:

$$\ddot{e} = -\alpha\dot{e} - \tilde{a}\dot{y} \quad (3.3.14)$$

3.3.1. Ley de adaptación

Dada la naturaleza no lineal y variable en el tiempo de los sistemas adaptativos por modelos de referencia, no son validos los criterios de estabilidad aplicados en sistemas lineales por lo tanto se opta por utilizar un método alternativo, siendo el método de Lyapunov en más conveniente el cual en muchos de los casos puede llegar a garantizar la estabilidad del sistema en $L(x) > 0$ para valores de $x \neq 0$ definida positiva y $\dot{L}(x) \leq 0$ para $x \neq 0$ definida negativa. Se propone la siguiente función candidata de Lyapunov,

$$L = \frac{1}{2}\dot{e}^2 + \frac{1}{2}\tilde{a}^2\gamma \quad (3.3.15)$$

La función candidata de Lyapunov presentada con anterioridad relaciona el error entre las señales y el error paramétrico. Cabe mencionar que del del error paramétrico \tilde{a} se sabe que el valor de a es constante por lo tanto al ser derivado se obtiene que,

$$\dot{\tilde{a}} = \dot{\hat{a}} \quad (3.3.16)$$

y γ representa una ganancia constante positiva la cual determina la velocidad de adaptación del controlador. Se debe tener una importante consideración con la ganancia de adaptación ya que para valores muy grandes con el afán de aumentar la velocidad con la que se adapta puede resultar en una inestabilidad del sistema, al contrario si el valor de γ es muy pequeño esto repercutirá directamente en una velocidad exageradamente lenta, es por eso que se necesita un estudio minucioso por medio de simulaciones para obtener un valor óptimo para esta ganancia.

Prosiguiendo con el método de estabilidad de Lyapunov directo se procede a calcular la primera derivada de la función candidata de Lyapunov que se propuso en la ec. 3.3.15, la cual tiene que ser definida negativa obteniendo la siguiente expresión:

$$\dot{L} = \dot{e}\ddot{e} + \tilde{a}\dot{\tilde{a}}\gamma \quad (3.3.17)$$

3.3. DISEÑO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO (MRAC)

Se sustituyen las ecuaciones del error en la posición (ec. 3.3.14), y se reescribe y desarrolla la ec. 3.3.17 de la forma,

$$\dot{L} = \dot{e}(-\alpha\dot{e} - \tilde{a}\dot{y}) + \tilde{a}\dot{\tilde{a}}\gamma \quad (3.3.18)$$

$$\dot{L} = -\alpha\dot{e}^2 - \dot{e}\tilde{a}\dot{y} + \tilde{a}\dot{\tilde{a}}\gamma \quad (3.3.19)$$

aislamos el error paramétrico para simplificar el análisis,

$$\dot{L} = -\alpha\dot{e}^2 + \tilde{a}(-\dot{e}\dot{y} + \dot{\tilde{a}}\gamma) \quad (3.3.20)$$

se sabe que $\dot{\tilde{a}} = \dot{\hat{a}}$ dado que ya se mencionó que a es un valor constante y dicha derivada sería igual a cero, por otro lado definimos que $\dot{e} = 0$ por lo tanto $\dot{e}^2 = 0$. Este primer termino garantiza que dicha derivada sea definida negativa, en consecuencia, hace que la parte restante de la ecuación se igual a cero haciendo posible formular una solución.

$$\dot{L} = -\alpha\dot{e}^2 \leq 0 \quad (3.3.21)$$

Bajo este argumento definimos una ley de adaptación la cual depende de la par que involucra a:

$$\dot{L} = \tilde{a}(-\dot{e}\dot{y} + \dot{\tilde{a}}\gamma) \quad (3.3.22)$$

Con base a la teoría de Lyapunov, la cual nos dice que la función candidata « L » es definida positiva en un entorno de un punto de equilibrio dado y si su derivada « \dot{L} » es definida negativa entonces se concluye que el sistema será estable en el futuro. Aclarado lo fundamental del método se expresa nuestra ley de adaptación de la siguiente forma:

$$\dot{\hat{a}} = \dot{e}\dot{y}\gamma^{-1} \quad (3.3.23)$$

Una vez realizado todo el análisis anterior podemos describir el proceso de control adaptativo mediante un diagrama de bloques como se observa en la siguiente figura.

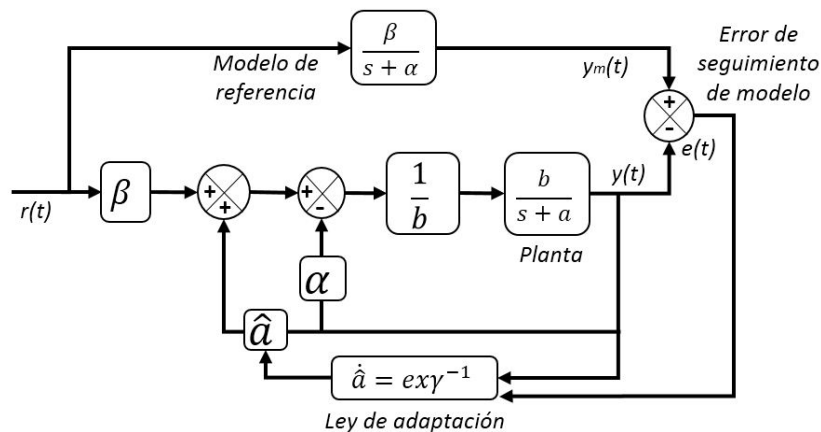


Figura 3.3.2: Diagrama de bloques desglosado del control adaptable.

3.3.2. Valor optimo de γ

El valor gamma (γ), mejor conocido como la constante de adaptación, es el valor que describe la velocidad con la cual el controlado modifica el parámetro de adaptación ante una perturbación variable.

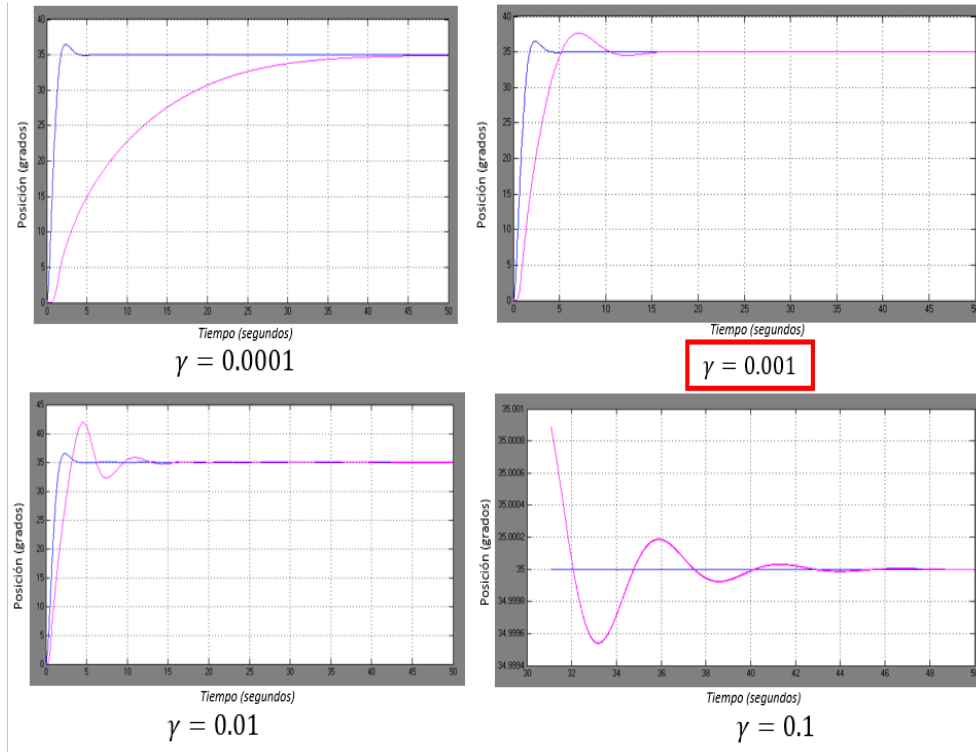


Figura 3.3.3: Simulación para obtener el valor de γ .

Las anteriores gráficas muestran las respuestas para varios valores distintos para γ , como se puede ver, cuando el valor de γ es incrementado el sistema responde y se adapta de una forma mucho más rápida, pero como resultado de esta veloz adaptación el sistema tiende a hacerse inestable. Por otro lado para un valor pequeño de γ tiende a tener un tiempo de adaptación muy grande, no obstante la respuesta es menos propensa a presentar inestabilidad.

Una vez analizado el comportamiento del sistema y las variaciones de gamma, se obtiene que un valor bastante aceptable de $\gamma = 0.001$ el cual se puede observar que tiene un buen tiempo de respuesta y no tiende a causar inestabilidad.

3.4. Pruebas de odometría

Teniendo un control de velocidad implementado para el motor de tracción se procede a hacer pruebas de odometría las cuales nos darán una aproximación de la incertidumbre que se obtendrá con el encoder incremental acoplado de fabrica al motor del tracción, por lo tanto, se procede a realizar pruebas de avance en línea recta del vehículo con distancias variables de avance, realizando un mínimo de 30 pruebas para poder hacer una diseño de experimentos y con esto poder comparar

con los datos teóricos de avance. Al final podremos saber si el sistema odométrico será capaz de dar resultados confiables resultando así en una magnitud pequeña en el error, analizando si este estará dentro de los parámetros permitidos, ya que se necesita de un sistema confiable de posicionamiento.

Las pruebas se realizaron con el siguiente procedimiento:

- Se coloca el vehículo en una posición inicial marcada en el suelo (X_0, Y_0) como se aprecia en la figura 4.1.1.



Figura 3.4.1: Posición inicial del móvil antes de iniciar la prueba.

- Se inicializa en cero el conteo del encoder incremental.
- La dirección se coloca de forma que el vehículo realice un avance en línea recta.
- Se inicia el avance del robot en velocidad intermedia por una distancia determinada.
- Se procede a marcar un punto de recorrido final como se ve en la siguiente figura.



Figura 3.4.2: Marcado del punto de llegada final del móvil.

- Se anota la medición de distancia final (X_f, Y_f) y el número de pulsos del encoder incremental.



Figura 3.4.3: Punto final de recorrido lineal y medición.

- Por último se procede a realizar un reacomodo del robot móvil a la posición inicial (X_0, Y_0) y se repite el proceso.

Por cuestiones de tiempo de experimentación y lo que implica se logran hacer solamente 30 repeticiones lo cual será suficiente para poder aplicar un diseño de experimentos adecuado. Para poder saber si las pruebas que se obtuvieron son significativas de una población en general representamos las pruebas en una gráfica en papel normal, para verificar que las muestras provengan de una población normal. Esta representación es muy importante a la hora de demostrar que la distribución que siguen los datos de una variable así como la de evaluar los efectos significativos en un diseño de experimentos. En la gráfica ubicaremos los valores de las pruebas en orden ascendente en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas se representan los valores obtenidos mediante la ecuación: $\frac{i-0.5}{n} * 100$, la cual nos da una distribución uniforme de acuerdo con el número de pruebas que se hayan realizado en una distribución uniforme desde 0 hasta 100 %.

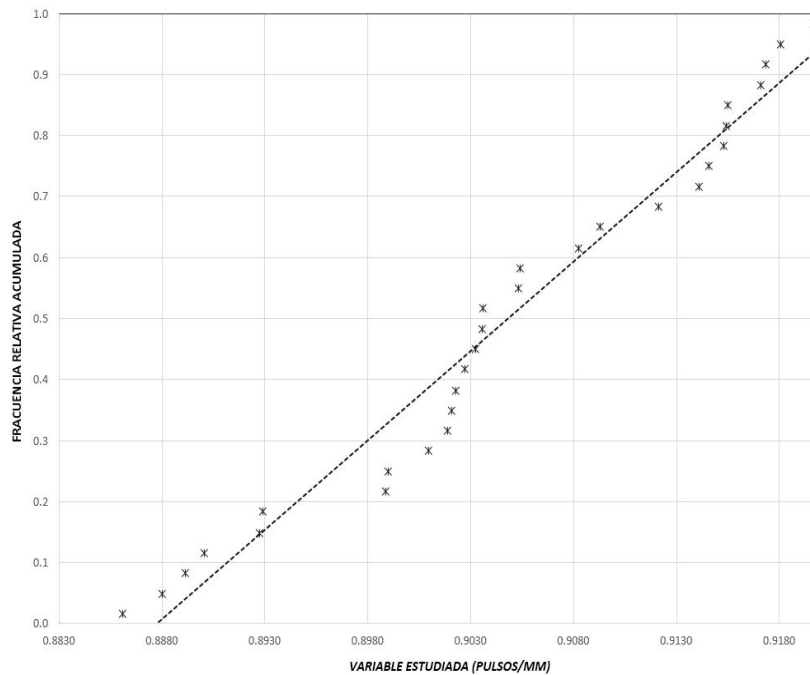


Figura 3.4.4: Gráfica en papel normal.

De la gráfica contenida en la figura anterior podemos ver que las muestras que se obtuvieron se apegan a una tendencia normal, lo cual nos indica que las muestras son representativas de la población, además de no tener evidencia de datos aberrantes lo cual significa que no hay factores significativos que afecten seriamente el comportamiento del sistema, a consecuencia podemos empezar a hacer un diseño de experimentos de las muestras obtenidas para recorridos cortos. Se analizaron de forma teórica los datos que se tienen del encoder incremental en el motor de tracción y de la rueda se obtuvo lo siguiente:

	Característica	Magnitud	Unidades
RUEDA	Radio	12.7	cm
	Perímetro ($2 \cdot \pi \cdot radio$)	797.963	mm
ENCODER	PPR*	880	pulsos
	PPR/mm	0.9067	pulsos

*PPR - Pulsos Por Revolución

Cuadro 3.4.1: Cálculos odométricos teóricos.

Del análisis teórico podemos observar que nos arroja un valor teórico (VT) de 0.9067 pulsos/mm y aplicándole un diseño experimental a las pruebas realizadas

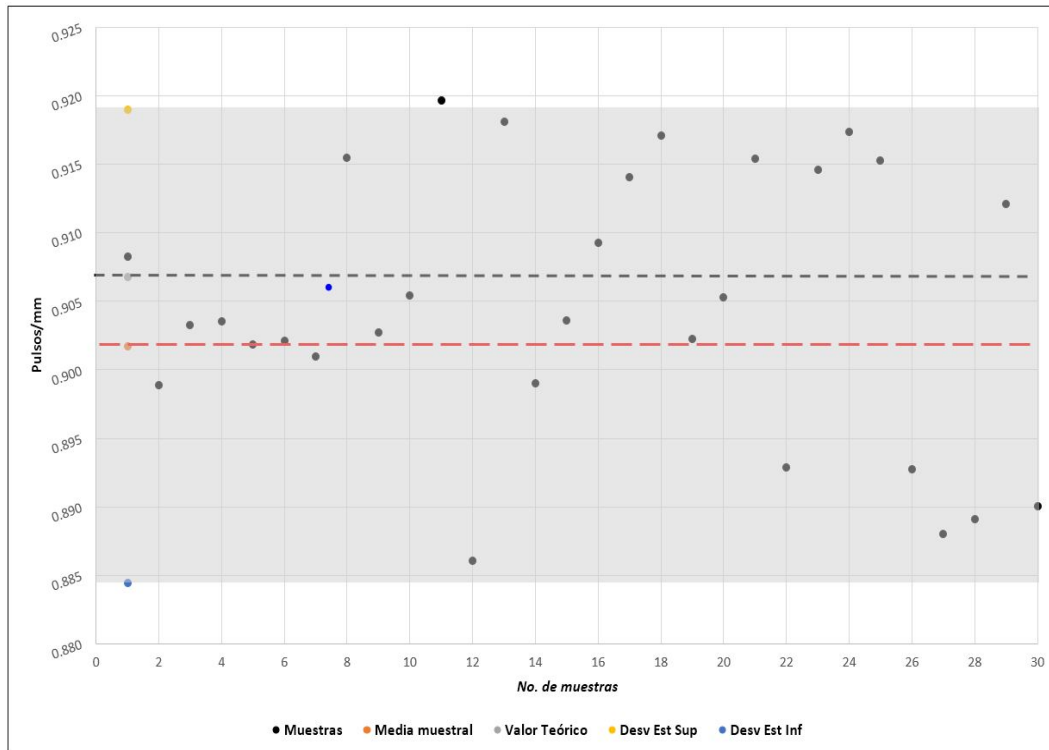
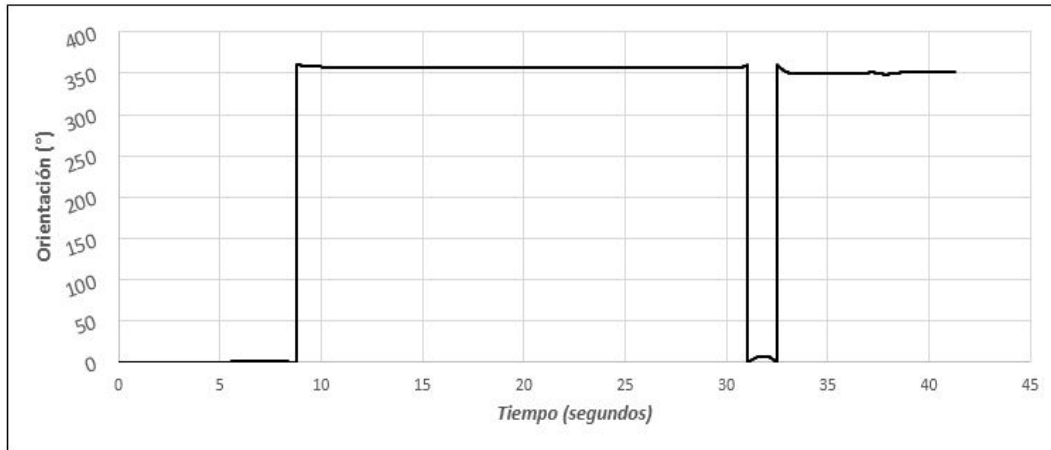


Figura 3.4.5: Análisis de las muestras odométricas para distancias cortas.

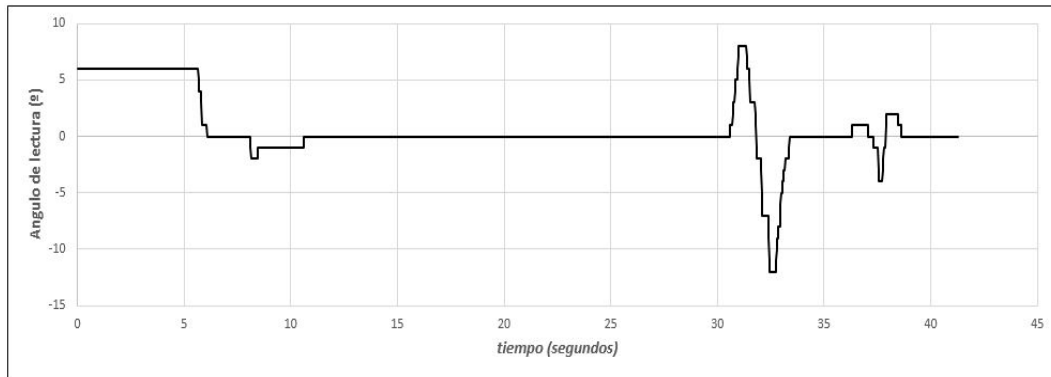
3.4.1. Recorridos largos

Las pruebas odométricas fueron difíciles de realizar por cuestiones de tiempo, liberación de área de tránsito y el permiso otorgado por parte de la empresa al no poder detener operaciones para realizar las pruebas en ambiente real. Estas pruebas se desarrollaron en distintos pasillos de la fábrica y algunas de ellas en el lugar donde el robot operará simulando rutinas que el robot móvil realizará en operación. En la primera prueba se realizó un recorrido con dirección arbitraria de 53.3613 m

a una velocidad de avance considerada constante de $1.39 \frac{m}{seg}$ que es la velocidad estipulada como alcance del proyecto tomando como referencia la velocidad en promedio a la camina un ser humano promedio, esta prueba se realizó en un tiempo aproximado de $41.2671 seg$ con una velocidad de muestreo de $25 ms$.



(a) Orientación global del robot móvil respecto a un marco de referencia fijo.

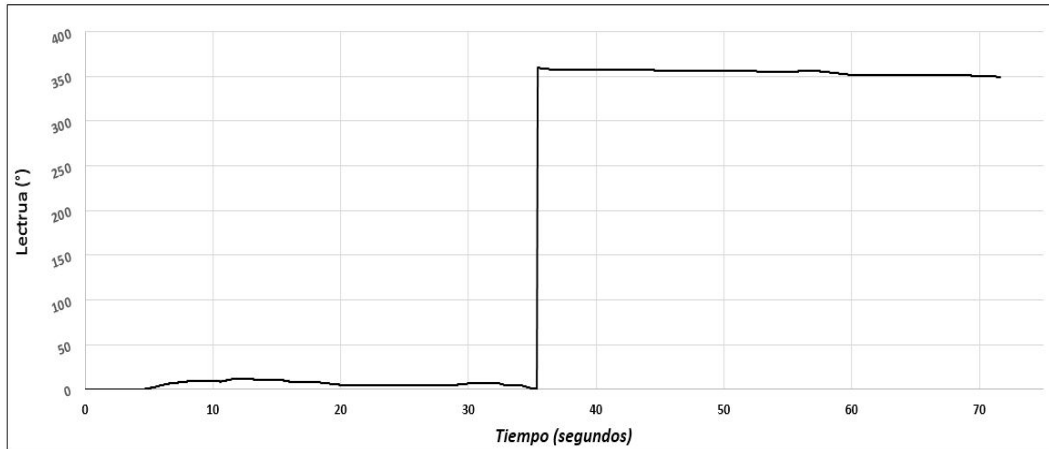


(b) Lecturas de cambio de ángulo en la dirección.

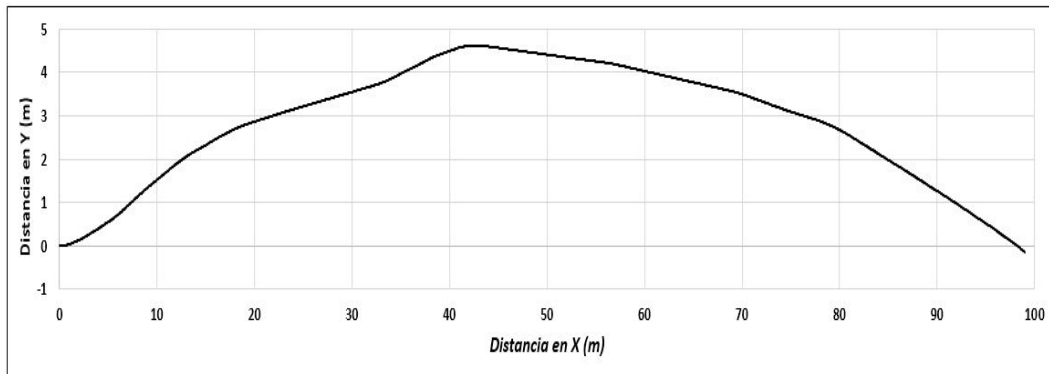
Figura 3.4.6: Primera pruebas de recorrido lineal y lectura odométrica.

En la figura (a) se observa que aparentemente el sistema está realizando un recorrido completamente en línea recta, estos datos son arrojados por el encoder de dirección absoluta el cual se observa que oscila entre 0° y 360° esto indica una trayectoria en línea recta por un tiempo aproximado de $41.2671 seg$. Por otro lado en la figura (b) se observa la variación del ángulo obtenido por el encoder absoluto implementado en la dirección del móvil y su variación en grados contra el tiempo del recorrido total.

En experimentos posteriores y mediante ecuaciones básicas de odometría aplicado a la configuración en particular del robot móvil podemos obtener la posición en un plano del robot y de su trayectoria por la cual está transitando en determinado tiempo de análisis, en la figura siguiente analizaremos la orientación del móvil en un recorrido de prueba.



(a) Orientación estimada absoluta del robot móvil.

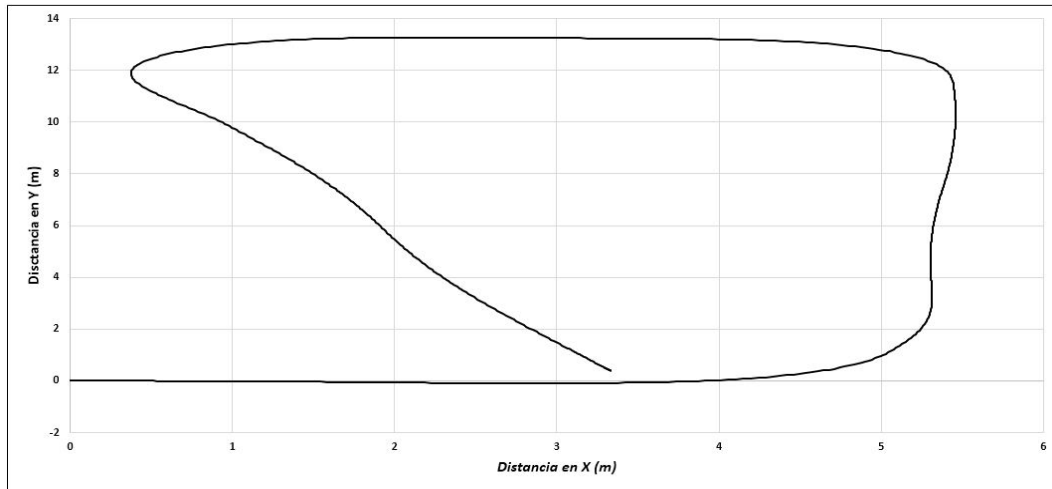


(b) Recorrido realizado con cálculos odométricos.

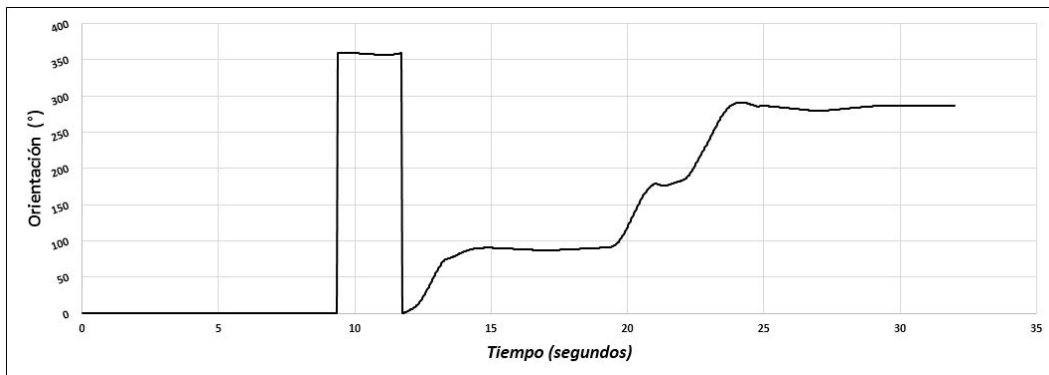
Figura 3.4.7: Prueba de recorrido en línea recta.

Como se puede observar relacionando la figura (a) y (b) podemos observar que el encoder de dirección nos indicó que el móvil efectuaba un recorrido de aproximadamente 99.5226 m en un tiempo aproximado de 71.5990 seg todo esto en línea recta según la evidencia del encoder, no obstante al hacer el análisis odométrico se observa claramente que el robot móvil desarrolló una trayectoria no completamente en línea recta teniendo un desfase serio aproximadamente de 4 m , investigando la posible causa, se determinó que la desviación capturada fue causada por un problema mecánico en la alineación de la rueda de tracción, teniendo un desfase mínimo en la dirección arrojando ese error acumulado en la captura.

Una vez corregido el error no sistemático ocasionado por el desfase en la alineación de la rueda se realizaron más pruebas obteniendo buenos resultados en la odometría, en cuanto a recorrido como se muestra en la siguiente imagen, donde se realizó un recorrido de 34.8028 m en un tiempo de 25.0379 seg .



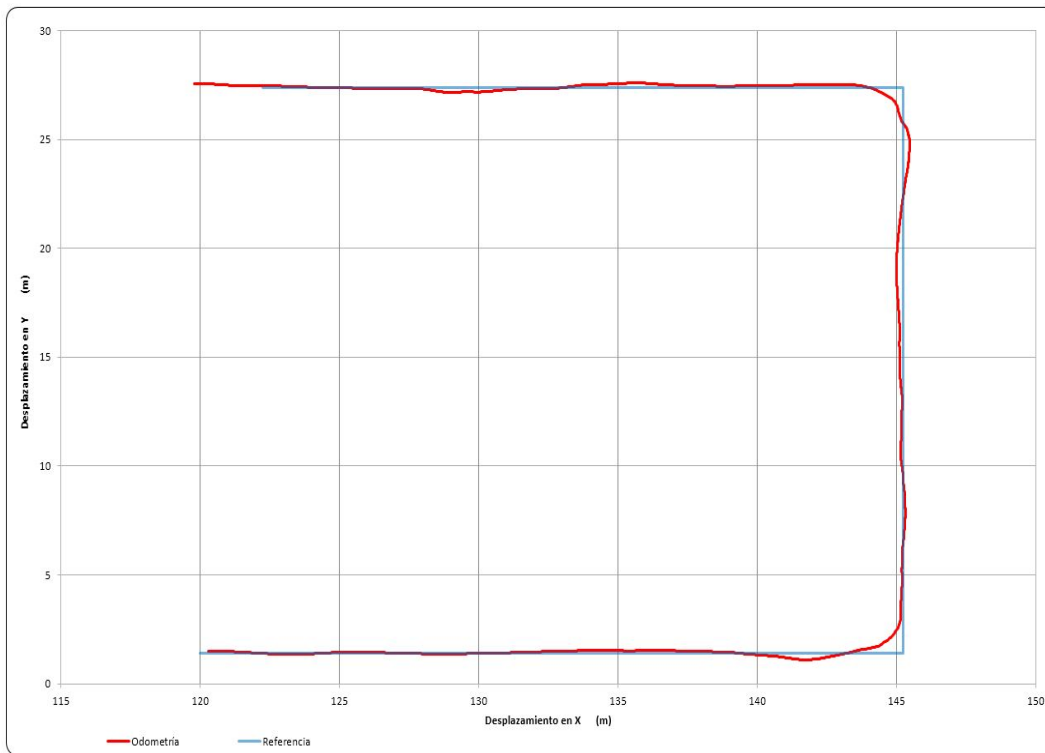
(a) Circuito arbitrario.



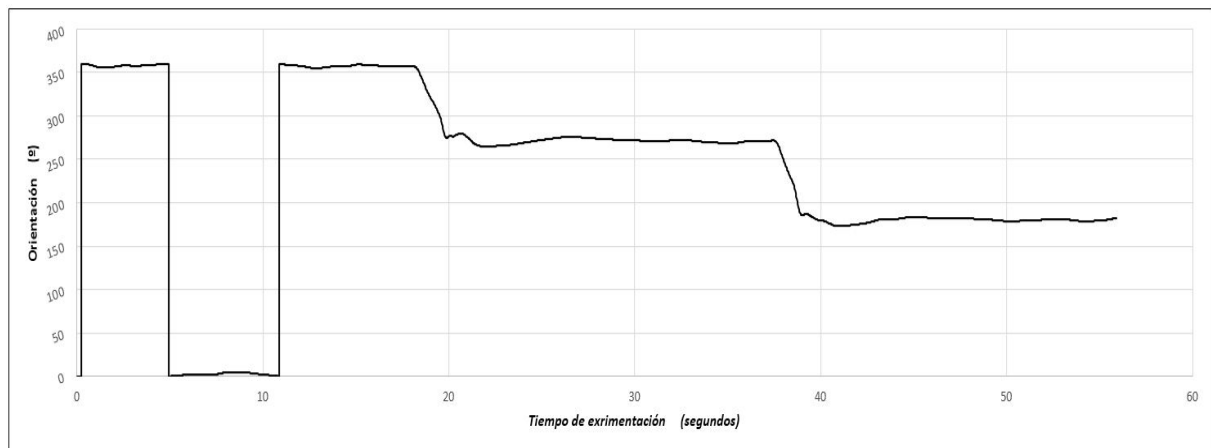
(b) Orientación global durante prueba.

Figura 3.4.8: Recorrido de un semi circuito de forma arbitraria.

Después de muchas pruebas y afinar detalles en la lecturas de los encoders, y resolver algunos detalles en la alineación del motor de dirección se realizaron pruebas con un recorrido detallado, el recorrido analizado fue de 77.7215 m en un tiempo de 55.9147 seg al rededor de una de las líneas de producción de la fabrica.



(a) Recorrido en prueba odométrica.



(b) Orientación global del vehículo durante prueba.

Figura 3.4.9: Recorrido de semicircuito puramente odométrico.

3.4.2. Recorridos definidos

En el siguiente cuadro podemos observar los datos obtenidos para este recorrido de prueba identificado como el número 11.

	Magnitud
Recorrido	75 metros
Velocidad	1.39 $\frac{m}{seg}$
Tiempo	53.9668 seg
Núm. muestras	1992

Cuadro 3.4.2: Datos de prueba número 11.

En la figura siguiente podemos ver el recorrido realizado, en color azul la línea o recorrido de referencia que debe seguir el robot, en rojo la señal y recorrido reconstruido de la señal obtenida por el giroscopio y por ultimo en verde la señal y el recorrido obtenido por los cálculos odométricos.

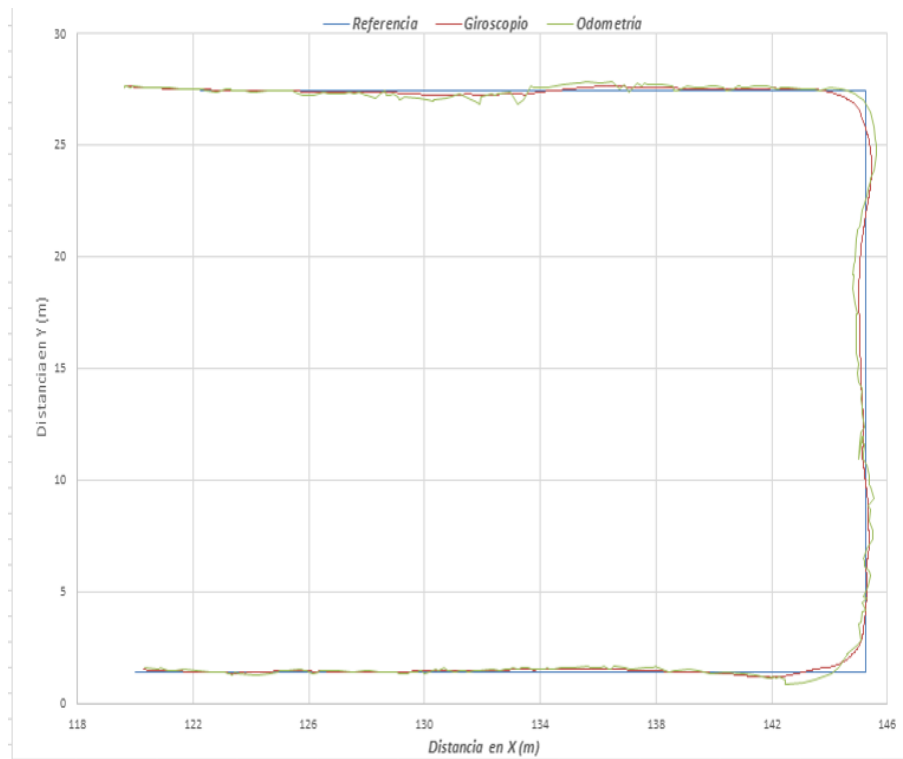
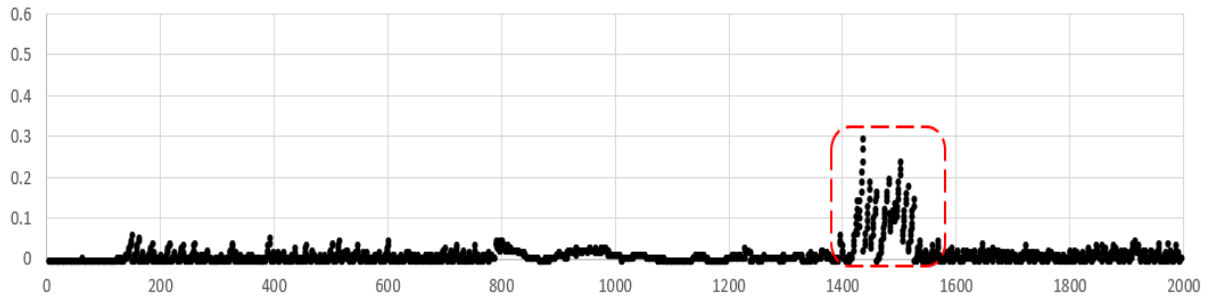


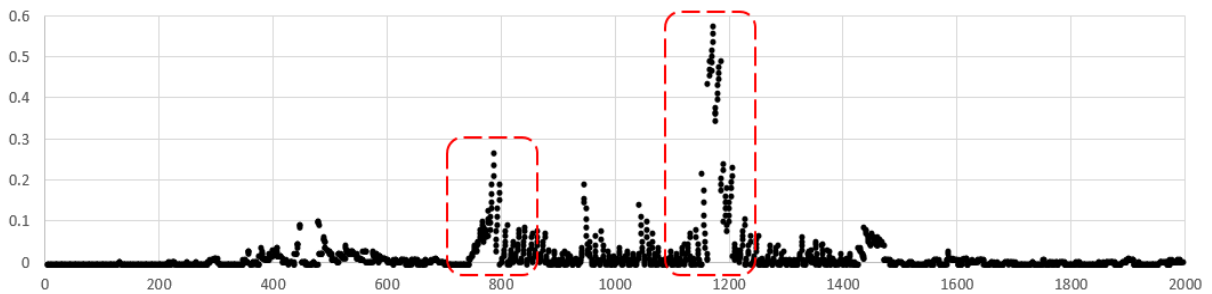
Figura 3.4.10: Recorrido de la prueba número 11.

Se puede apreciar que se detentan varias perturbaciones considerables en el recorrido las cuales son atribuidas a los cambios excesivos en las cargas en las estaciones de trabajo, en el *Apéndice D* se puede observar el comportamiento de la orientación global del vehículo durante el recorrido completo.

Por otro lado teniendo la información del recorrido, comparándola con la señal de referencia medida y aplicando un estimador del Error cuadrático medio (EMC) el cual nos ayuda a tener una mejor idea de la magnitud del error, y poder saber así en que parte del recorrido es donde se presenta las mayores magnitudes de error y poder así averiguar las posibles causas.



(a) Magnitud del error obtenido en el eje X.



(b) Magnitud del error obtenido en el eje Y.

Figura 3.4.11: Estimación del error cuadrático medio en la prueba 11.

En la figura anterior podemos observar los puntos precisos donde se detectaron mayor perturbación, y se sabe que en esos puntos es donde posiblemente se están haciendo los cambios en la magnitud de la carga de arrastre. Sin embargo, se harán modificaciones en unos parámetros del controlador para tratar de disminuir este impacto de las perturbaciones y probarlos en más pruebas.

En la prueba número 15 podemos se puede observar un recorrido parcial de 170.308 *metros* con un tiempo total de recorrido de 122.54 *segundos*. Este recorrido se realiza, sobre una de las zonas donde se efectúan más movimiento de carga descarga en el robot, por esa causa fue elegido como experimento significativo, se puede apreciar el error ocasionado en cada uno de los ejes en los que actúa el robot. Siendo este menor al obtenido en experimentos anteriores.

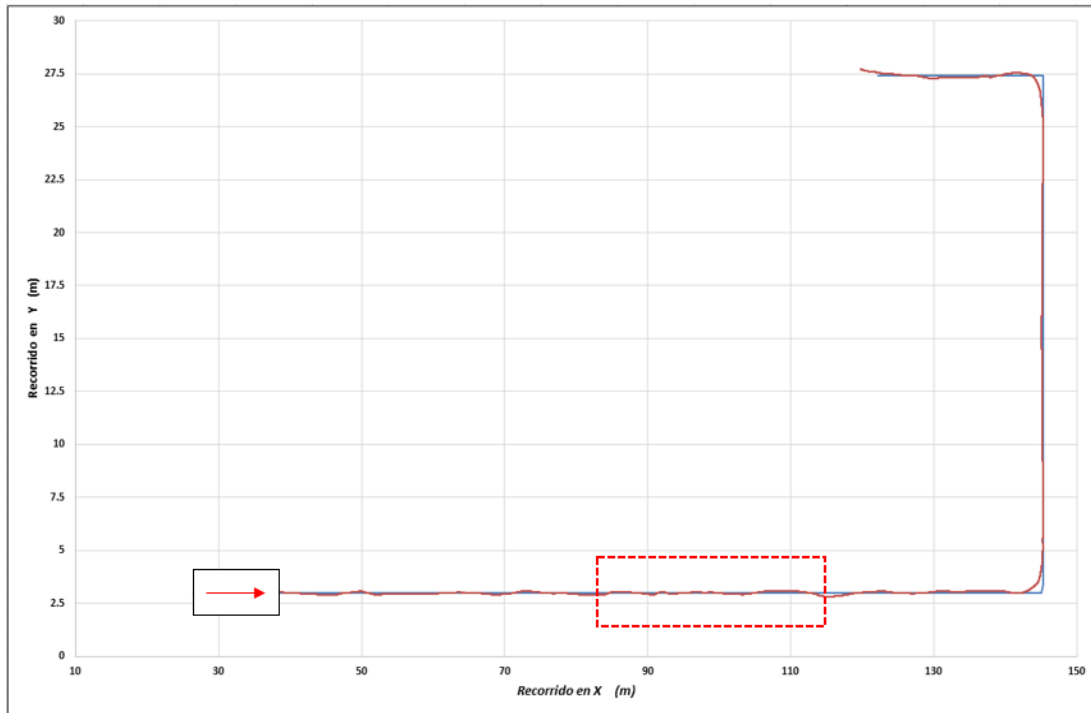


Figura 3.4.12: Recorrido experimental número 15.

Se observa que el error producido por la odometría es muy pequeño, hasta donde se alcanza a ver por la escala del recorrido. Sin embargo realizando un acercamiento a una zona remarcada con un cuadro rojo en la figura, podemos notar que el error obtenido ya sea para el lado derecho o izquierdo del recorrido no supera el valor de los 15 *centímetros* esto lo hace bastante confiable, ya que con ese error se puede garantizar un recorrido óptimo y seguro para la línea de producción.

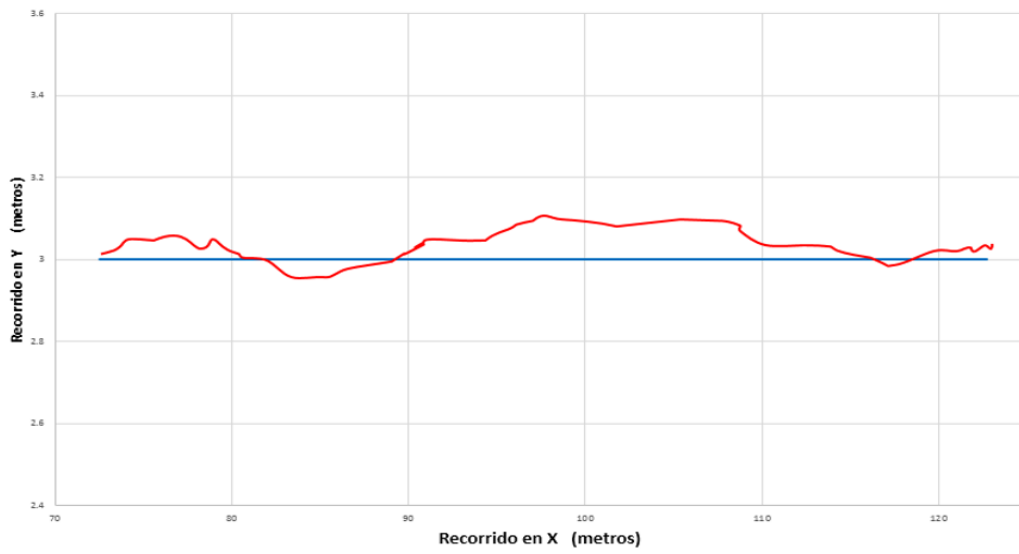
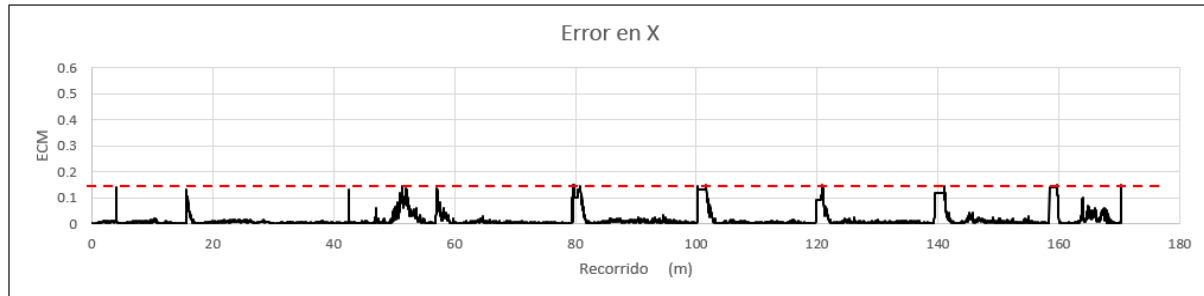
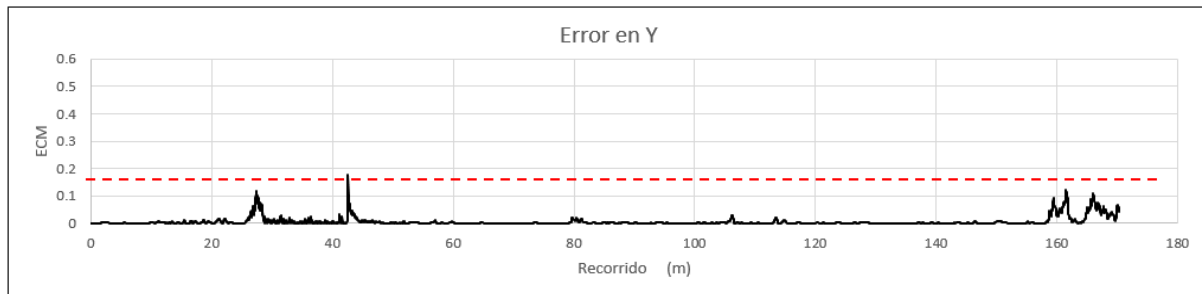


Figura 3.4.13: Zona recordada del recorrido total.

Para tener una mejor idea del error obtenido en forma global durante todo el recorrido, obtenemos la gráfica de ECM. En la figura siguiente se puede ver que el error en X y en el eje Y, se redujeron de forma considerable, comparándolo con lo obtenido y mostrado en la figura 3.4.11. Demostrando que el error es pequeño y aceptable para la aplicación, de la misma forma los picos en el error fueron identificados como las zonas del recorrido donde el robot presentaba perturbaciones en cambios de carga, con ayuda de esta gráfica pudimos encontrar las zonas donde se realizaban mayores cambios en la carga,



(a) Magnitud del error obtenido en el eje X.



(b) Magnitud del error obtenido en el eje Y.

Figura 3.4.14: Estimación del error cuadrático medio en la prueba 15.

3.5. Selección del sensor tipo giroscopio

Entre las necesidades del proyecto se requiere de un giroscopio el cual proporcione información referente a la orientación del robot en todo momento, por eso se necesita de un giroscopio de un eje de lectura, específicamente para el eje Z de rotación, todo depende de la posición en la que es montado el sensor en el sistema, también por la simplicidad se requiere que la salida se analógica y que tenga un buen rango de lectura para estar completamente seguros de que no se obtengan lecturas erróneas por cuestiones de pérdida de rango de lectura, como se explico en la secciones anteriores.

Modelo	Marca	Ejes	Rango	Salida	filtro	Alimentación
LPY4150AL	STmicroelectronics	2	1500 $^{\circ}$ /s	analógica	low-pass	2.7-3.6 volts
LPR410AL		2	100 $^{\circ}$ /s	analógica	low-pass	2.7-3.6 volts
ADXRS620	Analog Devices	1	150 $^{\circ}$ /s	digital/analógica	sin filtro	4.75 - 5.25 volts
ADXRS642			300 $^{\circ}$ /s			
ADXRS649			2000 $^{\circ}$ /s			
KXG03	Kionix	3	2048 $^{\circ}$ /s	digital	sin filtro	1.8 - 3.3 volts
SCR1100	muRata	1	300 $^{\circ}$ /s	digital/analógico	sin filtro	3.3 - 5.0 volts
QRS14	Systron Donner	1	100 $^{\circ}$ /s	analógica	sin filtro	$\pm 9 - \pm 18$ volts

Cuadro 3.5.1: Tabla comparativa de sensores tipo giroscopio.

3.5.1. Características generales

Los girómetros analógicos son sencillos de utilizar en comparación a los que son digitales, seleccionando el giroscopio QRS14-00100-103 de Systron Donner procedemos a analizar las características que nos da el fabricante.

Antes de seguir debemos tomar ciertas consideraciones de operación; una de ellas es indicada por el fabricante en el manual el cual nos indica que el sensor el cual es un instrumento de precisión no esta protegido contra impacto a gran velocidad el cual podría resultar en fallos o en el menor de los casos descalibrar el sensor. Se remarca con insistencia que el sensor no debe estar expuesto a descargas electrostáticas ya que sufriría daños internos irreparables. Este sensor tiene buenas características en cuanto a que es un sensor de tipo estado sólido, compacto, liviano con una muy buena sensibilidad y resolución.

Nos es proporcionada la configuración de los cables, como se muestra en la siguiente figura:

3.5. SELECCIÓN DEL SENSOR TIPO GIROSCOPIO

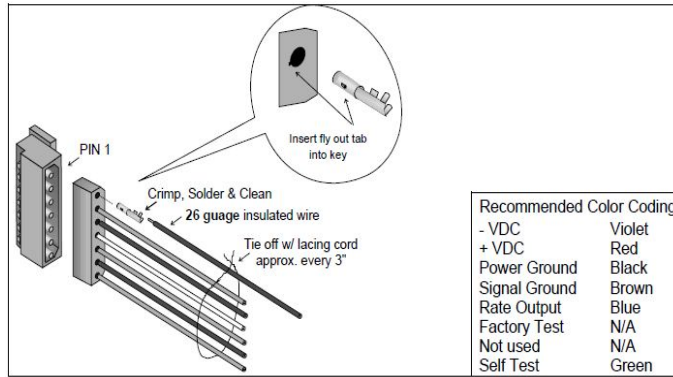


Figura 3.5.1: Configuración de cables del sensor GyroChip II.

Posteriormente tenemos la salida según la numeración de los pines además de consejos para hacer el montaje y sentido del cual se dará la lectura del sensor.

No. de Pin	función	color de cable
1	- VDC	café
2	+ VDC	rojo
3	Power Ground	azul
4	Signal Ground	morado
5	Rate Output	blanco
6	Factory Test	verde
7	Self-Test	gris

Cuadro 3.5.2: Asignación y lugar de los pines.

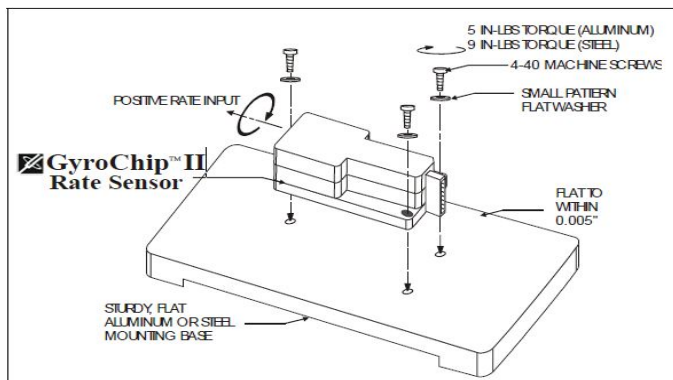


Figura 3.5.2: Diagrama para montaje del sensor.

por último tenemos las especificaciones técnicas del sensor que es la parte más fundamental de este.

Especificación	Magnitud
Voltaje de consumo	± 9 a ± 19 volts
Corriente de consumo	20 mA (por fuente)
Rango	$\pm 100 \frac{g}{seg}$
Factor de escala	$50 \frac{mV}{g}$
Temperatura de operación	-40 a 85 °C

Cuadro 3.5.3: Especificaciones técnicas del sensor GyroChip II.

3.5.2. Acondicionamiento de señales

Ante la impotencia de conectar directamente la señal del sensor a la DAC del DSP. Por razones de disminuir la complejidad del sistema y no sobrecargar al DSP de tareas, se decide implementar un MSP de Texas Instrument el cual tendrá la única tarea de monitorear los cambios presentes en el giroscopio, los cuales a su vez serán comunicados a un puerto del DSP esto con el fin de hacer más sencilla la tarea de captura de datos para el DSP, cabe resaltar que la entrada analógica del DSP puede admitir un rango de voltaje desde 0 a 2.5 volts es por eso que es muy importante acondicionar la señal proveniente del giroscopio ya que esta

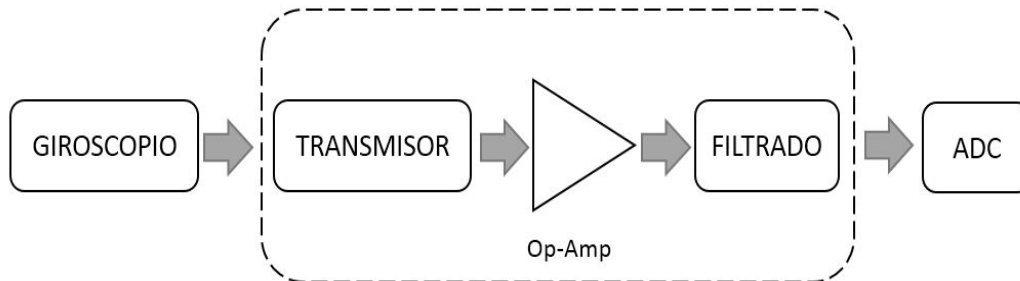


Figura 3.5.3: Proceso general de para acondicionamiento de señales.

Se alimenta al sensor con una fuente dual de ± 9 volts y se realiza un escalado para tener una métrica entre el rango de alimentación al rango de 0 a 2.5 v que se le estará entregando al DSP, en la siguiente figura podemos ver como se realiza la normalización de voltajes a la entrada y salida del sensor para poder ser leído por el DSP.

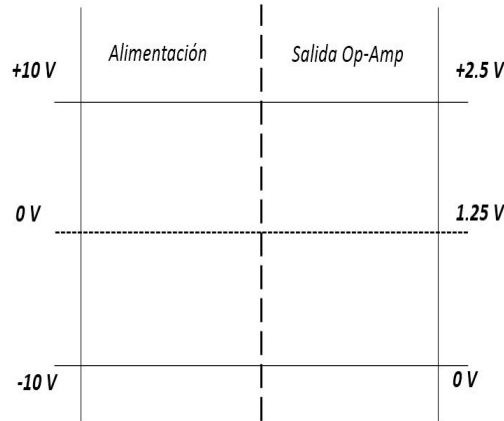


Figura 3.5.4: Escala de voltajes a la entrada y salida del giroscopio.

La escala mostrada en la figura 3.5.4 es de forma teórica pero aplicando el acondicionamiento se encontró de forma empírica que el voltaje alto era de 8.8 volts y el bajo de -9.92 volts por tanto el cero se desplazó a 1.223 volts .

3.5.3. Interpretación de la señal

Los sensores no nos proporcionan la información deseada de forma directa al momento de leerlos, si no que, nos dan una interpretación en este caso se obtiene una variación en mV por cada unidad de cambio en la velocidad angular el eje del motor, por ello es importante hacer un acondicionamiento de señales para poder obtener información de utilidad de las lecturas efectuadas.

Con ayuda de algunas ecuaciones sencillas podemos lograr hacer una conversión de los datos obtenidos en voltaje, y convertirlos en datos significativos en este caso será la variación del ángulo del eje del motor, cabe recordar que el sensor seleccionado tiene un rango de lectura de hasta $\pm 100 \frac{\circ}{\text{seg}}$.

El sensor es alimentado a una fuente dual o bipolar, como también son llamadas, de $\pm 10 \text{ volts}$ en forma teórica. Para hacer nuestro propio factor de escalamiento (FE) dividiremos el Voltaje pico-pico V_{pp} .

$$FE = \frac{V_{pp}}{\text{Rango}} \quad (3.5.1)$$

Para poder obtener una escala propia, que llamaremos lectura escalada (LE) y analizar solamente el cambio de voltaje por cada grado de variación en la posición del eje se utiliza la siguiente ecuación,

$$LE = LA \cdot T_l = \frac{mV}{\circ} \quad (3.5.2)$$

donde LA es la lectura actual del sensor y T_l es el tiempo de lectura, con este análisis ya podemos obtener una ecuación directa que nos da el ángulo por variación de mV, no obstante necesitamos en la programación del DSP obtener ya el dato directo del ángulo, auxiliandonos de la ecuación,

$$\text{Angulo} = \frac{LA}{FE} \quad (3.5.3)$$

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

con esta ecuación ta podemos saber el ángulo de la posición del eje del motor en todo momento determinado de tiempo, con lo cual podemos hacer una historial del valor obtenido del ángulo por la naturaleza no absoluta del sensor, esto implica que el sensor detecta cambios en la lectura e inmediatamente al haber ausencia de variaciones en la posición regresa al cero referencia, pero esto se analizará más tarde y con evidencias de lo mencionado.

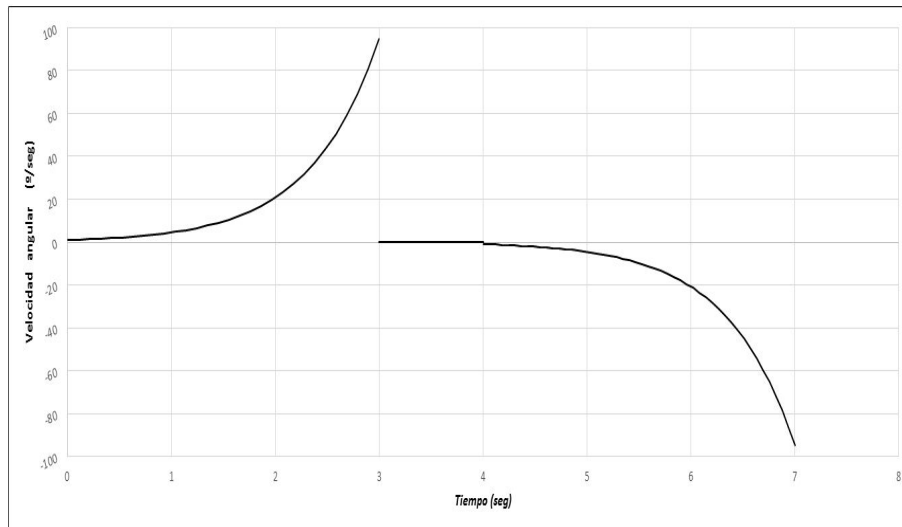


Figura 3.5.5: Simulación de lectura de giroscopio.

En la figura 3.5.5 podemos observar como el sensor va detectando el incremento de velocidad angular hasta llegar a un tope de lectura máxima que en este caso para este sensor en específico es de $100^{\circ}/seg$ positivo para el lado derecho y respectivamente negativo para giros en sentido contrario. Para poder generar un historial de los cambios en las lecturas del sensor, se implemento en el código que cada determinado lapso de tiempo se hiciera una lectura del sensor y se acumulara en la memoria, si el aumento era positivo se sumarían grados y de ser negativo los grados se restarían del total obteniendo así una posición absoluta del sensor, convirtiendo con las ecuaciones anteriores de velocidad a un acumulado del incremento o decremento en grados de la posición del eje del motor de dirección.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

El sistema de control aplicado al robot tipo AGV en cuestion ofrece una buena solución para hacer el control de posición y ubicación del robot durante un recorrido conocido, ya que responde de forma eficiente ante cambios en la dinámica del sistema en forma de perturbaciones variables en la carga que arrastra.

Cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos, se logró diseñar un controlador capaz de efectuar una adaptación en presencia de cambios en la dinámica del sistema, sin importar que dichos cambios sean de pequeña o gran magnitud dentro de un rango de operación establecido.

Se realizaron las simulaciones pertinentes del sistema para obtener un valor ideal del parámetro (γ) el cual dio mejores resultados en la velocidad de adaptación trabajando con un valor de 0.001 (ver sección 3.3.2).

Se efectuaron pruebas de recorrido lineal en primera etapa para cortas distancias, las cuales fueron de gran importancia para tener una idea de la magnitud del error que acumula la odometría comparándolo con la que se obtiene de forma teórica, el error obtenido fue de aproximadamente ± 15 centímetros lo cual lo hace muy confiable para esta aplicación en particular. Por otro lado, se descarto el error de lectura como factor considerable en el error acumulado. Una vez que se obtuvo la información con odometría y las del encoder del motor de dirección, fue posible tener una estimación del avance y la dirección del móvil, y así tener un aproximado de la ubicación y posición global del robot en un punto del recorrido punto del recorrido. En consecuencia se pudo obtener un estimado del error, y del efecto causado al modificar la magnitud de la acción de carga y descarga en el arrastre del robot (ver sección 3.4.2).

Finalmente se demostró que si es posible contar con un sistema de control aplicado a un robot tipo AGV de arrastre, que proporcione evidencia de la posición y orientación del vehículo en el recorrido.

4.1. TRABAJOS FUTUROS

El AGV desarrollado se piensa implementar en más de una línea de producción, es por eso que se tiene pensado implementar más de ellos, con sistemas parecidos, incrementado la fiabilidad y el trabajo en sinergia de los mismo, teniendo un sistema de tráfico de AGV's, mediante sistemas de trilateración por toda la fábrica o sistemas de guiado con sistemas láser con esto se podría tener robots operando simultáneamente por los mismos pasillo sin tener problemas de colisión.

Bibliografía

- [1] Z. Haishui, W. Dahu, Z. Tong, and H. Keming, “Design on a DC Motor Speed Control,” in *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on*, vol. 2. IEEE, 2010, pp. 59–63.
- [2] J. F. Archila and B. Marcelo, “Mathematical models and design of an AGV (Automated Guided Vehicle),” in *2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Melbourne, VIC, 2013, pp. 1857–1862. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=6566670{&}isnumber=6566328>
- [3] A. O. Baturone, *Robótica: Manipuladores y robots móviles*. Marcombo, 2005.
- [4] L. I. G. Calandín, “Modelado cinemático y control de robots móviles con ruedas,” Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2006. [Online]. Available: <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1840/tesisUPV2519.pdf>
- [5] O. Frías, “Estabilización del Péndulo Invertido Sobre Dos Ruedas mediante el método de Lyapunov,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 10, no. 1, pp. 30–36, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S169779121200091X>
- [6] F. Gordillo, “Estabilidad de Sistemas no Lineales basada en la Teoría de Liapunov,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 6, no. 2, pp. 5–16, 2009.
- [7] J. A. Valencia, A. Montoya, and L. M., “Modelo cinemático de un robot móvil tipo diferencial y navegación a partir de la estimación odométrica,” *Scientia et Technica*, vol. 1, no. 41, pp. 191–196, 2009. [Online]. Available: <http://repositorio.utp.edu.co/xml/handle/123456789/564>
- [8] L. Han, H. Qian, W. K. Chung, K. W. Hou, K. H. Lee, X. Chen, G. Zhang, and Y. Xu, “System and design of a compact and heavy-payload AGV system for flexible production line,” in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2013*, no. December, Shenzhen, 2013, pp. 2482–2488.
- [9] Z. Kats and G. Bright, “A Guidance Technique for an Automated Guided Vehicle,” *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 7, pp. 198–202, 1992.
- [10] S. Butdee, A. Suebsomran, F. Vignot, and P. K. Yarlagadda, “Control and path prediction of an Automate Guided Vehicle,” *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 442–448, 2008.
- [11] J. Dixon, M. Rodríguez, and R. Huerta, “Position estimator and simplified current control strategy for brushless-DC motors, using DSP technology,” in *IECON 02 [Industrial Electronics Society, IEEE 2002 28th Annual Conference on the]*, vol. 1. IEEE, 2002, pp. 590–596.

-
- [12] H. Karimipour and H. T. Shandiz, "A new adaptive fuzzy controller for DC motor position control," in *Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control, 2009. ICSCCW 2009. Fifth International Conference on*, no. 1. Famagusta: IEEE, 2009, pp. 2–5.
- [13] A. Boucheta, I. Bousserhane, A. Hazzab, B. Mazari, and M. Fellah, "Adaptive backstepping controller for linear induction motor position control," *COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 789–810, 2010. [Online]. Available: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/033216410111028314>
- [14] N. Bacac, V. Slukic, M. Puškarić, B. Stih, E. Kamenar, and S. Zelenika, "Comparison of different DC motor positioning control algorithms," in *Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), 2014 37th International Convention on. IEEE*, no. 34, Opatija, 2014, pp. 26–30.
- [15] P.-l.-H. Lin, S. Hwang, and J. Chou, "Comparison on fuzzy logic and PID controls for a DC motor position controller," in *Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE*, Denver, CO, 1994, pp. 1930–1935. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=377695{&}isnumber=8608>
- [16] N. Khongkoom, A. Kanchanathep, S. Nopnakeepong, S. Tanuthong, S. Tunyasrirut, and R. Kawagawa, "Control of the position DC servo motor by fuzzy logic," in *TENCON 2000. Proceedings*, vol. 3. IEEE, 2000, pp. 354–357.
- [17] M. Koksall and F. Yenici, "Position Control of a Permanent Magnet DC Motor by Model Reference Adaptive Control," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Vigo: IEEE, 2007, pp. 112–117.
- [18] M. S. Sayed Ahmed, P. Zhang, and Y.-J. Wu, "Position control of synchronous motor drive by modified adaptive two-phase sliding mode controller," *International Journal of Automation and Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 406–412, 2008.
- [19] K. Jeongmin, P. Chiman, H. Sungho, H. Yoichi, and K. Hyunsoo, "Control algorithm for an independent motor-drive vehicle," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 7, pp. 3213–3222, 2010.
- [20] E. M. Petriu, "Automated Guided Vehicle with Absolute Encoded Guide-Path," *Transactions on robotics and Automation IEEE*, vol. 7, no. 4, pp. 562–565, 1991.
- [21] Z. Zheng, W. Zhe, and C. Chao, "A map generation method for Automated Guided Vehicle (AGV)," in *2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2005, pp. 1356–1360.
- [22] M. Yahyaei, J. E. Jam, and R. Hosnavi, "Controlling the navigation of automatic guided vehicle (AGV) using integrated fuzzy logic controller with programmable logic controller (IFLPLC)-stage 1," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 5-8, pp. 795–807, apr 2009.
- [23] E. Shi, Z. Wang, X. Huang, and Y. Huang, "Study on AGV Posture Estimating Based on Distributed Kalman Fusion for Multi-Sensor," in *Intenational Conference and Biometrics*, no. 2, Guilin, 2009, pp. 1219–1223.
- [24] T. Park, J. Ahn, and C. Han, "A Path Generation Algorithm of an Automatic Guided Vehicle using Sensor Scanning Method," *KSME International Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 137–146, 2002.

- [25] J. Kim, S. Woo, J. Kim, J. Do, S. Kim, and S. Bae, "Inertial navigation system for an automatic guided vehicle with Mecanum wheels," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, no. 3, pp. 379–386, apr 2012. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s12541-012-0048-9>
- [26] H. Cho, H. Song, M. Park, J. Kim, S. Woo, and S. Kim, "Independence localization system for Mecanum wheel AGV," in *The 22nd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Gyeongju, 2013, pp. 192–197.
- [27] J. A. Batlle, J. M. Font, and J. Escoda, "Guiado de un robot móvil con cinemática de triciclo," *Anales de Ingeniería Mecánica*, vol. 15, no. 4, pp. 2981–2986, 2004.
- [28] K. Fan, Q. Yang, P. Li, and W. Yan, "On the design of AGV obstacle avoidance system based on fuzzy-PID dual-mode controller," in *Control, Systems & Industrial Informatics (ICCSII), 2012 IEEE Conference on*, no. 1. Baandung: IEEE, 2012, pp. 54–58.
- [29] W. S. Wijesoma, K. R. Kodagoda, and E. K. Teoh, "Stable Fuzzy State Space Controller for Lateral Control of an AGV," *Journal of VLSI Signal Processing*, vol. 32, pp. 189–201, 2002.
- [30] K. Fan, Q. Yang, W. Yan, and B. Lei, "Fuzzy-PID based Deviation-correcting Control System for Laser Guided AGV," in *Modelling, Identification & Control (ICMIC), 2012 Proceedings of International Conference on*. Wuhan, Hubei: IEEE, 2012, pp. 472–477.
- [31] Y. Shang-zun, S. Le-peng, D. Piao, and W. Yuan-hua, "Brushless DC motor speed fuzzy adaptive control system," *Fuzzy Information and Engineering*, vol. 2, pp. 1229–1236, 2009.
- [32] G. N. Gonzalez and J. E. Bosso, "Implementación de un control de velocidad y posición a lazo cerrado de un motor de CC con dsPIC30F4011," in *23º Congreso Argentino de Control Automático*, Buenos Aires, 2012.
- [33] J. Ramírez Pérez, J. M. Campoy Salguero, and G. S. Bruno Alfredo, "Control adaptativo implantado en un micro-PLC," *Impulso, revista de electrónica, eléctrica y sistemas computacionales*, pp. 48–53, 2005.
- [34] F. R. Singla, S. V. Agarwal, and T. H. Parthasarathy, "Statistical analysis of tracking and parametric estimation errors in a 2-link robot based on Lyapunov function," *Nonlinear Dynamics*, vol. 82, no. 1-2, pp. 217–238, 2015. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/s11071-015-2151-9>
- [35] J. Llagunes Font and J. A. Batlle, "Posicionamiento dinámico y guiado de un robot móvil con cinemática de triciclo," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 10, no. 1, pp. 3–13, 2006.
- [36] J. I. Cuevas Collazo, E. Gorrostieta Hurtado, J. C. Pedraza Ortega, U. G. Villaseñor Carrillo, R. A. Romero torres, and M. A. González Aguirre, "Modelación de un Robot Móvil de Dos Ruedas con Tracción Diferencial," in *8º Congreso Nacional de Mecatrónica*, Veracruz, 2009, pp. 306–309.
- [37] C. H. Esparza and R. A. Núñez, "Controlador Adaptativo PD por Modelo de Referencia para una Mesa Vibratoria Biaxial Basada en el Mecanismo Biela-Manivela," *Información tecnológica*, vol. 25, no. 2, pp. 189–202, 2014. [Online]. Available: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84902074153&partnerID=tZOtx3y1>
- [38] R. Guenther and L. Hsu, "Adaptive control of rigid robots with drive gains using parameter unfolding," in *International Association for Automation and Robotics in Construction XII*, 1995, pp. 525–532.

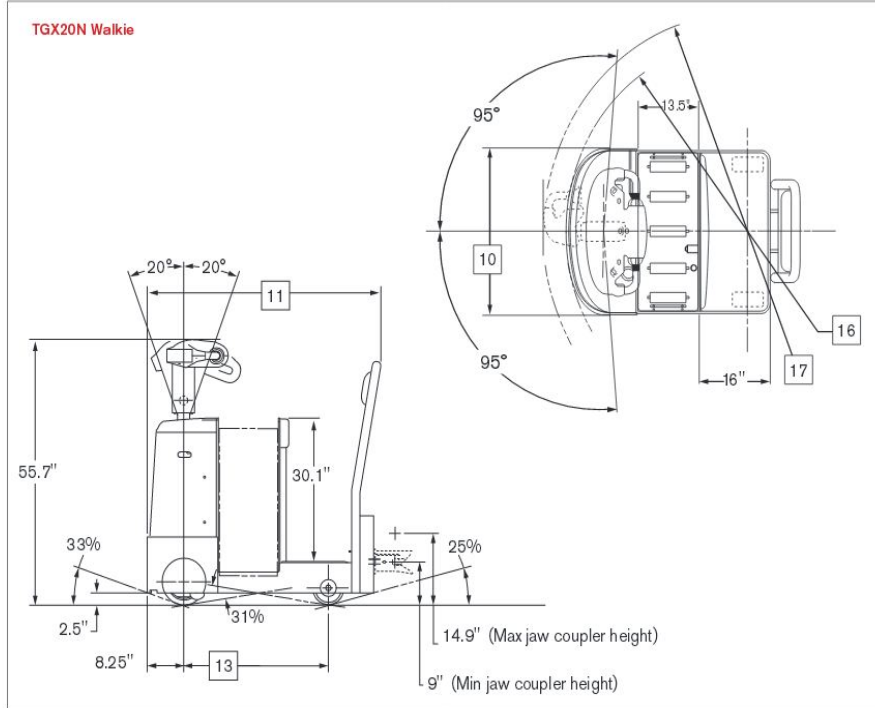
-
- [39] R. A. Núñez-Rodríguez, “Control adaptativo por modelo de referencia con predictor Smith a partir de la regla MIT para una mesa vibratoria de dos grados de libertad,” *Ingeniería Solidaria*, vol. 9, no. 16, pp. 89–95, 2013.
- [40] M. C. Picón M. and F. L. De la Cruz, “Control adaptativo por modelo de referencia de un sistema de levitación magnética,” *Ingeniería UC*, vol. 14, no. 2, pp. 7–13, 2007.
- [41] W. Sunz, J. Castellanos, C. Peraza, and F. Arteaga, “Modelación y control en espacio de-estado de un servomecanismo usando Matlab,” *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 8, no. 1, pp. 1–21, 2001.
- [42] H. Sobreira, a. P. Moreira, P. G. Costa, and J. Lima, “Robust Mobile Robot Localization Based on Security Laser Scanner,” *2015 IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, pp. 162–167, 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7101627>
- [43] L. E. S. Guzmán, M. A. M. Villa, and E. L. R. Vázquez, “Seguimiento de trayectorias con un robot móvil de configuración diferencial,” *Ingenierías USBMed*, vol. 5, no. 1, pp. 26–34, 2015.
- [44] M. A. Rey Melgarejo, A. J. Aranguren Pirajan, and C. A. Valdés, “Controlador óptimo de tiempo mínimo para un motor DC controlado en posición,” *Ingeniería*, vol. 6, no. 1, pp. 67–72, 2000.
- [45] F. Rodríguez Rubio and M. J. López Sánchez, *Control Adaptativo y Robusto*, 1996.
- [46] G.-h. Chang, Y.-f. Li, and Q. Gang, “Intelligent controller design for PM DC motor position control using evolutionary programming,” in *Computing, Control and Industrial Engineering (CCIE), 2011 IEEE 2nd International Conference on*, vol. 1. Wuhan: IEEE, 2011, pp. 37–40.
- [47] C. C. Tsai, B. M. Cheng, and C. K. Chan, “Adaptive backstepping position control for a linear DC brushless motor,” in *Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004. 30th Annual Conference of IEEE*, IEEE, Ed., Busan, 2004, pp. 365–370.
- [48] T. Bao, P. Yuan, T. Wang, D. Chen, Z. Shi, Y. Li, and T. Lai, “Application and Experiment of Tracking Control Method for AGV,” in *2014 International Conference on Multisensor Fusion and Information Integration for Intelligent System (MFI)*, no. 61075084, Beijing, 2014, pp. 1–6.
- [49] J. K. Tar, I. J. Rudas, A. Dineva, and A. Várkonyi-Kóczy, “Stabilization of a modified Slotine-Li adaptive robot controller by robust fixed point transformations,” *Proc of Recent Advances in Intelligent Control, Modelling and Simulation*, pp. 35–40, 2014.
- [50] B. Paden and R. Panja, “Globally asymptotically stable ‘PD+’ controller for robot manipulators,” *International Journal of Control*, vol. 47, no. 6, pp. 1697–1712, 1988.
- [51] G. A. Hernández M., L. Ríos G., and H. Parra L., “Implementación de un controlador PID mediante RNA para el control de motores DC de robots móviles diferenciales,” *Scientia Et Technica*, vol. 2, no. 50, pp. 8–14, 2012.
- [52] J. F. Guerrero-Castellanos, M. G. Villarreal-Cervantes, J. P. Sánchez-Santana, and S. Ramírez-Martínez, “Seguimiento de trayectorias de un robot móvil (3,0) mediante control acotado,” *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 11, no. 4, pp. 426–434, 2014.
- [53] C. A. Saldarriaga-cortés, V. D. Correa-Ramírez, and D. Giraldo-Buitrago, “Parameter Identification and Adaptive Control Applied to the Inverted Pendulum,” *Tecno Lógicas*, no. 28, pp. 71–87, 2012.

BIBLIOGRAFÍA

- [54] V. Digani, F. Caramaschi, L. Sabattini, C. Secchi, and C. Fantuzzi, “Obstacle avoidance for industrial AGVs,” *IEEE International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP)*, pp. 227–232, 2014.

Parte I
APÉNDICE A

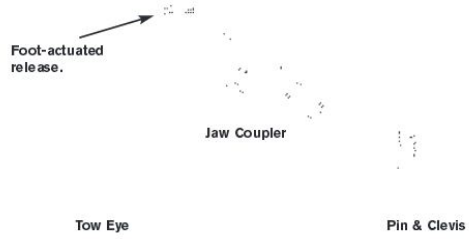
Dimensions



Adjustable Coupler Plates

Coupler plate allows each type of coupler to be adjustable in 1" increments

Type		Coupler Heights	
		Minimum	Maximum
Jaw Coupler	in (mm)	9.0 (228)	14.9 (380)
Tow Eye	in (mm)	9.3 (236)	15.3 (387)
Pin & Clevis	in (mm)	7.3 (186)	13.3 (337)



Parte II

APÉNDICE B

# de prueba	Torque necesario (Nm)
1	136.6
2	137.3
3	134.9
4	135.6
5	134.2
6	136.0
7	135.7
8	133.5
9	133.0
10	134.9
11	135.1
12	135.4
13	137.9
14	135.5
15	134.5
16	134.8
17	135.2
18	137.1
19	133.3
20	134.5
21	135.9
22	135.2
23	134.1
24	132.5
25	135.9
26	134.4
27	132.2
28	133.1
29	136.1
30	132.8

Cuadro 4.1.1: Pruebas completas de torque para rotar la dirección en Nm .

Parte III

APÉNDICE C

#	Puntos reales	Distancia (m)	mm/puntos
1	10702	402.9367	37.6499
2	5162	194.3524	37.6354
3	4982	187.5753	37.6525
4	2643	93.5581	37.6501
5	4493	175.9860	37.6201
6	3064	154.2325	37.6630
7	9874	389.6751	37.6529
8	6602	248.56	37.6856
9	12141	457.11	37.6563
10	7603	286.2575	37.6625
11	3297	124.1340	37.6504
12	8695	327.3719	37.6542
13	9916	373.3433	37.6620
14	9678	364.3825	37.6634
15	5706	214.8343	37.6628
16	7707	290.1731	37.6698
17	3031	114.1189	37.6571
18	3235	121.7996	37.6620
19	2977	112.0858	37.6659
20	4255	160.2033	37.6693
21	3282	123.5692	37.6625
22	8895	334.9021	37.6685
23	10081	379.5557	37.6663
24	6565	247.1762	37.6511
25	3243	122.1009	37.6552
26	7858	295.8584	37.6598
27	8435	317.5828	36.9986
28	7009	263.8930	37.6531
29	4438	167.0933	37.6558
30	8479	319.2394	37.6547

Cuadro 4.1.2: Pruebas completas de torque para rotar la dirección en Nm .

Parte IV

APÉNDICE D

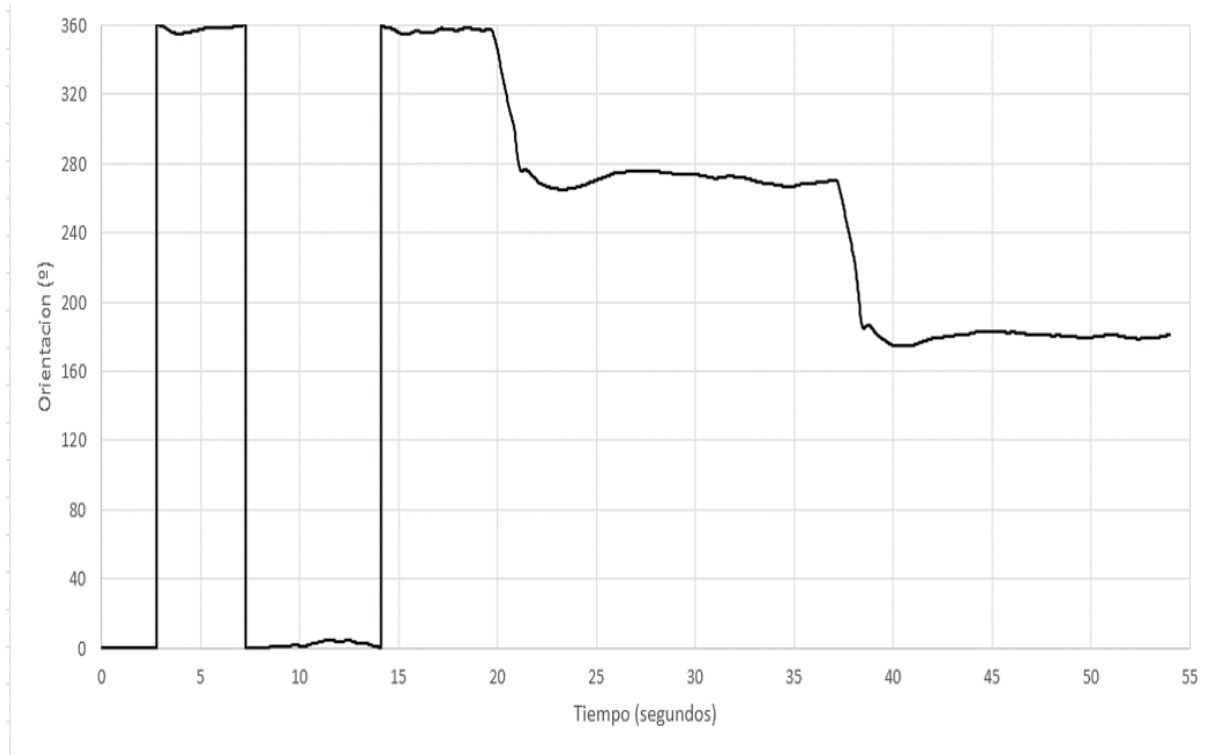


Figura 4.1.1: Orientación global en grados de giro del motor en la prueba número 11.