

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“DESARROLLO DE PROTOTIPO DE UN ROBOT MÓVIL:
MODELADO, IMPLEMENTACIÓN DE
TRAYECTORIAS E INTEGRACIÓN DE HARDWARE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:

ING. ERNESTO DARIO TEMBLADOR HERNÁNDEZ

ASESOR:

DR. JUAN ANTONIO CÁRDENAS GALINDO

San Luis Potosí, S.L.P.

Septiembre 2012



ING. ERNESTO DARIO TEMBLADOR HERNÁNDEZ
P R E S E N T E. –

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de *Maestría en Ingeniería Mecánica*. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de enero del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**“DESARROLLO DE PROTOTIPO DE UN ROBOT MÓVIL MODELADO,
IMPLEMENTACIÓN DE TRAYECTORIAS E INTEGRACIÓN DE
HARDWARE ”**

INTRODUCCIÓN.

- I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.
 - II. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA E INTERFAZ HARDWARE-SOFTWARE.
 - III. DESARROLLO DE TRAYECTORIAS.
 - IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES.
- CONCLUSIONES.
BIBLIOGRAFÍA.
APÉNDICE.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

ATENTAMENTE,

ING. ARMANDO VIRAMONTES ALDANA
DIRECTOR

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION



**FACULTAD
DE INGENIERÍA**

Av. Manuel Navo 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336
www.uslp.mx

**bcb



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

FORMA SGTL08

FECHA: 27 / FEB. / 2012
DÍA MES AÑO

SECRETARÍA GENERAL DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
P R E S E N T E.-

Nos permitimos informar a esa Secretaría que el (la) Sr (ita).

TEMLADOR

HERNÁNDEZ

ERNESTO DARIO ING.

APELLIDO PATERNO

APELLIDO MATERNO

NOMBRE (S)

Ha efectuado a satisfacción las correcciones que se le indicaron durante la revisión conjunta a su Trabajo de investigación y/o Tesis, correspondiente a la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA**, por lo cual estamos autorizando con esta forma la impresión del mismo.

Sin otro particular por el momento, protestamos las seguridades de nuestra atenta y distinguida consideración.

ATENTAMENTE

Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo

NOMBRE

J. A. Cárdenas Galindo
FIRMA

Dra. Nancy Visaino Cruz

NOMBRE

Nancy Visaino Cruz
FIRMA

Dr. Mauro Eduardo Maya Méndez

NOMBRE

Mauro E. Maya Méndez.
FIRMA

NOTA: A la aprobación del Examen Previo de Grado, cuanta usted con seis meses a partir de la presente fecha, para sustentar su Examen Final, al vencimiento del mismo deberá presentar examen previo de nueva cuenta, haciendo los trámites requeridos para tal propósito.



FACULTAD
DE INGENIERÍA

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al 39
fax (444) 826 2336
www.uaslp.mx

ENTREGAR 7 EJEMPLARES IMPRESOS

Palabras del autor

Para mí el estudio de una maestría, surge del interés de poder ampliar mis conocimientos conocer conceptos nuevos; es cuando te topas con un desarrollo innovador en el campo de la ingeniería, volteas a tu cajón de habilidades y conocimientos, y te das cuenta que para el problema en particular no tienes la herramienta adecuada, y sí se cuenta con la herramienta se desconoce cómo utilizarla o si desarrollas la idea te quedas con la sensación de ¿habrá sido la mejor manera de hacerlo?

Al terminar la maestría, a mi cajón de herramientas sólo se le agregaron algunas, pero se desarrollaron nuevas habilidades para aprovechar mejor las herramientas anteriores y las nuevas adquiridas.

Atentamente
Ing. Ernesto Dario Temblador Hernández

Agradecimientos

Agradecer primero a Dios

A mis padres que me apoyaron
en cada momento que estuve en el posgrado.

A mi novia Fátima que quiero
mucho y que me estuvo alentando a terminar este trabajo de tesis.

A mis hermanos Yaz y Lu que
estuvieron pendientes de mis estudios y preguntando que tanto hacía
en la escuela.

A mi compadre Poncho que sin él
no me hubiera motivado a entrar al posgrado, no hubiera empezado
esta aventura.

A mis compañeros y amigos de la
Maestría que vivimos grandes retos tanto grupales como personales,
en todo momento estuvimos apoyándonos mutuamente.

Al Comité del Posgrado por
haberme permitido llegar a estas instancias.

A mi asesor que fue de gran
apoyo en la realización de este trabajo de tesis.

A mis revisores de tesis que con
sus comentarios y ayuda este trabajo se enriqueció y se concluyó.

A Doña Chela por el apoyo en los
trámites administrativos.

... Y finalmente a cada persona
que me ayudó a terminar esta Maestría.

Resumen

Con este trabajo de tesis se buscó desarrollar un robot móvil sobre ruedas del tipo modular y con autonomía de movimiento. El robot móvil se desarrolló a partir de una suspensión cinemática existente que tiene la capacidad de moverse en entornos estructurados, semi-estructurados y no estructurados. Esta suspensión puede adoptar diferentes configuraciones mecánicas.

Se realizó la integración de un módulo de control para operar los servomotores. El módulo suministra la autonomía de movimiento al robot. Este módulo cuenta con comunicación inalámbrica y puede controlar hasta cuatro servomotores y cuenta también con salidas y entradas tanto analógicas como digitales.

Se desarrollaron y programaron algoritmos generadores de trayectorias por medio de funciones que son independientes del tiempo. Las funciones utilizadas para generar la trayectoria fueron polinomios de cuarto orden y splines cúbicos.

Una vez que se realizó la integración entre la suspensión cinemática con el módulo de control, se realizó una validación experimental de los algoritmos generadores de trayectorias en el robot móvil.

Entre los resultados que se obtuvieron fueron: la integración del módulo de control a la suspensión ya existente; la creación de librerías en lenguaje C++ para la comunicación entre la computadora y la tarjeta de control de movimiento; se evaluó a nivel simulación las configuraciones de robot con dirección tipo diferencial; y por último se implementaron y validaron experimentalmente los algoritmos de generación de trayectorias en el robot móvil CIEP_1 con dirección tipo diferencial.

Índice general

Palabras del autor	i
Agradecimientos.....	iii
Resumen	v
Índice general.....	vii
INTRODUCCIÓN	1
Tipos de robots.....	3
Robot manipulador	3
Robot médico	4
Robot humanoide.....	4
Robot móvil	6
Robots móviles comerciales.....	6
Robots móviles con ruedas desarrollados en centros de estudios.....	11
Suspensión de un robot móvil.....	13
Motivación	15
Objetivo del presente trabajo de tesis.....	16
Objetivos específicos.....	16
Organización de la tesis.....	16
I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	17
1.1. Antecedentes	19
1.2. Diferentes tipos de dirección en los robots móviles con ruedas.	22
1.2.1. Dirección tipo diferencial	22
1.2.1.1. Dirección tipo unicycle.....	22
1.2.2. Dirección tipo triciclo	23
1.2.3. Dirección tipo Ackerman	24
1.3. Diseño de la suspensión cinemática CIEP_1	24
II. INTEGRACIÓN DE SISTEMA E INTERFAZ HARDWARE-SOFTWARE.....	29
2.1. Integración de componentes eléctricos y electrónicos del robot móvil.....	30
2.1.1. Comunicación.....	34
2.1.2. Actuadores.	34

2.2. Integración hardware-software	34
2.2.1. Configuración de la tarjeta de control de movimiento	35
2.2.2. Configuración de la red inalámbrica	36
2.2.2.1. Velocidad de comunicación	36
2.2.3. Aplicaciones C++	36
2.3. Resumen del capítulo	39
III. DESARROLLO DE TRAYECTORIAS	41
3.1. Ecuaciones cinemáticas del robot móvil en configuración de dirección tipo unicycle	42
3.2. Ecuaciones cinemáticas del robot móvil en configuración de dirección tipo Ackerman	45
3.3. Perfil de velocidades	48
3.4. Definición de los parámetros del robot móvil	51
3.5. Generación de la trayectoria por un polinomio de cuarto orden	57
3.5.1. Tipo de segmentación del polinomio de cuarto orden	58
3.5.1.1. Modelado segmentación uniforme	59
3.5.1.2. Modelado con segmentación fina	59
3.6. Generación de trayectorias por splines cúbicos	63
3.7. Validación de los modelos para la generación de trayectorias	69
3.7.1. Validación de trayectorias variando la coordenada deseada del efector final	70
3.7.1.1. Trayectorias generadas con un polinomio de cuarto orden	70
3.7.1.1.1. Segmentación uniforme	70
3.7.1.1.2. Segmentación fina	72
3.7.1.1.3. Conclusiones	74
3.7.1.2. Trayectorias generadas con splines cúbicos	75
3.7.1.2.1. Conclusiones	76
3.7.2. Validación de trayectorias variando la orientación deseada del efector final	77
3.7.2.1. Trayectorias generadas con un polinomio de cuarto orden	77
3.7.2.1.1. Segmentación uniforme	77
3.7.2.1.2. Segmentación fina	79
3.7.2.1.3. Conclusiones	81
3.7.2.2. Trayectorias generadas con splines cúbicos	82
3.7.2.2.1. Conclusiones	83
3.8. Análisis de resultados	84

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES	89
4.1. Pruebas con dirección tipo Ackerman.....	92
4.1.1. Verificación experimental 1	92
4.2. Dirección tipo diferencial (<i>uniciclo</i>).....	96
4.2.1 Verificación experimental 2	96
4.2.2. Verificación experimental 3	101
4.4.3. Verificación experimental 4	106
4.4.4. Verificación experimental 5	111
4.2.5. Verificación experimental 6	116
4.2.6. Verificación experimental 7	121
4.2.7. Verificación experimental 8	126
4.3. Análisis dinámico del robot móvil CIEP_01	131
4.3.1. Perfil de velocidad	131
4.3.2. Singularidades de la rueda loca (rueda orientable descentrada)	134
4.4. Discusión final de resultados.....	136
CONCLUSIONES.....	139
Integración hardware-software	140
Generación de trayectorias.....	141
Recomendaciones y trabajo a futuro	143
BIBLIOGRAFÍA	145
APÉNDICE	149
Comandos de la tarjeta Galil	150

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del hombre en la Tierra, éste ha buscado hacer herramientas para simplificar las actividades productivas. Los robots se pueden considerar una de las herramientas con mayor potencia para simplificar las actividades que hoy en día el hombre realiza. Los robots son “herramientas cada vez más sofisticadas”, creadas con base en la ingeniería moderna y en el desarrollo de nuevos conocimientos.

La aparición del término “robot”, se debe al novelista checo Karel Capek, que introdujo la palabra “robota”, que significa fuerza de trabajo y servidumbre. A partir de ahí los robots fueron identificados como máquinas autónomas con parecido a los seres humanos. Hoy en día podemos encontrar diferentes diseños de robots, desde un robot inspirado en un insecto, hasta un sistema de barras acopladas como lo es el robot paralelo (fig.1).



Figura 1. Robot paralelo en la industria alimenticia, M-3iA de FANUC.

Durante los últimos 45 años, la robótica ha generado diferentes campos de investigación y de aplicaciones técnicas. En 1960, los robots hacen su aparición en la industria, se instalan en las fábricas para realizar tareas peligrosas o complejas. Una vez aceptados los robots en la industria, éstos se siguieron desarrollando para poder cubrir las nuevas necesidades que la industria exigía.

Con el desarrollo de nuevos productos, que se fabrican con métodos de manufactura no convencionales, más las exigencias de tiempo y calidad que necesitan en las industrias, se abren nuevos campos de aplicación para los robots.

Las investigaciones de campo en lugares de alto riesgo para el hombre, dan paso al desarrollo de los robots móviles, logrando con su ayuda que desde un lugar seguro el operador pueda realizar actividades como recolectar, observar o medir.

Tipos de robots

La investigación y desarrollo de los robots ha generado diferentes formas de clasificarlos, una manera es la que se muestra en la fig.2. Esta clasificación presenta tres grupos principales que son: los manipuladores, los biológicamente inspirados y los robots móviles; aunque hay robots que pueden clasificarse en más de un grupo [2].

Los robots móviles se comienzan a desarrollar a finales de los años 60 fig. 2. Los diferentes tipos de robot móviles se pueden clasificar dependiendo su actividad, como pueden ser: robot explorador, robot de vigilancia, robot domésticos, guía de oficinas y robot submarinos. El robot móvil con ruedas podría entrar casi en todas las clasificaciones.

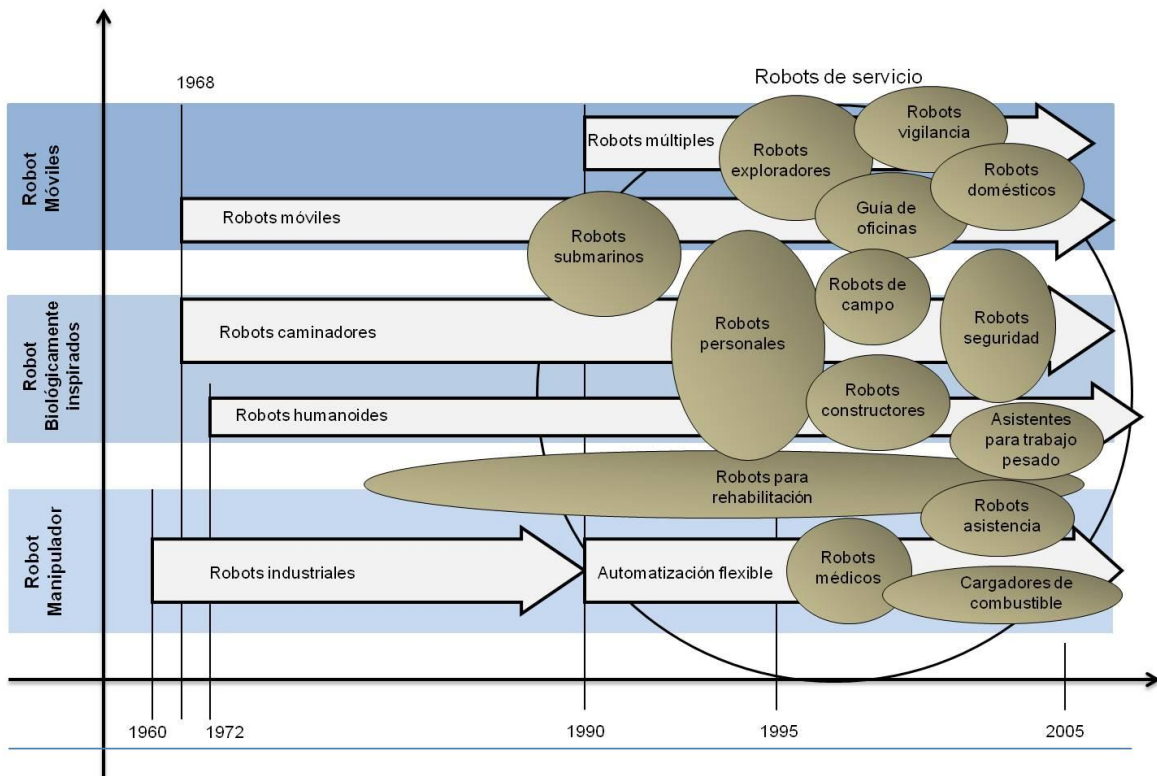


Figura 2. Evolución de los robots

Robot manipulador

Un robot manipulador, se define como un brazo robótico que consiste en una cadena cinemática abierta, compuesta por eslabones que al final del último eslabón se acopla un actuador que realiza una tarea específica. Regularmente las tareas para los cuales son diseñados son, soldadura, aplicación de pintura, y posicionamiento de piezas. Una de las ventajas de estos robots es su repetitividad y control de la velocidad. En la fig. 3 se presenta un robot comercial [1].



Figura 3. Brazo robótico industrial marca KUKA

Robot médico

En los últimos años, el campo de la medicina ha sido invadida por robots, no para reemplazar al personal calificado (enfermeros, doctores), si no para asistir en tareas de precisión. Los robots están siendo utilizados en: laboratorios, tele cirugía, entrenamiento de cirujías, cirujías remotas y rehabilitación.

En la fig. 4 se observa el robot Da Vinci que debe ser operado por un doctor desde una computadora en el quirófano, este robot permite realizar intervenciones quirúrgicas realizando incisiones pequeñas en los pacientes en lugar de las grandes incisiones que suelen ser peligrosas para el paciente [3].



Figura 4. Robots medico Da Vinci

Robot humanoide

Los robots bípedos hicieron su aparición en 1967, cuando Vukobratovik, condujo el primer experimento con un “dermato-skeletons”. El primer controlador para un robot bípedo fue desarrollado en la Universidad de Waseda, en Tokio, Japón en 1972 y fue llamado WL-5 [2].

Aunque los primeros robots bípedos, fueron máquinas muy simples basadas en un control estático, los desarrollos posteriores presentan controladores sofisticados, robots ligeros y con mayores habilidades. Estos nuevos desarrollos en robots humanoides, han generado tres campos de investigación especializados, estos son: generación del caminado, control de la estabilidad y el diseño del robot.

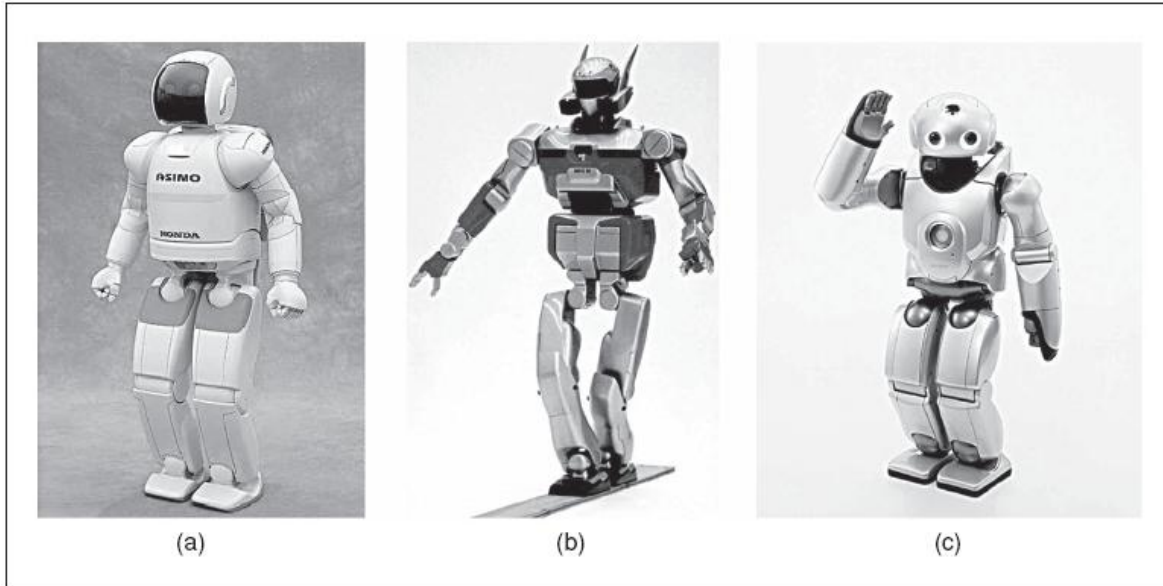


Figura 5. a) ASIMO, fabricado por American Honda Motors, 2007, b) HRP-2, fabricado por Kawada Industries, 2002, c) QRIO, fabricado por Sony Entertainment Robot Europe, 2004.

En la fig. 5 se muestra ASIMO (2007) el cual es capaz de subir y bajar escaleras, caminar, puede reconocer y tomar objetos, e incluso reconocer las caras de las personas. Las tres compañías mencionadas en la fig.1.5 son las que marcan el desarrollo de robots humanoides de tipo comerciales.



Figura 6. BLEEX, "exoesqueleto", fabricado por Kazerooni

Los sistemas de movilidad bípeda han generado una nueva rama de investigación, los “exoesqueletos”, su objetivo es aumentar el rendimiento de las personas, incrementando su fuerza, velocidad y resistencia. En la fig.6 se observa el desarrollo del exoesqueleto que sirve para aumentar el tiempo que pueden correr los soldados y el equipo que pueden llevar [4].

Robot móvil

El término de robot móvil se refiere a un sistema robótico que puede desplazarse a diferentes lugares y consiste básicamente en una plataforma ensamblada a un dispositivo que tiene autonomía para desplazarse con sus propios componentes.

La elección del sistema de desplazamiento autónomo depende del ambiente en el cual el robot operará. Puede ser aéreo, terrestre o acuático.

En ambientes aéreos o acuáticos, los sistemas de movilidad son con propelas, tornillos sinfín ó aletas. La elección del sistema de movilidad en tierra es más complejo por la diversidad de terrenos; entre los sistemas más utilizados son orugas, patas ó llantas. En la fig.7 se ven tres tipos de ambientes de los robots móviles [2].

De los diferentes tipos de robots móviles, el presente trabajo se estudiará el robot móvil con ruedas.

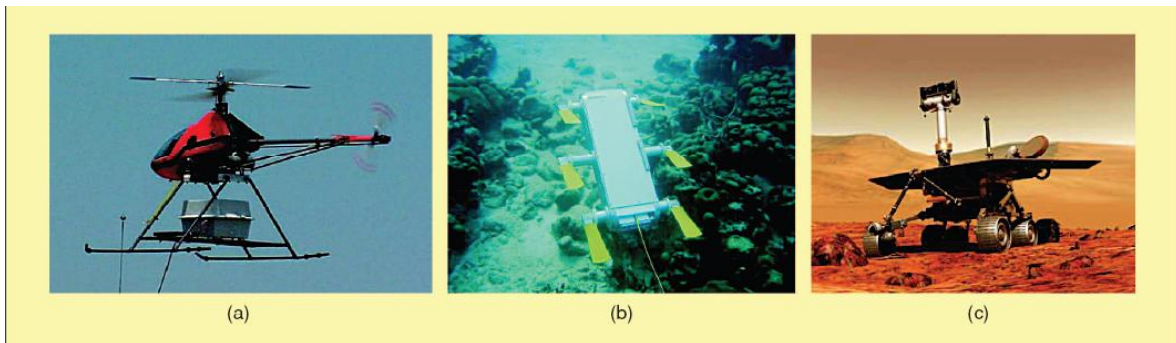


Figura 7. a) Vampira, b) Aqua, c) Robot de exploración en Marte

Robots móviles comerciales

Dentro de lo que son los robots comerciales, se puede destacar a la marca Adept Mobile Robots. Esta compañía desarrolla y fabrica robots móviles desde 1995, sus robots son diseñados para desplazarse en diferentes tipos de ambientes como son aéreos, acuáticos y terrestres.

Entre los desarrollos con los que cuenta son:

Aqua2.- Un robot móvil anfibia (fig. 8), tiene dos formas de operación teleoperado y operación automática. Las baterías ofrecen una autonomía de 5 horas. Comunicación vía Ethernet, cámaras con conectividad usb y cuenta para su movilidad 6 servomotores. [22]

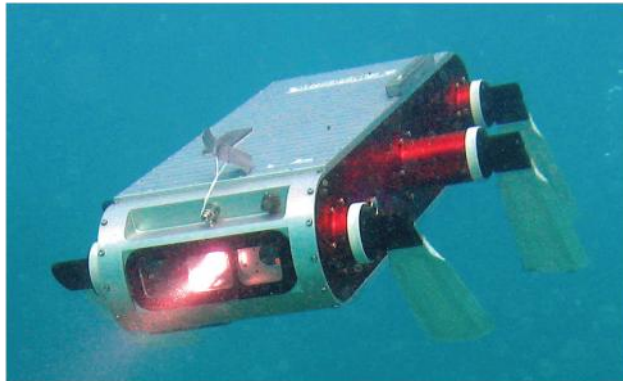


Figura 8. Robot móvil Aqua, Adept Mobile Robots 2012.

Maveric.- Es un aeroplano construido en fibra de carbono y operado con radio control (fig. 9). En esta plataforma se pueden montar las cámaras, dispositivos de comunicación o sensores atmosféricos. [23]



Figura 9. Robot móvil Maveric, Adept Mobile Robots 2012.

Seekur.- Robot móvil con ruedas (fig. 10), que puede moverse en diferentes tipos de superficies y climas. Cuenta con cuatro ruedas independientes, lo cual le permite ser una plataforma omnidireccional. Está equipado con una batería que proporciona 100 Amper-hora y puede tener una duración hasta de 3 horas. Cuenta con dos laser rangefinders, 3 cámaras tipo estéreo [24]. Las dimensiones generales del robot son 1.2 metros de ancho por 1.3 metros de largo y 0.9 metros de alto y las ruedas de tracción de 0.4 metros de diámetro.

Dentro de los accesorios que pueden ser instalados en este robot es un brazo manipulador.



Figura 10. Robot móvil Seekur, Adept Mobile Robots 2012.

Seekur jr.- Es un robot móvil de cuatro ruedas actuadas, para todo terreno y clima (fig. 11). Puede fácilmente llevar cargas. Es equipado con diferentes tipos de sensores (laser rangefinders, estero cámara, micrófono-bocinas, GPS, etc.), a demás se puede instalar un brazo manipulador [25].

El peso aproximado del robot es de 77 kg, la carga máxima que puede transportar es de 40 kg. Cuenta con tres baterías de 10 Ah cada una, el tiempo de duración de la carga es de 3 horas. Las dimensiones generales del robot son 0.8 metros de ancho, 1.1 metros de largo y 0.49 metros de alto y las ruedas de 0.4 metros de diámetro.



Figura 11. Robot móvil Seekur Jr, Adept Mobile Robots 2012.

Pioneer 3-AT.- Es un robot de cuatro ruedas actuadas de los robots con cuatro ruedas es el más pequeño de la marca Adept. Este robot se puede utilizar tanto ambientes interiores como para exteriores [26].

Entre algunas de sus características son, tiene una altura máxima de 277 mm, un ancho de 497 mm, un largo de 508 mm y su peso es de 12 kg. La capacidad de

la batería es de 7.5 Ah, lo que le da dos horas de autonomía de movimiento. En la fig. 12 se muestra el robot móvil Pioneer 3-AT.



Figura 12. Robot móvil Pioneer 3-AT, Adept Mobile Robots 2012.

Pioneer 3-DX.- Es un robot con tres ruedas, dos de las cuales son actuadas y la tercera es una rueda orientable descentrada (rueda loca). Este robot es adecuado para utilizarlo en interiores. En la fig.13 se pueden observar el robot y los sensores ultrasónicos que tiene colocado al frente del mismo [27].

Entre las características de este robot móvil son, una altura de 237 mm, un ancho de 381 mm y un largo de 455 mm. Está equipado con una batería de 7.2 Ah suministrando 12 v y ofrece una autonomía de movimiento de 2 horas.



Figura 13. Robot móvil Pioneer 3-DX, Adept Mobile Robots 2012.

Adept movil cuenta con diferentes desarrollos de robot móviles de acuerdo a las necesidades del usuario entre más robusto es el robot móvil el costo aumenta, dentro de sus desarrollos no cuenta con un robot que sea reconfigurable.

La compañía Festo que es reconocida por su línea de productos neumáticos están incursionando en el desarrollo del la robótica móvil con su robot didáctico Robotino que se muestra en la fig. 14.

Robotino es un robot móvil del tipo omnidireccional, está equipado con tres motores, cámara de video, comunicación inalámbrica. Tiene un diámetro de 370 mm, una altura de 210 mm y un peso de 11 kg. Además cuenta con 10 entradas analógicas, 8 entradas y salidas digitales para futuras expansiones.



Figura 14. Robot móvil Robotino, FESTO 2012.

Un robot que es utilizado para pruebas de algoritmos generadores de trayectorias es el Khepera II que se muestra en la fig. 15. Se puede considerar como un mini robot ya que sus dimensiones generales son 70 mm de diámetro, 80 mm de alto y un peso 80 gr. Su autonomía de movimiento es de 1 hora.



Figura 15. Robot móvil Khepera, 2012.

De los robots móviles comerciales se puede destacar que la autonomía de movimiento puede ser desde dos horas hasta una hora. La mayoría de los modelos se les puede adaptar algún tipo de sensor. Otros modelos tienen accesorios complejos como lo es un brazo robótico. En el desarrollo de un robot móvil se debe tomar en cuenta estas características.

Robots móviles con ruedas desarrollados en centros de estudios

Los institutos de investigación y las universidades realizan diseños de robots propios donde se buscan características especiales. Algunas características que se buscan son economizar el costo comparado con un robot comercial, flexibilidad de cambio de los componentes utilizados y desarrollar suspensiones para mantener estable el robot móvil así como la optimización de recursos.

Víctor Juárez de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí fue el desarrollador de un robot móvil de tipo unicycle como se muestra en la fig. 16. Este robot móvil tiene el objetivo de servir como plataforma de pruebas para el desarrollo e investigación de algoritmos. El diseño parte de componentes comerciales de fácil adquisición. Las dimensiones generales del robot móvil son las siguientes; 300 mm de altura, 470 mm de ancho y 500 mm de altura. Utiliza una tarjeta de control de movimiento marca Galil, la cual controla los dos servomotores del robot.



Figura 16. Robot móvil tipo unicycle. (Víctor Juárez [9])

El robot móvil de tipo unicycle diseñado por David Nelson [11] que se muestran en la fig.17. Cuenta con un microcontrolador MC9S12 de 16 bits; posee sensores de luz infrarroja, ultrasonido, iluminación y encoders; además, cuenta con puertos libres para futuras expansiones y un sistema de comunicación inalámbrica. Las dimensiones generales del robot son: una altura de 200 mm y un diámetro de 300 mm, con una autonomía de movimiento de 10 horas aproximadamente.

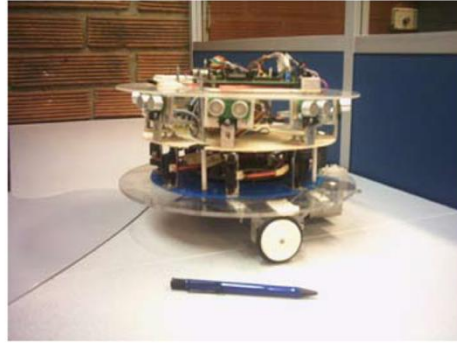


Figura 17. Robot móvil tipo unicycle David Nelson [11].

El robot móvil N10 [30], que se muestra en la fig. 18 tiene como una de sus principales características la posibilidad de que el usuario reconfigure toda su morfología física para adaptarlo a diferentes entornos y experimentos. Su tamaño es 130 mm de ancho, 130 mm de largo y 90 mm de alto. El N10 está equipado normalmente con celdas de Li-Ion de 900 mAh. Una celda puede hacerlo funcionar de forma continua entre 3 y 5 horas.

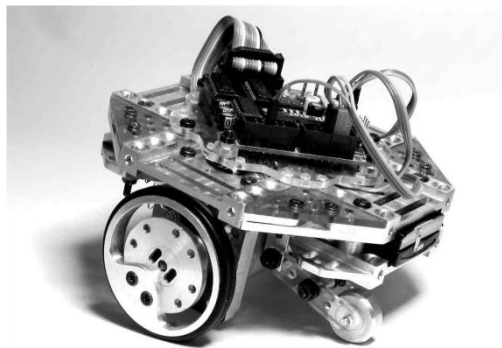


Figura 18. Robot móvil N10 [30].

El robot móvil que se muestra en la fig. 19. fue diseñado por Jorge Pérez [31]. Se compone de tracción diferencial. Cuenta con una plataforma Arduino y como sistema de visión se ha montado un iPod para la transmisión inalámbrica de video.



Figura 19. Robot móvil con iPod para transmisión de imágenes [31].

El robot todo terreno RTT [32] que se muestra en la fig. 20. Cuenta con un sistema mecánico con diseño de suspensión tipo Rocker Boggie (seis motores para la tracción del vehículo y cuatro servomotores para la dirección ubicados en las ruedas traseras y delanteras), un sistema de potencia alimentado por dos baterías, un sistema de comunicación y control de movimiento (red de microcontroladores PIC (serie 18) y el software de teleoperación desarrollado en LabView. Este robot fue diseñado para actividades relacionadas con la horticultura, como pueden ser la inspección de plantas, transporte de frutos por mencionar algunas.



Figura 20. Robot móvil todo terreno RTT [32].

Suspensión de un robot móvil

El diseño y fabricación de un robot móvil requiere de un mecanismo de suspensión seleccionado y planteado expresamente para su misión, cuyo objeto sea proveer una plataforma móvil para la carga útil de sistemas e instrumentos de control en diversos terrenos.

Ciertos aparatos, del tipo robot, son dotados de un sistema de suspensión móvil (SSM) para diversificar sus capacidades y su aplicación, que van desde el esparcimiento hasta la industria bélica, pasando por todos los campos del que hacer humano y que dictan las características del SSM. Los más utilizados son los basados en ruedas (SSMBR) debido a su sencillez.

Un SSMBR puede ser pasivo o activo [33]. El sistema pasivo se adapta al terreno mediante las fuerzas de contacto aplicadas sin necesidad de motores para modificar su forma. El sistema activo muestra un desempeño sobresaliente pero requiere un control menos sencillo, es más susceptible a fallas y consume más energía que el sistema pasivo. Un SSMBR se compone de ruedas, elementos de propulsión, dirección y transmisión de movimiento, chasis y plataforma para la carga útil [34]. Las funciones básicas del SSMBR son superar obstáculos del terreno y reducir fuerzas causadas por estos durante el avance, mantenimiento de la altura apropiada sobre el terreno y soporte de la carga útil [35].

Los requerimientos del SSM de Víctor Medina son proveer una plataforma móvil de pruebas con baja probabilidad de falla para recorrer terreno no necesariamente estructurado, los requerimientos son: capacidad para superar obstáculos hasta $\frac{3}{4}$ veces el diámetro de sus ruedas y que se traduce en una pendiente de 30° , que las irregularidades del terreno afecten al mínimo la estabilidad de la plataforma, simplicidad cinemática, sencillez del mecanismo y adaptación pasiva al terreno.

Víctor Medina [10], diseñó la suspensión pasiva *CIEP_1* es mostrada en la fig. 21. Este diseño corresponde a un SSMBR cuyo objeto es proveer una plataforma móvil para la carga útil de sistemas e instrumentos de control en diversos terrenos, para mejorar la estabilidad y planeación de trayectorias esquivando obstáculos

Este trabajo utilizará la suspensión *CIEP_1*, para construir un robot móvil basado en ruedas.

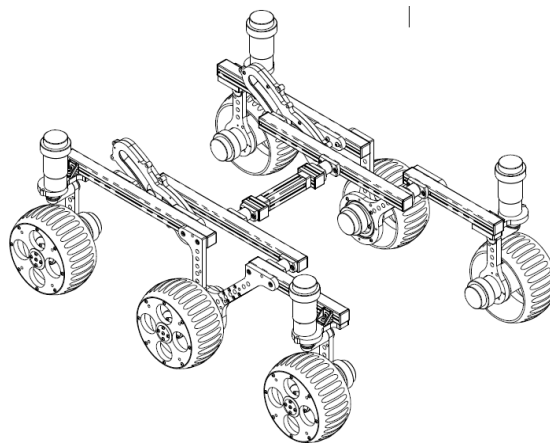


Figura 21. Suspensión *CIEP_1*, diseñada por Víctor Medina [10].

Motivación

Para llevar a cabo estudios con robots móviles se requiere una gran inversión económica debido al costo que representa comprar un prototipo de robot comercial. Por lo que diseñar un robot móvil con diferentes módulos que permitan tener diferentes configuraciones a inversiones menores es de gran interés, además de que esto contribuye para el equipamiento de los laboratorios de la UASLP, como también para el desarrollo de nuevos algoritmos de control, tanto a nivel educativo como de investigación

Con este trabajo de tesis se busca desarrollar un robot móvil modular. Este robot debe contar autonomía de movimiento y ser debe construir a partir de una suspensión cinemática existente. La suspensión cinemática fue diseñada con la capacidad de moverse en cualquier tipo de entorno estructurado, semi-estructurado y no estructurado.

El diseño y construcción de la suspensión cinemática CIEP_1 es producto del trabajo realizado por Víctor Medina [10]. Esta suspensión corresponde a la primera etapa para realizar un robot móvil con ruedas y suspensión para equipar al Centro de Investigación de Estudios de Posgrado de la UASLP de equipo para el desarrollo de algoritmos con objeto de investigación y enseñanza.

En la segunda etapa se plantea como objetivo convertir la suspensión cinemática en un robot móvil. Esto se realizara instalando un módulo de control e integrando el hardware y software necesario para suministrar autonomía de movimiento al robot móvil, al mismo tiempo que se tiene comunicación con una computadora remota. En lo que se refiere al software, éste deberá permitir implementar fácilmente diferentes módulos de trayectorias y lograr comunicación del usuario con la tarjeta de control de movimiento y con los demás periféricos del robot, utilizando lenguaje C++ para su codificación. El módulo de control debe permitir flexibilidad para que en las siguientes etapas se puedan conectar diferentes sensores.

Por mencionar algunos objetivos a cubrir en las etapas posteriores se menciona que se requiere aún realizar un control por medio de visión, implementar una integración multisensorial e incorporar la integración de un brazo manipulador al robot móvil.

Este proyecto de tesis se enfocará únicamente en implementar la segunda etapa descrita para el desarrollo del robot móvil CIEP_1.

Objetivo del presente trabajo de tesis

Integrar una plataforma móvil y un control computacional capaz de permitir la implementación y prueba de algoritmos generadores de trayectorias, esta plataforma se basa en la suspensión cinemática desarrollada anteriormente en otro trabajo [10], ello con el objetivo de obtener un prototipo de un robot móvil autónomo construido en el CIEP de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Objetivos específicos

- Integrar el hardware de control en la suspensión del CIEP_1, para lograr autonomía de movimiento y flexibilidad de programación de las diferentes configuraciones mecánicas que permite la suspensión.
- Realizar un algoritmo generador de trayectorias, para el robot móvil CIEP_1.
- Realizar pruebas experimentales, para validar el hardware de control y los algoritmos de trayectorias.

Organización de la tesis

Este trabajo se organizó de la siguiente forma: en el capítulo I se presenta una revisión de la suspensión cinemática CIEP_1, se mencionan tipos de configuraciones para robot móviles; en el capítulo II se describe los componentes del módulo de control y cómo se llevó a cabo la programación del robot móvil; en el capítulo III se propone un perfil de velocidades y algoritmos generadores de trayectorias por medio de funciones independientes en el tiempo. Algoritmos basados en funciones polinomiales y en funciones splines cúbicas; en el capítulo IV se realizan pruebas experimentales con el robot móvil y se analizan los resultados. Al final del documento se presentan las conclusiones finales del trabajo y las recomendaciones para las siguientes etapas del desarrollo del robot móvil CIEP_1.

I. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se presentará algunos robots móviles autónomos y algunas de las aplicaciones que se han desarrollado y se hablará acerca de las características de la suspensión cinemática CIEP_1.

El desarrollo de los robots móviles responde a la necesidad de tener un mayor incremento en el alcance de los robots. En un inicio los robots eran sólo del tipo industriales sujetos a una base fija. Con la aparición de los robots móviles se trata de incrementar la autonomía evitando en lo posible la necesidad de intervención humana.

La autonomía de un robot móvil se basa en su sistema de navegación automática, se trata que el robot tenga la suficiente “inteligencia” como para reaccionar y tomar decisiones basándose en observaciones de su entorno, sin suponer que este entorno sea perfectamente conocido o estructurado. En estos sistemas se incluyen tareas de planificación, percepción y control.

En los robots móviles, el problema de la planificación o percepción, en el caso más general, puede descomponerse en planificación global de la misión, de la ruta, de la trayectoria y finalmente evitar obstáculos no esperados.

En 2007 DARPA, (Defense Advanced Research Projects Agency) realizó un concurso llamado “Darpa urban challenge” [5]. El cual consistía en tener un vehículo autónomo. Este vehículo debe tener habilidades para poderse manejar en el tráfico, poder ubicarse, poder estacionarse, reconocer obstáculos, tener el conocimiento para manejarse como lo realizaría un conductor humano experimentado. Este concurso ofreció dos millones de dólares al equipo ganador que fue el equipo “CMU’s Tartan Racing” (Carnegie Mellon University) [6]. En la fig. 1.1 se observa el vehículo ganador.



Figura 1.1. Vehículo del equipo CMU’s Tartan Racing, una camioneta Tahoe fabricada por General Motors.

La NASA (National Aeronautics and Space Administration) [7] envió dos robots móviles a Marte, el 10 de junio del 2003 y el 7 de julio del 2003, los cuales

aterrizaron en Marte el 3 de enero del 2004 y el 24 de enero del 2004. El principal de los objetivos científicos de la misión era buscar y caracterizar una amplia gama de rocas y suelos para evidenciar la existencia de agua en Marte. Los robots móviles se dirigieron a dos lados opuestos de Marte que parecen haber sido afectados por el agua líquida en el pasado. Los sitios de aterrizaje se encuentran en el Cráter Gusev y Meridiani Planum, donde los depósitos minerales (hematita) sugieren que Marte tuvo un pasado húmedo.

El equipo con el que cuenta el robot móvil es: una cámara panorámica, mini espectrómetro de emisión termal (Mini-TES), espectrómetro Mössbauer (MB), espectrómetro de rayos-X de partículas alpha (APXS), magnetos, cámara microscópica (MI), herramienta de abrasión de roca(RAT).

En noviembre del 2011 la NASA envió a Marte otro robot móvil con un mini laboratorio incluido en el robot, en la fig. 1.2 se observa la imagen del robot móvil [8].

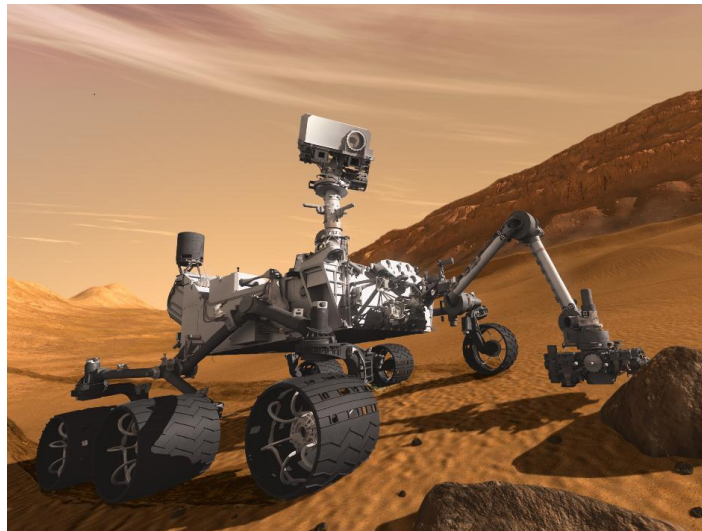


Figura 1.2. Vehículo de la exploración de Marte 2011

1.1. Antecedentes

Para que un robot móvil sea capaz de describir su entorno, posición y orientación dentro de un sistema de coordenadas mundial, el robot debe tener una retroalimentación de diferentes tipos de sensores (cámaras, ultrasonido, laser, GPS, etc.). La información adquirida de los sensores se pueda analizar en una computadora independiente del robot móvil se deberá contar con una comunicación inalámbrica. Un robot que sea capaz de recolectar muestras de un lugar o realizar un actividad específica (pintar, taladrar, escavar, cortar, etc.), debe

contar con un brazo manipulador o un efector que realice una actividad específica. Un robot móvil autónomo con las características anteriores podría ser utilizado en actividades como: recolección de muestras en lugares de difícil acceso, búsqueda de sobrevivientes en catástrofes, realizar mapeos de diferentes entornos, auxiliar en laboratorios transportando sustancias peligrosas.

En el Centro de Investigación de Estudios de Posgrado de la UASLP se inició un proyecto para construir un robot móvil con ruedas. Para el desarrollo de este robot móvil con las características antes mencionadas se establecieron varias etapas. En la primera etapa se diseñó y se construyó una suspensión cinemática, con la capacidad de desplazarse en cualquier tipo de entorno. Esta etapa fue realizada por Víctor Medina [10], construyendo la suspensión cinemática CIEP_1.

Este trabajo de tesis corresponde a la segunda etapa donde se integrara el hardware de control a la suspensión, por lo cual se revisara trabajos relacionados con diseño y construcción, algoritmos generadores de trayectorias.

Algunos trabajos que hablan sobre diseño de robot móviles son los siguientes:

En la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se desarrolló un robot móvil de tipo unicycle por Víctor Juárez [9], el cual contribuye al equipamiento del Laboratorio de Mecatrónica en la Facultad de Ingeniería de la institución.

Nelson Muñoz y Carlos Andarte diseñaron y construyeron un robot móvil de forma circular y con dimensiones de un círculo de 30 cm de diámetro y una altura de 20 cm, al cual se le agregó un hardware de control y sensores ultrasónicos e infrarrojos alrededor del robot. Para su locomoción cuenta con dos ruedas de tracción y una rueda loca de apoyo, en este trabajo no se reporta se midió la precisión del movimiento del robot móvil [11].

F. Reyes, J. Cid, J. Méndez, G Villegas, F. Porras, A Lara, realizan el diseño de un robot móvil tipo unicycle de forma circular con diámetro de 30 cm y una altura de 40 cm. Este robot tiene como "cerebro" un DSP, y los sensores periféricos son dos cámaras, un sensor ultrasónico y un sensor infrarrojo [20].

En los trabajos que se refieren a posicionamiento y trayectorias con robots móviles se pueden mencionar los siguientes:

Cárdenas, en su trabajo utiliza una plataforma de pruebas habilitada para llevar dos cámaras abordo y un brazo manipulador de dos grados de libertad. Utilizando un filtro de Kalman extendido logra posicionar el indicador del brazo robótico a 3mm del objetivo final después de seguir una trayectoria preestablecida [13].

Heriberto Casarrubias, realiza una generación de trayectorias con funciones basadas en splines cúbicos y técnicas de aprendizaje autónomo. El robot utilizado es el robot comercial Khepera II. Utiliza las ecuaciones cinemáticas del robot

móvil, en su trabajo reporta solo la ejecución de las trayectorias sin medir la precisión con la que es ejecutada [17].

Aracely Yadun, realiza una generación de trayectorias por medio de un diagrama de Voroni. En este diagrama de Voroni es utilizado para generar puntos de la trayectoria con los cuales se pueden esquivar obstáculos. El robot utilizado es Robotino® desarrollado por FESTO®. Al medir la precisión de punto a punto reporta un error en la posición del 1 % hasta el 7% [18].

Miguel Fernández Lancha, David Fernández Sanz y Carlos Valmaseda Plasencia, basan su trabajo en un robot móvil tipo tanque equipado con dos cámaras para desarrollar una plataforma virtual en 3D para realizar simulaciones de evasión de obstáculos. Realizan pruebas físicas con el robot tipo tanque para comparar los resultados de la plataforma virtual. En este trabajo no se reportan errores en la precisión de los movimientos del robot móvil [19].

Ignacio Fernández, en su trabajo de tesis doctoral realiza el posicionamiento de un robot móvil llamado Robot Peoplebot y cuatro cámaras para la retroalimentación situadas alrededor del cuarto de pruebas. Como algoritmo principal utiliza un filtro de Kalman. Reporta errores sin retroalimentación hasta 100 mm y con retroalimentación de 7 mm en posición y de 2° en orientación [21].

De trabajos que se refieran a estudios sobre los efectos dinámicos en los robots móviles se puede destacar los siguientes:

Jingang Yi, Hongpeg Wang y Dezhen Song, usan un robot móvil en una configuración tipo "patín rígido", donde se tiene cuatro ruedas de tracción y ninguna de ella puede girar para orientarse. Realiza la medición de la inercia con la cual pueden ubicar el centro de rotación instantáneo y una vez ubicado, se relaciona el centro de rotación y la inercia con el deslizamiento del robot móvil en diferentes superficies lisas [14].

Ríos G, Luis Hernando y Bueno Maximiliano, realizan el modelo matemático para un robot tipo unicycle. Las características de este robot es que el centro de gravedad pasa por el eje de rotación de las ruedas de tracción. En el modelo descrito incluyen las ecuaciones cinemáticas, ecuaciones dinámicas de los motores de corriente directa, ecuaciones para relacionar los encoders de los motores, este modelo es validado por simulación computacional [15].

Luis Gracia en su tesis doctoral, analiza un robot móvil tipo unicycle, fijando su estudio en las diferentes tipos de combinaciones y tipos de ruedas que puede utilizar, generando un modelo matemático para los diferentes tipos de ruedas. Además de estudiar algunas variables que intervienen en la dinámica del robot móvil [16].

1.2. Diferentes tipos de dirección en los robots móviles con ruedas.

Dentro del desarrollo de la robótica móvil podemos encontrar diferentes configuraciones de las ruedas para poder orientar y posicionar al robot móvil. Dentro de esta sección se definirán algunas de las que se mencionan para presente trabajo.

1.2.1. Dirección tipo diferencial

El direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales. La tracción se consigue también con estas mismas ruedas. Adicionalmente, existe una o más ruedas para soporte. En la figura 1.3 se observa el sistema de locomoción para una plataforma, este sistema emplea cuatro ruedas no actuadas ni orientadas para soporte y las ruedas centrales son actuadas y encargadas del movimiento.

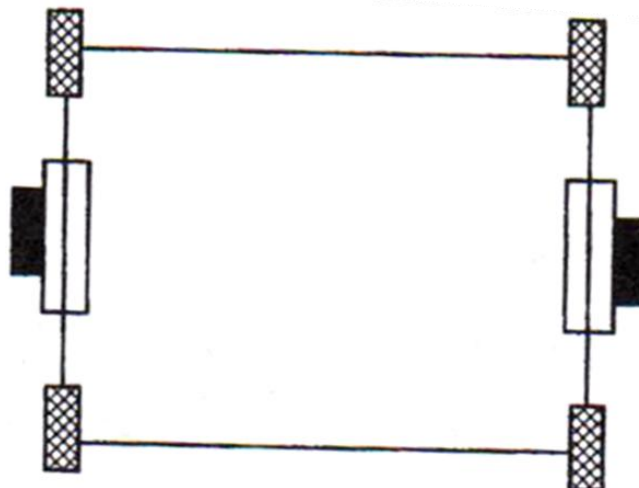


Figura 1.3 Locomoción con direccionamiento diferencial en dos ruedas laterales.

1.2.1.1. Dirección tipo unicycle

Este sistema se muestra en la fig. 1.4, la rueda delantera solo sirve de soporte y es del tipo "loca" (rueda orientable descentrada o castor), las ruedas traseras sirven para la tracción y el direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas de tracción. A esta configuración se le denomina tipo unicycle.

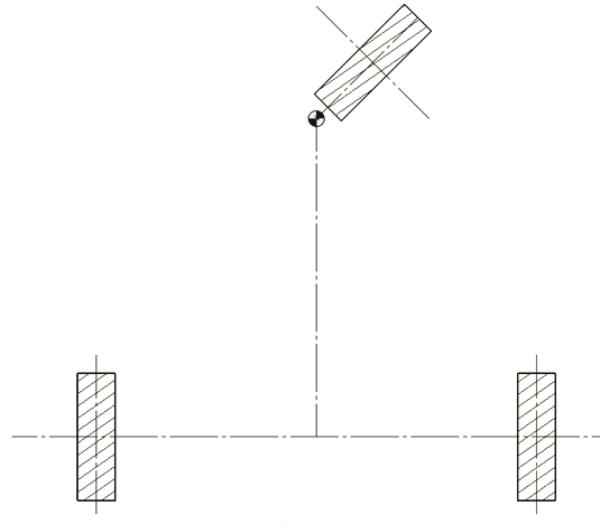
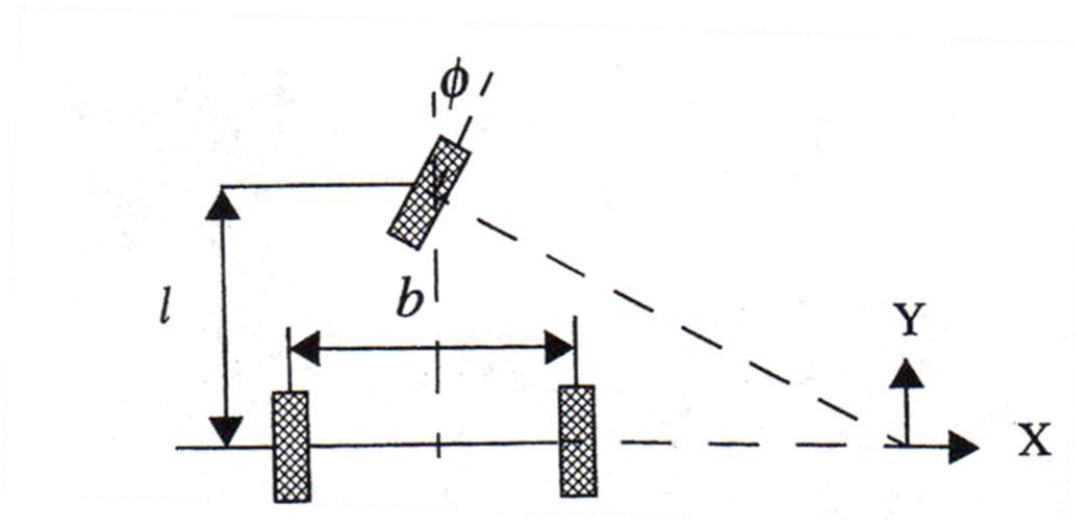


Figura 1.4 Locomoción tipo unicyclo, con dos ruedas de tracción y una rueda loca no actuada de soporte.

1.2.2. Dirección tipo triciclo

Este sistema de locomoción se ilustra en la fig. 1.5 la rueda delantera sirve para la tracción y el direccionamiento del robot. El eje trasero, con dos ruedas laterales es pasivo y las ruedas se mueven libremente. La maniobrabilidad es mayor que en la dirección tipo Ackerman pero puede presentar problemas de estabilidad en terrenos difíciles. El centro de gravedad tiende a desplazarse cuando el vehículo se desplaza por una pendiente, causando la pérdida de tracción.



1.5 Locomoción tipo triciclo

Figura

1.2.3. Dirección tipo Ackerman

Es el utilizado en vehículos de cuatro ruedas convencionales. De hecho, los vehículos robóticos para exteriores resulta normalmente de la modificación de vehículos convencionales tales como automóviles o incluso vehículos más pesados. Este sistema de locomoción se ilustra en la fig. 1.6 la rueda delantera interior gira en un ángulo ligeramente superior a la exterior ($\theta_1 > \theta_0$) para eliminar deslizamientos. Las prolongaciones de los ejes de las dos ruedas delanteras intersectan en un punto sobre la prolongación del eje de las ruedas traseras. El lugar de los puntos trazados sobre el suelo por los centros de los neumáticos son circunferencias concéntricas con centro de rotación P_1 según la fig. 1.16. Si no se tienen en cuenta las fuerzas centrífugas, los vectores de velocidad instantánea son tangentes a las curvas.

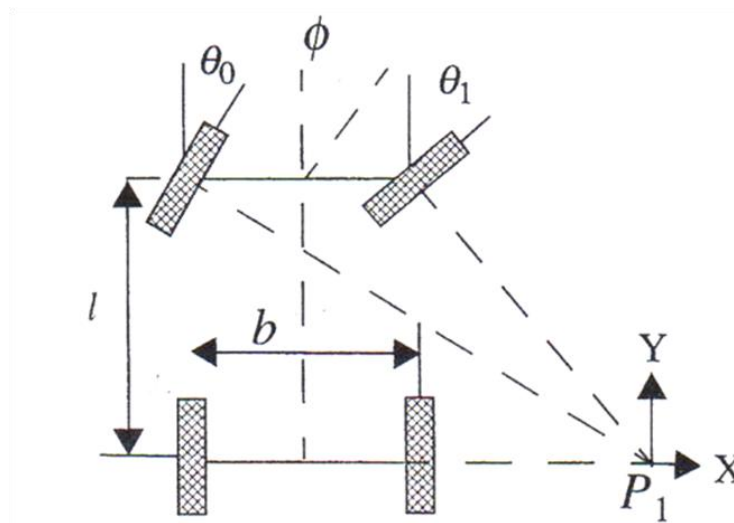


Figura 1.6 Sistema tipo Ackerman

1.3. Diseño de la suspensión cinemática CIEP_1

En el Centro de Investigación de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se está desarrollando el robot móvil CIEP_1. Es un robot móvil que permite realizar diferentes tipos de pruebas en diferentes entornos (estructurado, semi-estructurado y no estructurado) a demás de poder ser flexible en sus configuraciones mecánicas.

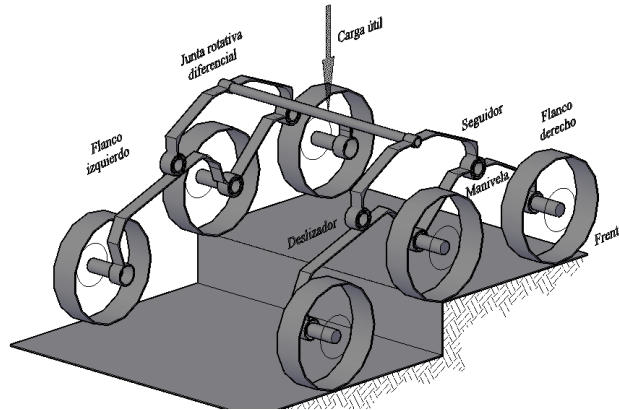


Figura 1.7. Esquematización tridimensional de la suspensión cinemática CIEP_1 que ilustra los flancos de la suspensión pasiva unidos por el eje diferencial sobre un terreno longitudinalmente simétrico

La principal cualidad del robot CIEP_1 es la suspensión diseñada por Víctor Medina [10]. La cual se basa en un mecanismo pasivo; usando tres ruedas por flanco y sólo tres eslabones: *bogie* frontal (manivela), plataforma de carga útil (eslabón acoplador) y *bogie* trasero (corredera) fig.1.7. El eje diferencial está fijo sobre uno de los flancos y es unido mediante una junta de revolución al otro, de modo que sobre él puede apoyarse el peso de la carga útil.

La suspensión CIEP_1 puede tener tres configuraciones dependiendo de los módulos que se conecten. En su configuración principal fig. 1.8 se busca poder recorrer entornos no estructurados con su suspensión pasiva. Esta configuración puede tener un máximo de 10 de grados de libertad seis ruedas de tracción y cuatro de dirección, y un mínimo de 6 grados de libertad, dos ruedas de tracción y cuatro de dirección.

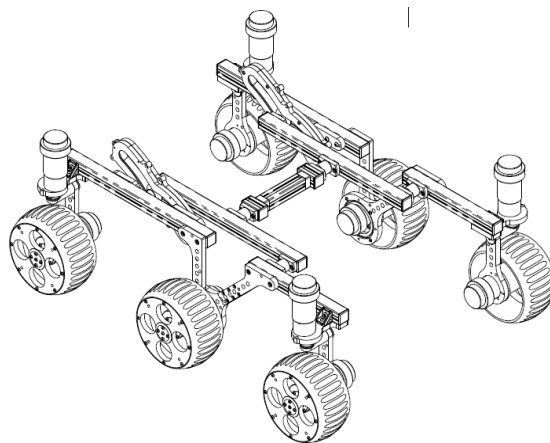


Figura 1.8. Configuración de la suspensión cinemática CIEP_1 6x6x4, 6x4x4, 6x2x4

En la fig.1.9 se muestra la segunda configuración con 8 grados de libertad, con cuatro ruedas de tracción y cuatro de dirección.

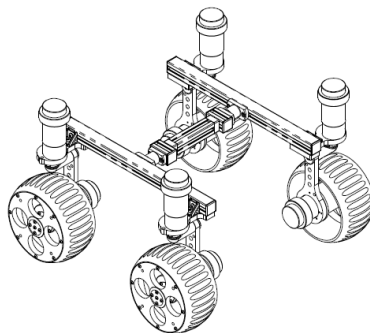


Figura 1.9. Configuración de la suspensión cinemática CIEP_1 4x4x4

En la fig. 1.10 se muestra la configuración básica en donde se tienen 6 grados de libertad máximo con cuatro ruedas de tracción y dos de dirección y un mínimo de 4 grados de libertad teniendo dos de tracción y dos de dirección.

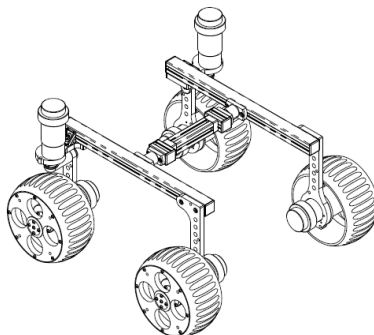


Fig. 1.10 Configuración de la suspensión cinemática CIEP_1 4x4x2, 4x2x2, 4x2

En este trabajo se realizará la segunda etapa del desarrollo del CIEP_1. El cual consta de la integración mecánica con el control electrónico, para lograr una autonomía de movimiento, flexibilidad para mantenimiento y la capacidad de poder interconectar los módulos para las diversas configuraciones mecánicas que permitan un mayor número de grados de libertad del robot móvil CIEP_1.

Parte del trabajo de integración es la “puesta a punto” del sistema mecánico con el sistema electrónico, algunas tareas que se deben realizar para completarlo son:

- Diseñar un módulo de control, donde se albergarán los componentes eléctricos y electrónicos. Este módulo debe brindar flexibilidad para conectar los diferentes módulos mecánicos.
- Habilitar el robot móvil con autonomía de movimiento, esto significa que no debe estar conectado a ninguna fuente de poder fija.

- Contar con comunicación inalámbrica, para evitar la necesidad de llevar una PC portátil sobre el robot móvil.
- Generar un programa estructurado y modular para crear librerías en lengua C++ que puedan ser reutilizadas en las siguientes etapas.
- Tener opción de crecimiento para que a futuro se pueda implementar diferentes tipos de sensores que permita mejorar la percepción del entorno.

Para validar la segunda etapa de integración del robot móvil CIEP_1 se desarrollará el programa de control basado en las librerías de la tarjeta de control de movimiento. Para realizar pruebas de trayectorias se realizarán algoritmos generadores de trayectorias basados en un polinomio de cuarto orden y splines cúbicos. Al finalizar la trayectoria se deberá posicionar el efector del robot en un lugar deseado con la posición y orientación correcta.

Capítulo II

II. INTEGRACIÓN DE SISTEMA E INTERFAZ HARDWARE-SOFTWARE

En este capítulo, se presentan las características del equipo y la forma en que se realizó la integración del hardware-software en la suspensión cinemática CIEP_1 mostrada en la fig. 2.1.

Al inicio sólo se tenía el chasis de la suspensión cinemática y los motores de la tracción y dirección producto del trabajo de Víctor Medina [10]; de esta base se partió para la integración de los componentes, una característica que se buscó en el sistema fue su flexibilidad y facilidad para ser reconfigurable con los diferentes módulos que se deseen utilizar.

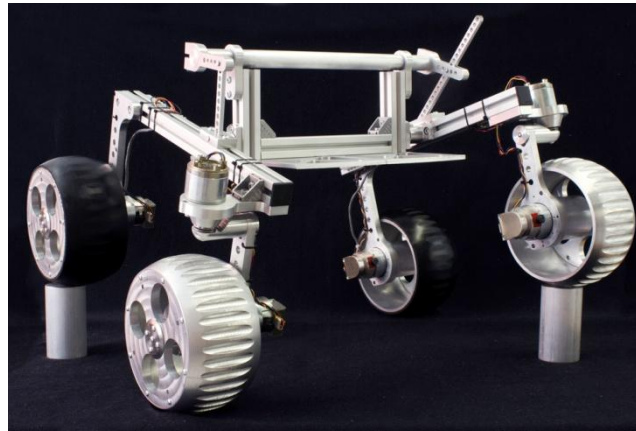


Figura 2.1. CIEP_1, en su configuración básica, sin componentes de control

2.1. Integración de componentes eléctricos y electrónicos del robot móvil

El robot móvil CIEP_1, cuenta con los componentes necesarios para poder tener autonomía de movimiento y comunicación inalámbrica sin tener una computadora a bordo.

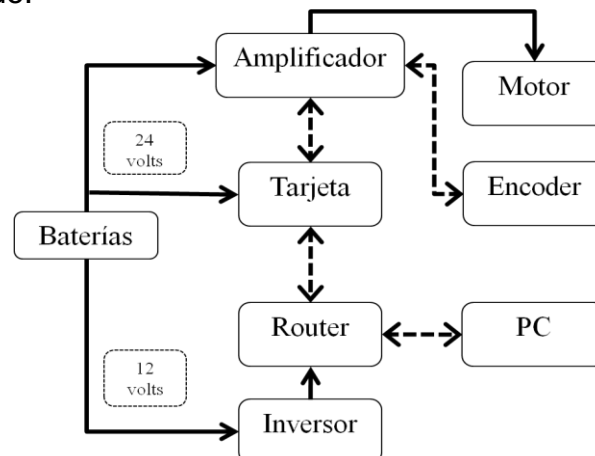


Figura 2.2. Esquema de conexión de equipo

En la fig.2.2 se muestra el esquema de conexión de los componentes principales de la integración. En la fig. 2.2, las líneas punteadas son señales de control, mientras las líneas continuas son la alimentación de potencia.

En la fig. 2.3 se muestran los componentes utilizados en la integración del módulo de control, para posteriormente mencionar características principales de los componentes utilizados.

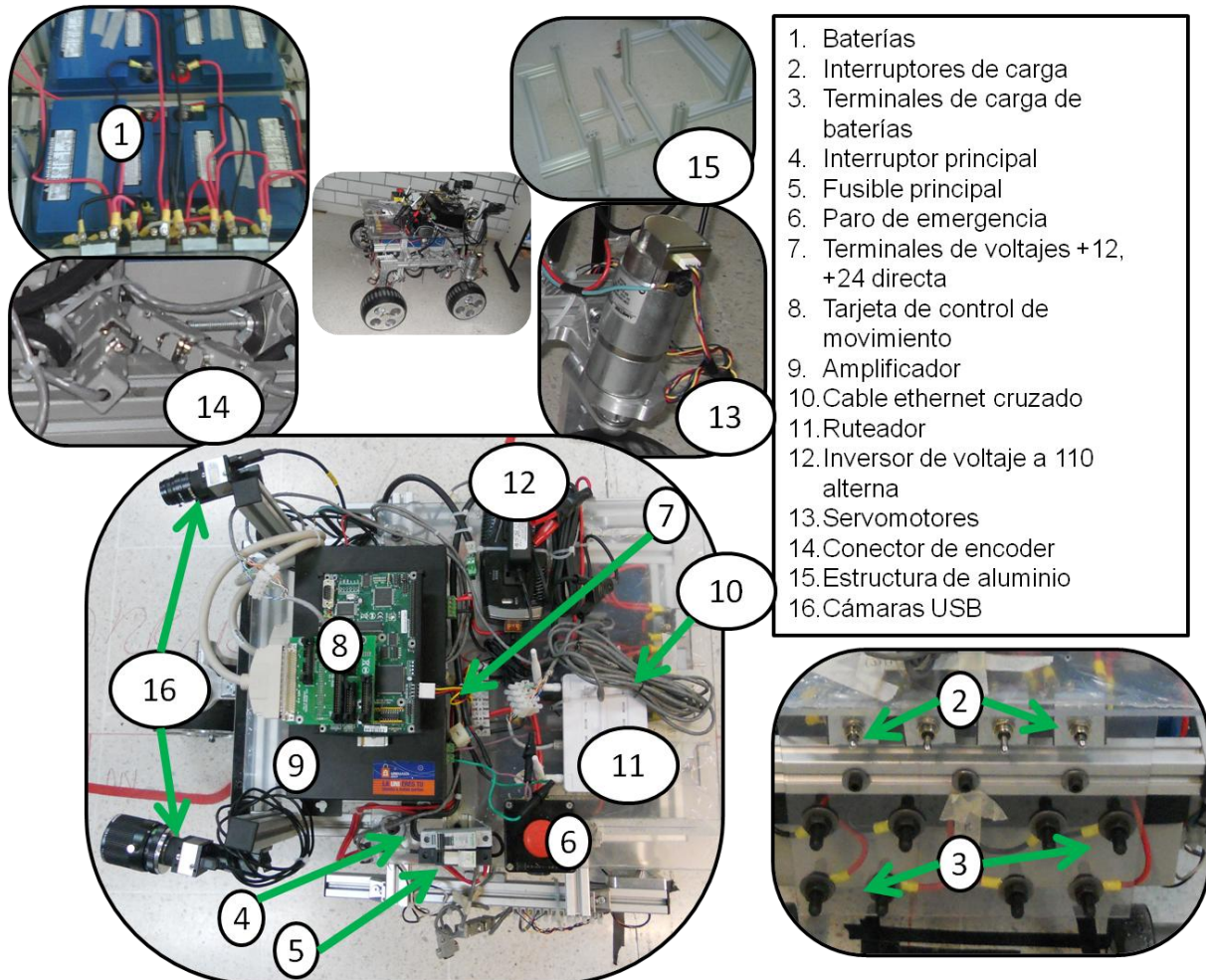


Figura 2.3. Componentes que integran el módulo de control

a) Alimentación de voltaje.

La alimentación de voltaje para el robot móvil, corre a cargo de 4 baterías de 12v, de ciclo profundo. Estas baterías están conectadas en un arreglo para poder obtener 12v y 24v, compartiendo un polo común.

Se utilizaron baterías de ciclo profundo, porque estas baterías tienen la característica principal de que se puede descargar completamente sin afectar su durabilidad.

En la fig. 2.4 se muestra el esquema de conexión para tener las 4 baterías conectadas y tener dos voltajes de salida. Se realizó este arreglo para obtener la alimentación de voltaje de 24v que son utilizados para la tarjeta de control de movimiento y el amplificador, y los 12v son utilizados para el inversor de voltaje. Otra ventaja de este arreglo es que permite mayor tiempo de utilización del robot.

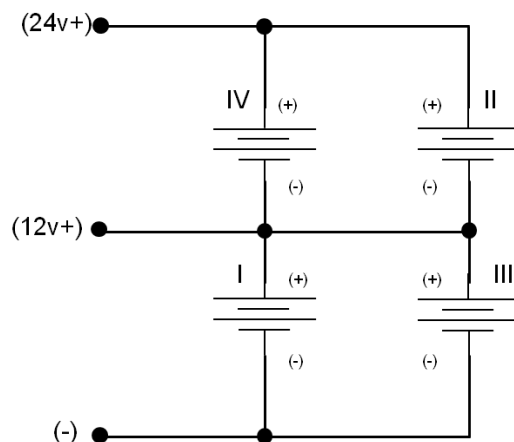


Figura 2.4. Diagrama de conexión de las baterías

Se instalaron cuatro interruptores de “tres tiros dos polos”. Estos interruptores se conectan a los polos de cada batería. Con la finalidad de que en una posición del interruptor cierre un circuito para que las baterías suministren voltaje al sistema y en otra posición puedan ser recargadas las baterías. La conexión de la recarga de las baterías se encuentra en un lugar accesible por el usuario para conectar el cargador.

Se instaló un interruptor principal, que es el encargado de apagar el módulo de control. Después del interruptor se colocó un fusible para la protección a los equipos electrónicos. Antes de la entrada del voltaje al amplificador y a la tarjeta de control de movimiento, se colocó un interruptor de emergencia para detener el movimiento del robot móvil, en cualquier momento. Para generar el voltaje de alimentación del ruteador, se necesita un inversor de voltaje que convierta +12 volts de corriente directa a 110 volts de corriente alterna.

b) Tarjeta de control de movimiento

Es la encargada de procesar el conjunto de comandos que son recibidos desde la computadora y enviar las señales de control correspondientes hacia los motores a través del amplificador.

Para este robot móvil existen dos acciones básicas a realizar por la tarjeta de control: la lectura de la posición de los encoders de cada motor y la generación de una señal de control para los motores.

Características principales de la tarjeta de control

Marca: Galil

Modelo: DCM-2143-DC24

Serie: AH-46226

Voltaje de entrada: 24v

Ejes de control: 4

Configurable para servomotores y motores a pasos

Entradas análogas: 8

Entradas digitales I/O: 40

Comunicación: Ethernet 10BASE-T, (10Mbps)

c) Amplificador

Es el encargado de acondicionar la señal de control proveniente de la tarjeta de control de movimiento, al nivel requerido para accionar los servomotores. El amplificador tiene integrado un modulador de ancho de pulso (P.W.M.), por sus siglas en inglés, el cual puede ser configurado mediante la tarjeta de control de movimiento. Cuenta con un lazo de retroalimentación en corriente y un lazo de retroalimentación en voltaje.

Marca: Galil

Modelo: ICM-1900

Voltaje de alimentación: 24v

Este amplificador cuenta con cuatro salidas para motor también llamadas ejes, la correspondencia de ejes con las parámetros del robot móvil CIEP_1 está en la tabla 2.1.

Rueda	Parámetros	Eje del amplificador
Trasera izquierda	θ_1	X
Trasera derecha	θ_2	Y
Delantera derecha	γ_3	Z
Delantera izquierda	γ_4	W

Tabla 2.1. Correspondencia entre eje del amplificador, parámetro de cálculo y ruedas del robot móvil

Este amplificador es compatible con la tarjeta de control, además de contar con las conexiones de tipo clema para comunicar los periféricos con la tarjeta de control.

2.1.1. Comunicación

La forma de comunicarse de la tarjeta al ruteador es por medio de un cable de ethernet cruzado. Una vez conectado al ruteador éste genera una red inalámbrica para comunicarse con la computadora.

Marca: Encore electronics
 Modelo: ENHWI-2AN34D
 Velocidad: 300 Mbps

Se eligió este ruteador por la capacidad de velocidad en la que puede trabajar, para si en algún momento es necesario conectar otro equipo a la red del robot móvil, no se presenten dificultades de velocidad de comunicación.

2.1.2. Actuadores.

La suspensión cinemática CIEP_1, ya contaba con servomotores, para generar el movimiento de las ruedas de tracción y poder girar las ruedas de dirección. Los servomotores poseen las siguientes características:

Marca: Pittman express
 Modelo: GM14902 S020
 Resolución: 500 cpm
 Radio de reducción: 65.5
 Voltaje: 24v

Para la conexión de los motores se utilizaron conectores DB15 y cable para ethernet (con 8 hilos), con el fin de poder realizar una rápida conexión de los encoder de los motores con el amplificador, y así tener flexibilidad para conectar o desconectar los motores. En la tabla 2.2 se encuentra la relación de conexión del encoder con el amplificador, utilizando los componentes mencionados.

Encoder	Cable de ocho hilos	Conector DB15	Amplificador				
			Descripción	Eje			
Color	Color	Numero de pin			X	Y	W
Negro	Café - blanco	1	Ground	89	89	103	103
Rojo	Café	2	+5v	90	90	104	104
Amarillo	Azul - Blanco	3	Main Encoder A+	83	91	105	97
Azul	Azul	4	Main Encoder B+	85	93	107	99
Verde	Verde	5	Main Encoder INDEX+	87	95	109	101

Tabla 2.2. Conexiones del encoder al amplificador

2.2. Integración hardware-software

Una vez que se tuvieron integrados todos los componentes físicos, se procedió a realizar la comunicación entre el hardware-software, y poder aplicar los

algoritmos de la generación de trayectorias al robot móvil. En la fig. 2.5 se muestra los pasos para configurar la interfaz.

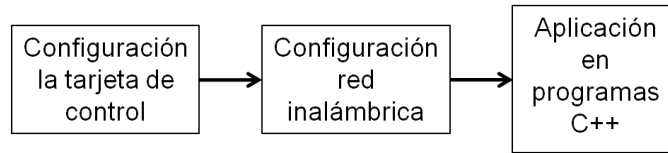


Figura 2.5. Diagrama de configuración hardware-software

2.2.1. Configuración de la tarjeta de control de movimiento

Antes de encender y conectar la tarjeta de control de movimiento a la computadora, se instalaron las librerías de la tarjeta de control de movimiento en la computadora, para poder enviar instrucciones desde la computadora a la tarjeta de control de movimiento. A continuación se realizaron los pasos para configurar el controlador de la tarjeta de control de movimiento.

1. Instalar los siguientes programas en la computadora.
 - DMC NET
 - DMC Smart terminal
 - Galil tools
2. Conectar la tarjeta con la PC, con el cable de Ethernet cruzado y encender la tarjeta de control de movimiento.
3. Configurar una red con las siguientes direcciones:

IPv4	148.224.52.28
Subred	255.0.0.0
Puerta de enlace	148.224.52.26

4. Abrir el programa de DMC Smart terminal.
5. Configurar el controlador, que sirve para establecer la comunicación con la tarjeta de control de movimiento.
6. Generar un nuevo controlador.
7. Buscar modelo de tarjeta.
8. Nombrar el controlador y escoger la forma de conexión.
9. Configurar la dirección de IP, y se escribe el número de serie en el espacio correspondiente.
10. Finalizar el proceso de creación del controlador.

Este controlador, sirve para poder tener la comunicación desde los programas ejecutados desde C++.

2.2.2. Configuración de la red inalámbrica

Para implementar la red inalámbrica se conecta el cable de ethernet en las entradas del ruteador para establecer la comunicación. A continuación se enumeran los pasos más importantes para la configuración de la red.

1. Conectar la tarjeta con el ruteador con el cable de ethernet cruzado y encender el ruteador.
2. Conectar la PC, con el ruteador con un cable normal de ethernet.
3. Abrir una página con el explorador de internet e ingresar la siguiente dirección : 192.168.0.1
4. Ingresar a la configuración del ruteador como administrador.
5. Nombrar la red inalámbrica, por ejemplo a “Robot móvil CIEP_1”
6. Cambiar la dirección principal de 192.168.0.1 a 148.224.52.1
7. Reiniciar el ruteador, para ingresar a la configuración es necesario ingresar la nueva dirección 148.224.52.1.
8. Desconectar el cable de la PC.
9. Conectar la computadora por medio de la red inalámbrica creada.
10. Abrir en la computadora, el programa DMC Smart terminal y comprobar la conectividad con la tarjeta de control de movimiento.

Una vez configurada correctamente se tiene una red inalámbrica para tener comunicación con el robot móvil.

2.2.2.1. Velocidad de comunicación

Se probó la velocidad de transmisión de datos entre la tarjeta de movimiento y la computadora, se mandó una instrucción en un ciclo con 10000 repeticiones.

Con la red conectada con cable, la velocidad de transmisión es de 3.3 milisegundos tiempo que tarda una instrucción en salir de la computadora y regresar con información. Con la red inalámbrica la velocidad de transmisión es de 5.74 milisegundos.

2.2.3. Aplicaciones C++

El envío de instrucciones a la tarjeta de control se realiza por medio de una programación en lenguaje C++, por lo cual se tendrá que configurar el entorno de los programas para el envío de las instrucciones. Para configurar el entorno de programación C++, se requiere agregar en un programa los siguientes archivos:

- Archivo de librería “DMC32.LIB”.
- Archivo de librería “DMCMLIB.LIB”.
- Archivo de encabezado “Dmccom.h”.

Después de haber creado el programa en C++, se debe realizar un algoritmo para calcular los incrementos de los encoder a enviar a los motores de las ruedas de tracción del robot móvil tal y como se presentará en el capítulo III.

Una vez que se tengan calculados los incrementos a enviar a los motores, se debe configurar el controlador de la tarjeta desde el programa en C++, luego para reiniciar la tarjeta de control de movimiento, esto para asegurarse que todos los valores estén en cero. Se debe limitar el torque, definir el torque pico y ajustar las ganancias de control para los motores. Se define una forma de ejecución del movimiento, la cual puede ser movimiento secuencial o movimiento paso-paso. Ya terminada la secuencia se cierra el controlador de la tarjeta. En la fig. 2.6, se muestra el diagrama de flujo principal.

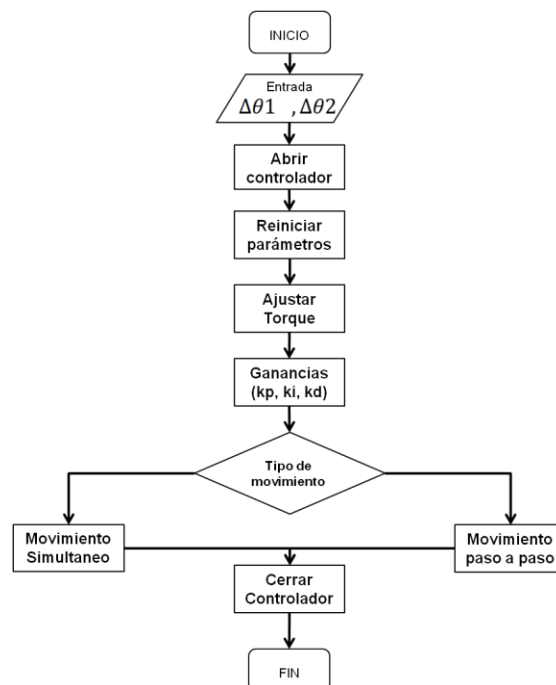


Figura 2.6. Diagrama de flujo de envío de instrucciones a la tarjeta de movimiento

La secuencia de movimiento paso-paso, consiste en enviar uno a uno los incrementos de las ruedas. Primero se conoce el número de incrementos, después se debe fijar la velocidad del motor, aceleración del motor y desaceleración del motor. Una vez fijos estos parámetros se envía el valor del incremento en cuentas (unidad de medida del encoder). Se envía la instrucción de comenzar el movimiento, se espera a que se termine el movimiento para enviar la siguiente instrucción que es la retroalimentación del error en cuentas del movimiento realizado. Estos pasos se repiten hasta que termine la secuencia de incrementos. En la fig. 2.7, se muestra el diagrama de flujo del movimiento paso-paso.

El movimiento secuencial, consiste en enviar todos los incrementos y después ejecutar los movimientos de los motores como si fuera una sola instrucción. Para ello se inicializa una secuencia de movimiento secuencial, se eligen los ejes que van a ser parte de la secuencia, se identifica el número de incrementos a enviar en un ciclo y se envían estos incrementos a la tarjeta de control de movimiento. Una vez terminado el envío a la tarjeta de control de movimiento se coloca un comando para decir cuál fue el último incremento del movimiento. Se deben fijar la velocidad, aceleración y desaceleración del movimiento para iniciar la secuencia de movimiento. Se coloca un comando para esperar a que termine el movimiento para enviar el comando de retroalimentación del error de los motores. En la fig. 2.8 se describe el diagrama de flujo, para realizar un movimiento simultáneo.

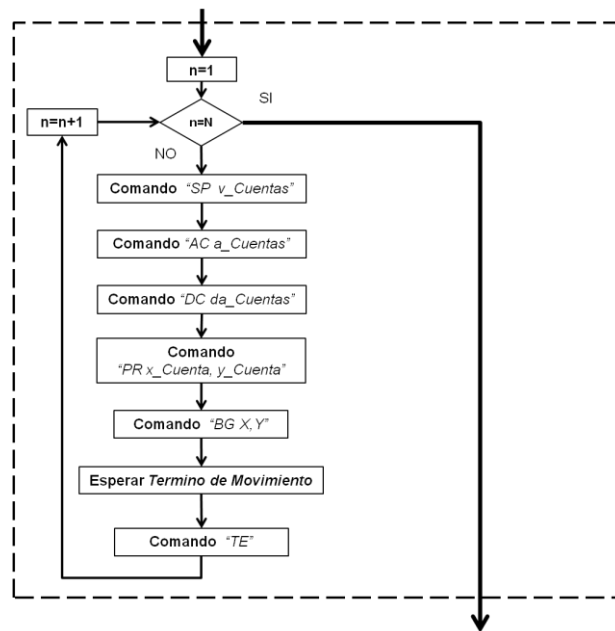


Figura 2.7. Diagrama de flujo de movimiento paso a paso

En el algoritmo de las fig. 2.7 y 2.8, se colocan la secuencia de envío los comandos desde la computadora a la tarjeta de control de movimiento. Los comandos, son enviados desde el programa en lenguajes C++ que sólo aceptan variables del tipo “char”, por lo que para cada comando se realizó una función, para facilitar la programación estructurada. En el anexo D, se enlistan los comandos principales de ejecución.

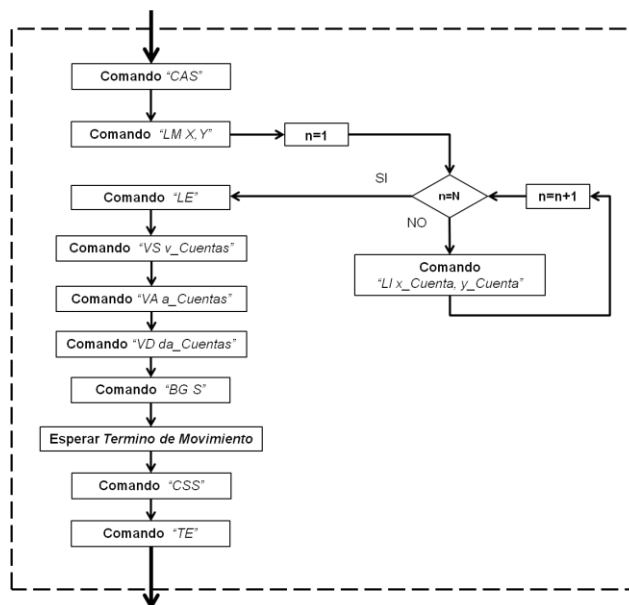


Figura 2.8. Diagrama de flujo de movimiento simultáneo

2.3. Resumen del capítulo.

A continuación se mencionan las aportaciones más sobresalientes del trabajo descritas en este capítulo:

- Se integraron los componentes de control dentro de una estructura de aluminio, a esta integración se le llama módulo de control. Este módulo de control se diseñó de tal forma que si fuera necesario separarlo del robot móvil, basta con desconectar las alimentaciones de los motores y los conectores de los encoders y desensamblar los tornillos de fijación.
- Se colocaron interruptores para recargar las baterías, los cuales, resultaron funcionales, evitando desconectar y desmontar las baterías del módulo de control para recargarlas.
- En el módulo de control, el máximo de ejes de salida para motores son cuatro, y son utilizados para la configuración Ackerman.
- Se instalaron dos cámaras con conectividad USB.
- El módulo de control permite, la conexión de diferentes sensores (laser, ultrasonidos, inductivos) y operación remota desde la red inalámbrica.
- Se cuenta en el módulo de control con los siguientes voltajes para la alimentación de periféricos +5, +12 y +24 volts de corriente directa y 110 volts para corriente alterna.
- Se determinó que la velocidad de transmisión de información entre la tarjeta de movimiento y la computadora es de 3.3 milisegundos en conexión de cable y de 5.74 milisegundos en conexión inalámbrica.

III. DESARROLLO DE TRAYECTORIAS

En este capítulo se presentará la cinemática del robot móvil con ruedas para configuración de tipo unicycle y Ackerman, con sus respectivas ecuaciones. Se propone un perfil de velocidad que depende de la distancia a recorrer del robot móvil y que se usa para la fase de experimentación.

Se definirán los parámetros del robot móvil que serán utilizadas para los algoritmos generadores de trayectoria. Se analizarán dos tipos de funciones para la generación de trayectorias, la primera será un polinomio de cuarto orden y la segunda será un spline cúbico.

Se considera que el robot móvil cuenta con un efector final; y por ello se establece que el objetivo de la trayectoria es posicionar y orientar el efector en un punto del sistema de referencia mundial con un ángulo definido. Para evaluar las funciones generadoras de trayectorias se compara la exactitud con el que llega el efector al punto designado con cada una de ellas.

3.1. Ecuaciones cinemáticas del robot móvil en configuración de dirección tipo unicycle

En la fig. 3.1 se muestra, un esquema de un robot tipo unicycle, donde sus llantas de tracción son las ruedas trasera y la rueda delantera del tipo "loca".

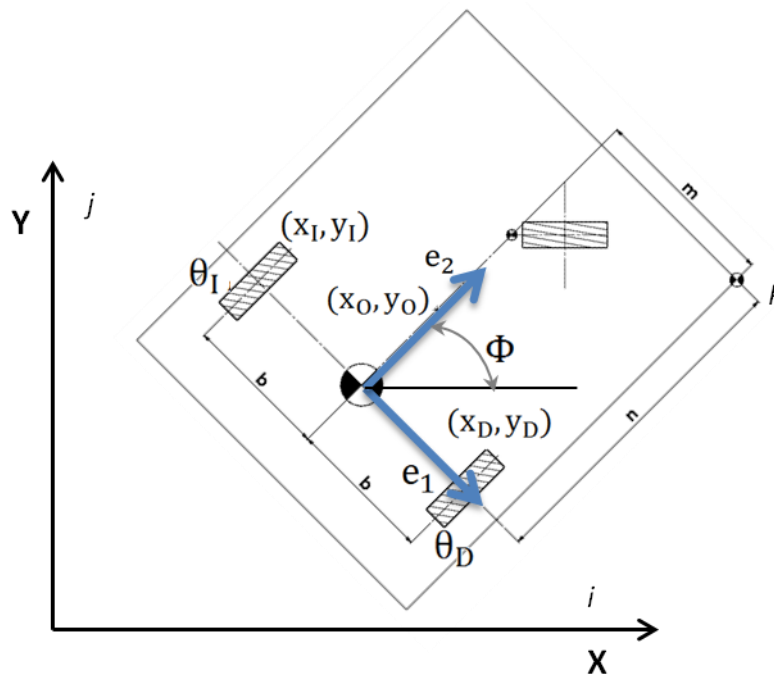


Figura 3.1. Esquema de un robot móvil tipo unicycle.

De la figura 3.1, se pueden definir los siguientes parámetros:

i, j	<i>Ejes de referencia mundial</i>
e_1, e_2	<i>Ejes de referencia móviles</i>
θ_I, θ_D	<i>Ángulo de rotación de las ruedas de tracción</i>
Φ	<i>Ángulo de orientación</i>
x_0, y_0	<i>Coordenada del origen del robot móvil</i>
x_I, y_I	<i>Coordenada de la rueda izquierda</i>
x_D, y_D	<i>Coordenada de la rueda derecha</i>
b	<i>Distancia entre la rueda de tracción y el origen del robot móvil</i>
R	<i>Radio de las ruedas de tracción</i>
P	<i>Punto definido por las coordenadas (m, n)</i>
m	<i>Distancia en el e_1 del punto P</i>
n	<i>Distancia en el e_2 del punto P</i>

Se define los ejes móviles con respecto a los mundiales como:

$$e_1 = \text{sen}(\Phi) i - \text{cos}(\Phi) j \quad (1)$$

$$e_2 = \text{cos}(\Phi) i + \text{sen}(\Phi) j \quad (2)$$

Se derivan las ecuaciones (1) y (2) con respecto al tiempo

$$de_1 = d\Phi e_2 \quad (3)$$

$$de_2 = d\Phi e_1 \quad (4)$$

Se define un vector del origen del eje mundial al origen del robot móvil r_0 y a partir de este vector se definen los vectores de las ruedas de tracción.

$$r_I = r_0 - b e_1 \quad (5)$$

$$r_D = r_0 + b e_1 \quad (6)$$

Se realiza a la equivalencia con las coordenadas del eje mundial tenemos

$$x_I = x_0 - b \text{sen}(\Phi) \quad (7)$$

$$y_I = x_0 + b \text{cos}(\Phi) \quad (8)$$

$$x_D = x_0 + b \text{sen}(\Phi) \quad (9)$$

$$y_D = x_0 - b \text{cos}(\Phi) \quad (10)$$

Se realiza la suposición **de que las ruedas no sufren deslizamiento al girar**. Así, que el avance diferencial del punto (X_I, Y_I) que corresponde a la rueda izquierda es de $dr_I = dx_I i + dy_I j$, entonces la condición de no deslizamiento viene dada por la ecuación (11) y (12):

$$dr_I \cdot e_2 = R d\theta_I \quad (11)$$

$$dr_I \cdot e_1 = 0 \quad (12)$$

Las ecuaciones (11) y (12) se pueden describir de la siguiente manera para la rueda izquierda.

$$dx_I \cos(\Phi) + dy_I \sin(\Phi) = R d\theta_I \quad (13)$$

$$dx_I \sin(\Phi) - dy_I \cos(\Phi) = 0 \quad (14)$$

Sustituyendo de las derivadas de las ecuaciones (7) y (8), en las ecuaciones (13) y (14) se tiene como resultado.

$$R d\theta_I = dx_0 \cos(\Phi) + dy_0 \sin(\Phi) - b d\Phi \quad (15)$$

$$0 = dx_0 \sin(\Phi) - dy_0 \cos(\Phi) \quad (16)$$

Se realiza el mismo procedimiento para la rueda derecha.

$$R d\theta_D = dx_0 \cos(\Phi) + dy_0 \sin(\Phi) + b d\Phi \quad (17)$$

$$0 = dx_0 \sin(\Phi) - dy_0 \cos(\Phi) \quad (18)$$

Restando la ecuación (15) a la ecuación (17) se tienen.

$$-R(d\theta_I - d\theta_D) = 2b d\Phi \quad (19)$$

Sumando la ecuación (15) a la ecuación (17).

$$R(d\theta_I + d\theta_D) = 2(dx_0 \cos(\Phi) + dy_0 \sin(\Phi)) \quad (20)$$

Considerando un punto en el cuerpo del robot móvil definido.

$$x = x_0 + m \sin(\Phi) + n \cos(\Phi) \quad (21)$$

$$y = y_0 - m \cos(\Phi) + n \sin(\Phi) \quad (22)$$

Derivando las ecuaciones (21) y (22), y sustituyendo en las ecuaciones (20) y (16).

$$dx \cos(\Phi) + dy \sin(\Phi) = \frac{R}{2}(d\theta_I + d\theta_D) + m d\Phi \quad (23)$$

$$-dx \sin(\Phi) + dy \cos(\Phi) = n d\Phi \quad (24)$$

Combinando las expresiones (23), (24) y (19) tenemos.

$$dx = (m \cos(\Phi) - n \sin(\Phi))d\Phi + \frac{R}{2}(d\theta_I + d\theta_D)\cos(\Phi) \quad (25)$$

$$dy = (m \sin(\Phi) + n \cos(\Phi))d\Phi + \frac{R}{2}(d\theta_I + d\theta_D)\sin(\Phi) \quad (26)$$

$$d\Phi = -\frac{R}{2b}(d\theta_1 - d\theta_D) \quad (27)$$

A partir de las ecuaciones anteriores podemos definir las ecuaciones diferenciales que describen el historial de cambio de la posición y orientación de la plataforma respecto al tiempo, a partir del desplazamiento de cada rueda $\dot{\theta}_1$ y $\dot{\theta}_D$. Por lo cual se puede reescribir según las ecuaciones (28), (29) y (30).

$$\dot{x} = (m \cos(\Phi) - n \sin(\Phi))d\Phi + \frac{R}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_D)\cos(\Phi) \quad (28)$$

$$\dot{y} = (m \sin(\Phi) + n \cos(\Phi))d\Phi + \frac{R}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_D)\sin(\Phi) \quad (29)$$

$$\dot{\Phi} = -\frac{R}{2b}(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_D) \quad (30)$$

Estas ecuaciones definen la cinemática del robot móvil, en base a sus velocidades de las ruedas de tracción.

3.2. Ecuaciones cinemáticas del robot móvil en configuración de dirección tipo Ackerman

La dirección de tipo Ackerman consta de dos ruedas para la dirección del vehículo y dos ruedas motrices. Las ruedas de dirección tienen que su eje de dirección se intercepta con el eje de rotación de la rueda. En la fig. 3.2 se muestra las variables de las cuatro ruedas en configuración del tipo Ackerman (tipo auto). Cabe destacar que cuando el robot móvil gira las ruedas de dirección tienen ángulos diferentes y que las ruedas del robot tienen velocidades diferentes en la duración del giro.

Como se muestra en la fig. 3.2, el objetivo del robot móvil es que gire en torno a un único punto, el centro instantáneo de rotación (CIR). Para ello, la rueda delantera interior a la curva se rota un ángulo mayor que la exterior, a fin de evitar que las ruedas patinen.

A partir del CIR y de las dimensiones del robot móvil, se puede deducir la ecuación 31. Sin embargo, para poder determinar el ángulo de las ruedas hace falta una segunda ecuación, la cual se obtiene suponiendo que existe una rueda virtual en el centro del eje delantero que gira un ángulo deseado γ_S ecuación 32. Se han despejado las variables desconocidas γ_1 y γ_D y en función de los parámetros conocidos se pueden obtener las ecuaciones 33 y 34, que están en función de la rueda virtual.

$$ctg(\gamma_I) - ctg(\gamma_D) = \frac{b}{l} \tag{31}$$

$$ctg(\gamma_I) - ctg(\gamma_S) = \frac{b}{2l} \tag{32}$$

$$\gamma_I = arctg\left(\frac{b}{2l} + ctg(\gamma_S)\right) \tag{33}$$

$$\gamma_D = arctg\left(-\frac{b}{2l} + ctg(\gamma_S)\right) \tag{34}$$

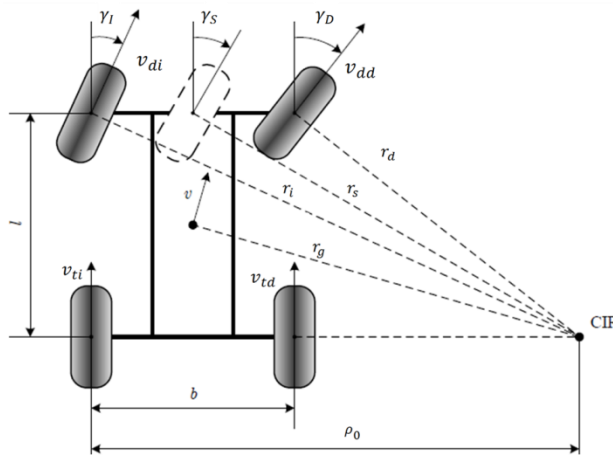


Figura 3.3. Dirección tipo Ackerman

v_{ti}, v_{td}	Velocidad de las ruedas trasera izquierda y derecha
v_{di}, v_{dd}	Velocidad de las ruedas delanteras izquierda y derecha
v	Velocidad medida desde el centro de masa
γ_I	Ángulo de rueda delantera izquierda
γ_D	Ángulo de rueda delantera derecha
γ_S	Ángulo de la rueda virtual central
CIR	Centro instantáneo de rotación
ρ_0	Radio instantáneo de curvatura
r_d, r_i, r_s, r_g	Distancia entre las ruedas y el CIR
b	Distancia entre la ruedas de tracción
l	Distancia entre la ruedas de tracción y las ruedas de dirección

Una vez resuelto el problema de la dirección, se debe identificar los parámetros relacionados con el robot móvil para su movimiento. En la fig. 3.3 se muestran los parámetros necesarios para calcular sus ecuaciones cinemáticas generales

i, j	Ejes de referencia móviles
X, Y	Ejes de referencia mundial
x	Coordenada en X del eje mundial para ubicar el origen de los ejes

- de referencia móvil
- y Coordenada en Y del eje mundial para ubicar el origen de los ejes de referencia móvil.
- θ Ángulo de orientación, medido del eje móvil i al eje mundial X.
- γ Ángulo de la rueda virtual central, medido de la rueda al eje i móvil.
- u_1 Vector de velocidad de avance del origen de los ejes de referencia móvil
- u_2 Vector de velocidad del giro de la rueda virtual.

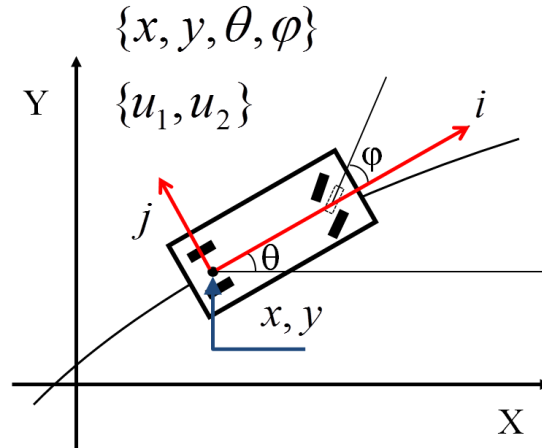


Figura 3.3. Variables de la dirección Ackerman

Se realiza la suposición **de que las ruedas no sufren deslizamiento al girar**. Esta suposición se ve reflejada en la ecuación 35.

$$\dot{x} \sin(\Phi) - \dot{y} \cos(\Phi) = 0 \quad (35)$$

Una vez definidas las restricción cinemática. Ahora con las ecuaciones 36, 37, 38, 39, definimos las ecuaciones generales cinemáticas para el modelo de dirección tipo Ackerman.

$$\dot{x} = u_1 \cos(\theta) \quad (36)$$

$$\dot{y} = u_1 \sin(\theta) \quad (37)$$

$$\dot{\Phi} = \frac{u_1}{l} \tan(\varphi) \quad (38)$$

$$\dot{\varphi} = u_2 \quad (39)$$

3.3. Perfil de velocidades

En el apartado anterior se definieron las ecuaciones cinemáticas para el movimiento de un robot móvil, ahora para realizar un generador de trayectorias que no dependa del tiempo. Se define un perfil de velocidades para el movimiento del robot móvil.

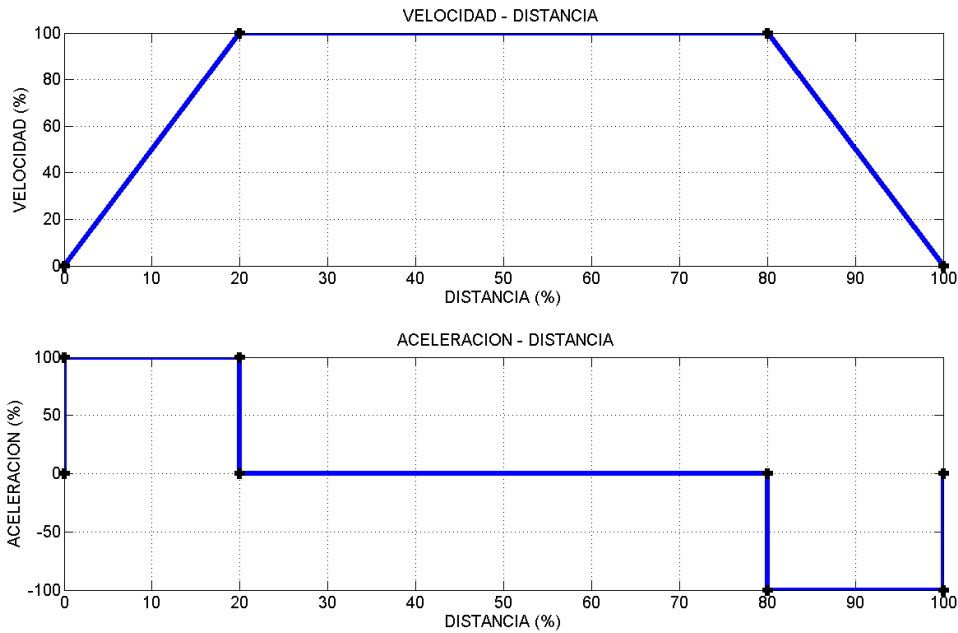


Figura 3.4. Velocidad y aceleración en relación con la distancia total recorrida

El perfil de velocidades que se va a definir, debe depender de la distancia en la que se va a recorrer en la trayectoria, en la fig. 3.4 se muestra la relación de la velocidad y aceleración con la distancia total recorrida. Donde empieza a partir de un punto en reposo, inicia con aceleración constante y la velocidad aumenta hasta llegar a la velocidad máxima, cuando se alcanza la velocidad máxima la aceleración se hace cero manteniendo una velocidad constante, hasta la distancia donde debe empezar a disminuir la velocidad y se tiene una desaceleración hasta tener el robot móvil en el punto deseado.

En la fig. 3.5, se define la variable CPD , que es el porcentaje de la distancia para que el robot móvil alcance la velocidad máxima y también para llevar al robot móvil a detenerse.

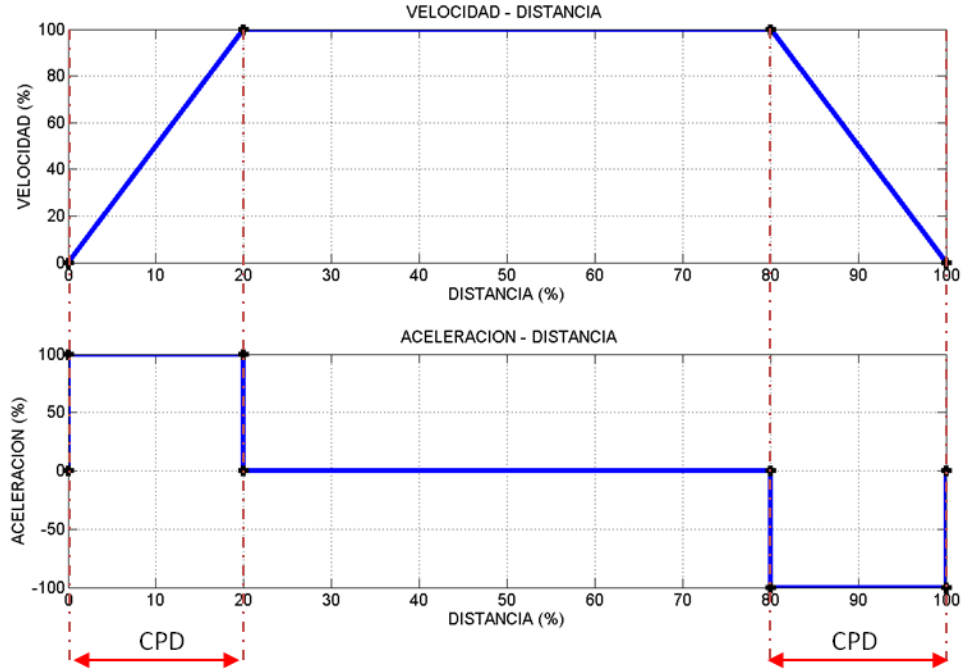


Figura 3.5. CPD porcentaje de la distancia para llevar al robot móvil a la velocidad máxima.

Para definir la velocidad máxima en el trayecto del robot móvil se definirá la siguiente relación, a mayor distancia a recorrer, una velocidad mayor que cuando se tenga que recorrer una distancia menor.

Se define la siguiente ecuación para calcular la velocidad máxima

$$v_{\max} = \frac{d_{\text{total}}}{\text{CPV}} \tag{40}$$

Donde:

v_{\max} Velocidad máxima

d_{total} Distancia total recorrida
 CPV Coeficiente de proporcionalidad de velocidad-distancia.

Para encontrar la aceleración máxima requerida para poder llevar al robot móvil a la velocidad máxima en la distancia deseada se analizará lo siguiente:

Si

$$a = \frac{dv}{dt} \tag{41}$$

$$v = \frac{dx}{dt} \tag{42}$$

Despejando de las ecuaciones (41) y (42) dt , e igualando se tiene.

$$\frac{dv}{a} = \frac{dx}{v} \quad (43)$$

Integrando la ecuación (43).

$$\frac{v^2}{2} \Big|_{v_0}^{v_1} = ax \Big|_{x_0}^{x_1} \quad (44)$$

Según la fig. 3.5, considerando en el punto donde se encuentra la velocidad máxima, se tiene lo siguiente:

$$\begin{array}{ll} v_0 = 0 & x_0 = 0 \\ v_1 = v_{\max} & x_1 = (\text{CPD})d_{\text{total}} \end{array}$$

De la ecuación (44) despejando a y sustituyendo las condiciones iniciales tenemos.

$$a = \frac{v_{\max}^2}{2(\text{CPD})d_{\text{total}}} \quad (45)$$

Sustituyendo el valor de v_{\max} en la ecuación (45)

$$a = \frac{\left(\frac{d_{\text{total}}}{\text{CPV}}\right)^2}{2(\text{CPD})d_{\text{total}}} \quad (46)$$

Agrupando las constantes en una

$$\text{CPA} = \frac{1}{2(\text{CPD})(\text{CPV})^2} \quad (47)$$

El valor de la aceleración máxima se calcula según la ecuación (48)

$$a_{\max} = (\text{CPA})d_{\text{total}} \quad (48)$$

Con las ecuaciones (48) se calcula la aceleración para el movimiento del robot móvil y con la ecuación (40) la velocidad máxima. Y con las constantes CPV y CPD, se definen los parámetros para el movimiento del robot móvil.

En el siguiente apartado se realizará el modelado de la trayectoria con polinomios de cuarto orden y splines cúbicas.

3.4. Definición de los parámetros del robot móvil.

En el apartado anterior definimos lo que fue el perfil de velocidades, en este apartado se definirán los parámetros del robot móvil y las variables del generador de trayectorias basado en el robot móvil CIEP_1.

La configuración del robot móvil CIEP_1 considerado para la definición de los parámetros es el mostrado en la fig.1.10 (ver capítulo I), consta de dos motores de tracción instalados en las ruedas traseras del robot móvil y dos motores de dirección que se ubican en las ruedas delanteras del robot móvil.

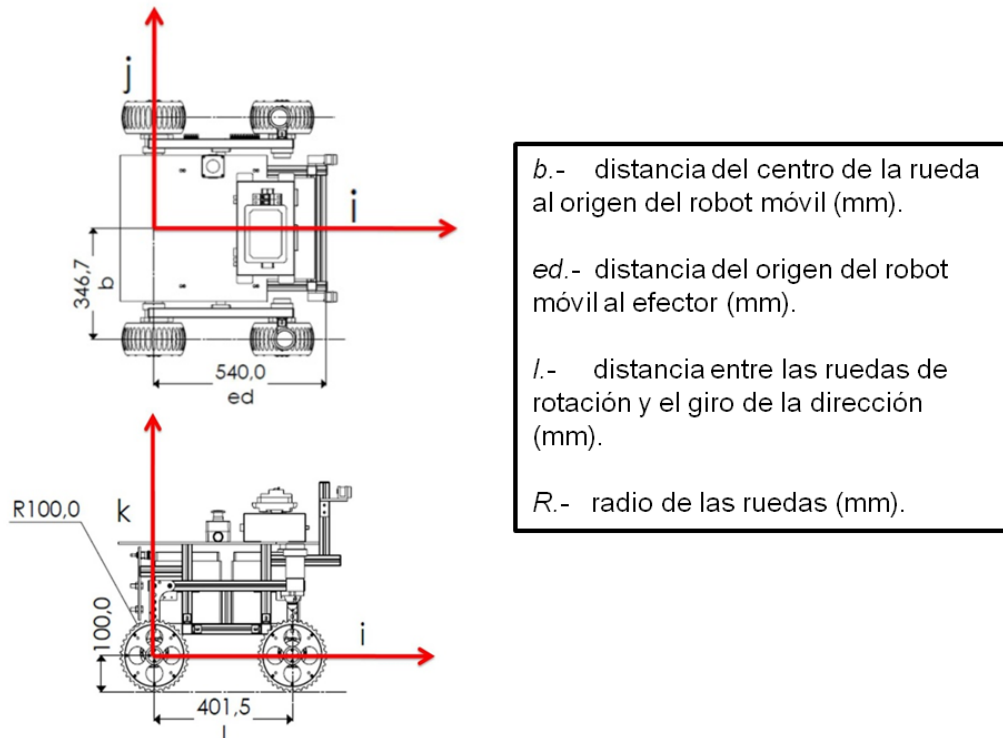


Figura 3.6. Localización del origen del robot móvil (unidades en mm)

El origen del robot móvil se ubica en el centro del eje de rotación de las ruedas de tracción. En la fig. 3.6 se definen los diferentes parámetros del robot móvil.

Una vez definido el origen de la configuración del robot móvil CIEP_1, este origen se utiliza como punto de referencia de la plataforma móvil para generar la trayectoria con respecto a un sistema de referencia mundial, en la fig. 3.7 se define las variables para localizar al robot móvil con respecto al sistema de referencia mundial.

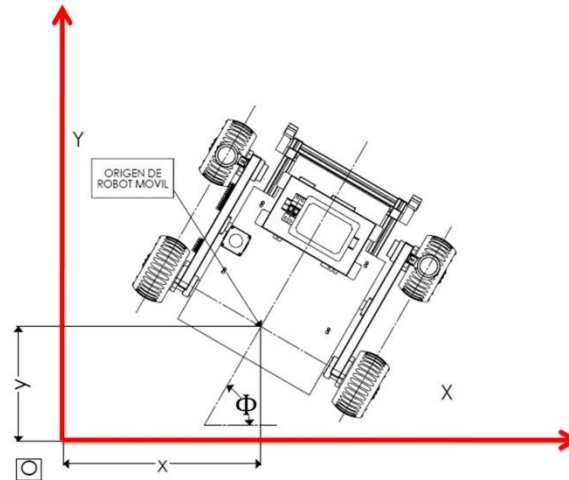


Figura 3.7. Localización del origen del robot móvil con respecto al sistema de referencia mundial

Las coordenadas del origen del sistema del robot móvil al origen del sistema de coordenadas mundial se definen como (x, y) .

La orientación del eje i del robot móvil con el eje X del sistema de referencia mundial se define como Φ .

En la fig. 3.7 se muestra la segmentación de una función y el ángulo de orientación final para efectos de análisis se definirán dos parámetros:

T_x .- Corresponde a la distancia entre x_i y x_f , y es la proyección de la función a lo largo del eje de las X del sistema de referencia mundial.

T_y .- Corresponde a la distancia entre y_i y y_f .

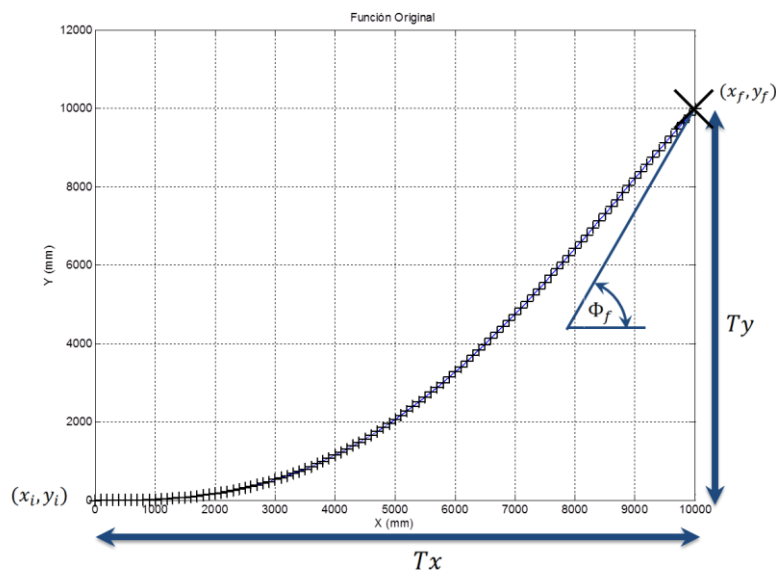


Figura 3.8. Segmentación de la función

El robot móvil, debe seguir una trayectoria dada por una función en el sistema de referencia mundial. La curva que genera la función se reconstruirá con N segmentos de circunferencia. Para generar los N segmentos de circunferencia la distancia T_x se divide en N segmentos.

En la fig. 3.9 se muestra la formación del segmento de circunferencia, el arco que comprende (Δs) , el ángulo $(\Delta\Phi)$ y el radio de curvatura (ρ) .

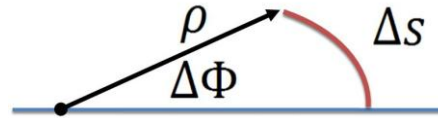


Figura 3.9. Definición del arco de curvatura, ángulo de orientación y radio de curvatura instantáneo.

En la fig. 3.10 se muestra la ubicación del centro de giro del robot móvil que coincide con el origen del robot móvil, los ángulos de dirección (γ_3, γ_4) y los ángulos de tracción (θ_1, θ_2) . Se debe tomar en cuenta una de las restricciones del robot móvil es que no se puede desplazar lateralmente y solo en segmentos de curva.

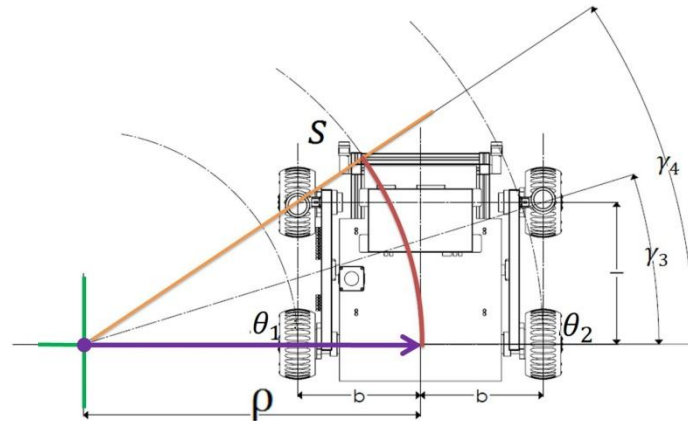


Figura 3.10. Parámetros para el cálculo de los incrementos en cada segmento

Para cada segmento en el que se divide la distancia T_x , se debe calcular los parámetros que serán enviados al controlador del robot móvil, para ello se obtienen primero el arco y el radio instantáneo de curvatura de cada segmento de la siguiente forma.

Arco del segmento (s).

$$s = \int_{x_n}^{x_{n+1}} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2} \right) dx \quad (49)$$

Donde:

s .- Arco del segmento generado por la trayectoria del origen del robot móvil.

$\frac{dy}{dx}$.- Primera derivada de la función.

dx .-Diferencial de x .

Radio instantáneo de curvatura (ρ).

$$\rho = \frac{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{d^2y}{dx^2}} \quad (50)$$

Donde:

ρ .- Radio instantáneo de curvatura (giro).

$\frac{d^2y}{dx^2}$.- Segunda derivada de la función.

La relación entre ángulo del segmento del arco de la circunferencia y el desplazamiento de las ruedas del robot móvil en el plano con la rotación de las ruedas de tracción se expresa en la ecuación (51).

$$\frac{s}{\rho} = \frac{R \Delta\theta_1}{\rho - b} = \frac{R \Delta\theta_2}{\rho + b} \quad (51)$$

Para obtener el ángulo de orientación final Φ se debe sumar los incrementos de ángulos de cada segmento. En la fig. 3.11 se observa el desplazamiento del robot móvil y el cambio de orientación.

$$\Delta\Phi_n = \frac{s_n}{\rho_n} \quad (52)$$

$$\Phi = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 + \dots + \Delta\Phi_N + \Delta\Phi_{N+1} \quad (53)$$

$$\Delta\Phi^1 = 0 \quad (54)$$

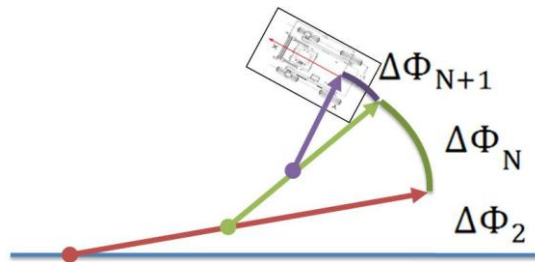


Figura 3.11. Dirección de las ruedas delanteras

Donde:

$\Delta\Phi_n$ - Incremento del ángulo de orientación del robot móvil al final de cada segmento.

Φ - Ángulo de orientación final del robot móvil.

$\Delta\Phi_1$ - Primer incremento igual a cero, al empezar la trayectoria se considera que el robot móvil está alineado con su horizontal.

Para calcular los incrementos de las ruedas de rotación se define a partir de la ecuación (51):

a) Rueda izquierda de tracción del robot móvil

$$\Delta\theta_{1n} = \frac{s_n}{R} \left[1 + \frac{b}{\rho_n} \right] \quad (55)$$

b) Rueda derecha de tracción del robot móvil

$$\Delta\theta_{2n} = \frac{s_n}{R} \left[1 - \frac{b}{\rho_n} \right] \quad (56)$$

Donde:

$\Delta\theta_{1n}$ - Incremento de rotación en la rueda trasera izquierda (radianes).

$\Delta\theta_{2n}$ - Incremento de rotación en la rueda trasera derecha (radianes)

R - Radio de las ruedas (mm).

b - Distancia del extremo de la rueda al centro del eje de rotación de las ruedas traseras (mm) ver fig. 3.6.

Para poder definir el giro de las ruedas de dirección delanteras, según la fig. 3.10, tenemos las siguientes relaciones:

$$\sin \gamma_3 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\rho + b)^2}} \quad (57)$$

$$\cos \gamma_3 = \frac{(\rho + b)}{\sqrt{l^2 + (\rho + b)^2}} \quad (58)$$

$$\gamma_3 = \arctan2(\sin \gamma_3, \cos \gamma_3) \quad (59)$$

$$\sin \gamma_4 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + (\rho - b)^2}} \quad (60)$$

$$\cos \gamma_4 = \frac{(\rho - b)}{\sqrt{l^2 + (\rho - b)^2}} \quad (61)$$

$$\gamma_4 = \arctan2(\sin \gamma_4, \cos \gamma_4) \quad (62)$$

Donde:

γ_3 - Ángulo para girar la rueda derecha delantera

γ_4 - Ángulo para girar la rueda izquierda delantera

l - Distancia entre el eje de giro de las ruedas delanteras y el eje de rotación de las ruedas traseras (ver fig. 3.6).

El ángulo para el giro de la dirección de las ruedas delanteras γ_3 y γ_4 , como se muestra en la fig.3.10 se considera absoluto, y cuando las ruedas delanteras estén alineadas con las ruedas traseras el valor de γ_3 y γ_4 es de 0° . Se realiza una corrección del giro de la dirección de las ruedas delanteras, para evitar giros de más de $\pm 90^\circ$, es necesario definir dos condicionantes

$$\text{Si } \gamma_3 > \frac{\pi}{2}, \text{ entonces } \gamma_3 = \gamma_3 - \pi \quad (63)$$

$$\text{Si } \gamma_4 > \frac{\pi}{2}, \text{ entonces } \gamma_4 = \gamma_4 - \pi \quad (64)$$

Se debe seleccionar una función para generar la trayectorias y calcular los incrementos $\theta_1, \theta_2, \gamma_3, \gamma_4$, que se obtienen por medio de las ecuaciones (55), (56), (59), (62). Una vez que se han obtenido los incrementos de cada segmento, se envían en forma de arreglo a la tarjeta de control de movimiento del robot móvil, para que se ejecute la trayectoria deseada.

Para calcular la posición teórica de las ruedas traseras y la posición del efector del robot móvil, en cada segmento se utilizan las siguientes ecuaciones:

Rueda izquierda:

$$XI_n = x_n - b \text{sen}(\Phi) \quad (65)$$

$$YI_n = y_n + b \text{sen}(\Phi) \quad (66)$$

Rueda derecha:

$$XD_n = x_n + b \text{sen}(\Phi) \quad (67)$$

$$YD_n = y_n - b \text{sen}(\Phi) \quad (68)$$

Para la posición del efector final.

$$XE_n = x_n + e \text{dcos}(\Phi) \quad (69)$$

$$YE_n = y_n + e \text{dsen}(\Phi) \quad (70)$$

3.5. Generación de la trayectoria por un polinomio de cuarto orden

Una vez que se estableció la forma de calcular los incrementos se define una función para poder generar la trayectoria.

El objetivo de la trayectoria es que el robot móvil se posicione de tal forma que el efector del robot móvil llegue a un punto con una orientación deseada en el sistema de referencia mundial. La trayectoria se aplica al origen del robot móvil, que es el centro de giro del robot móvil. Esta trayectoria debe adaptarse a la restricción de movimiento del robot móvil que es permisible el desplazamiento lateral.

La trayectoria propuesta se define en base a un polinomio de cuarto orden ecuación (71), se eligió esta función por que permite designar la orientación y posición del efector del robot móvil. A demás de que esta curva no viola la restricción de movimiento del robot móvil. Se considera que el efector está ubicado, según fig. 3.6, al frente del robot móvil, a una distancia ed del origen del robot móvil y colineal al eje i del robot móvil.

$$y = A_0 + A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + A_4x^4 \quad (71)$$

Las condiciones iniciales para poder obtener las constantes del polinomio son: (unidades de longitud en mm)

$x_i = 0$.- Coordenada inicial del centro de las ruedas.

$y_i = 0$.- Coordenada inicial del centro de las ruedas.

$x_{ef} = \text{Conocido}$.-Coordenada deseada del efector.

$y_{ef} = \text{Conocido}$.- Coordenada deseada del efector.

$x_f = x_{ef} - ed \cos \Phi_f$ - Coordenada final del origen de robot móvil.

$y_f = y_{ef} - ed \sin \Phi_f$ - Coordenada final del origen de robot móvil.

ed .- Distancia del centro del eje de rotación de las ruedas traseras al efector.

Φ_f .- Ángulo de orientación del efector final con respecto al eje X del sistema de referencia mundial, puede tomar valores de $-\frac{\pi}{2} < \phi_f < \frac{\pi}{2}$.

$\frac{dy_i}{dx_i} = 0$.- Derivada en el punto inicial, cero por que se inicia en forma horizontal el movimiento.

$\frac{dy_f}{dx_f} = \tan \Phi_f$.- Derivada en el punto final.

$\frac{d^2y_i}{dx_i^2} = \mu$.- Segunda derivada del punto inicial.

$\mu = \frac{1}{\rho_0}$.- El inverso del centro instantáneo de curvatura.

ρ_0 .- Es un valor constante, es mayor a la distancia que se pretende recorrer.

Los valores de las constantes del polinomio de cuarto orden se calculan a partir de la ecuación (72):

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ A_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i \\ \frac{dy_i}{dx_i} \\ \frac{d^2y_i}{dx_i^2} \\ y_f \\ \frac{dy_f}{dx_f} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & x_i & x_i^2 & x_i^3 & x_i^4 \\ 0 & 1 & 2 * x_i & 3 * x_i^2 & 4 * x_i^3 \\ 0 & 0 & 2 & 6 * x_i & 12 * x_i^2 \\ 1 & x_f & x_f^2 & x_f^3 & x_f^4 \\ 0 & 1 & 2 * x_f & 3 * x_f^2 & 4 * x_f^3 \end{bmatrix}^{-1} \quad (72)$$

Una vez calculadas las constantes del polinomio de cuarto orden, se debe fijar el número de segmentos (N) para poder calcular los incrementos.

Se realizará en la sección 3.7 un análisis de el número de segmentos adecuados y la forma de realizar la segmentación de T_x para lograr disminuir el error a menos del 1% de en la posición final del efector.

3.5.1. Tipo de segmentación del polinomio de cuarto orden

Para el modelado de la trayectoria se han planteado dos formas de segmentar la distancia T_x , la primera haciendo una segmentación uniforme, y la segunda una segmentación fina. En la fig. 3.12, se muestran las dos formas de segmentar y las cuales se explican en las siguientes subsecciones.

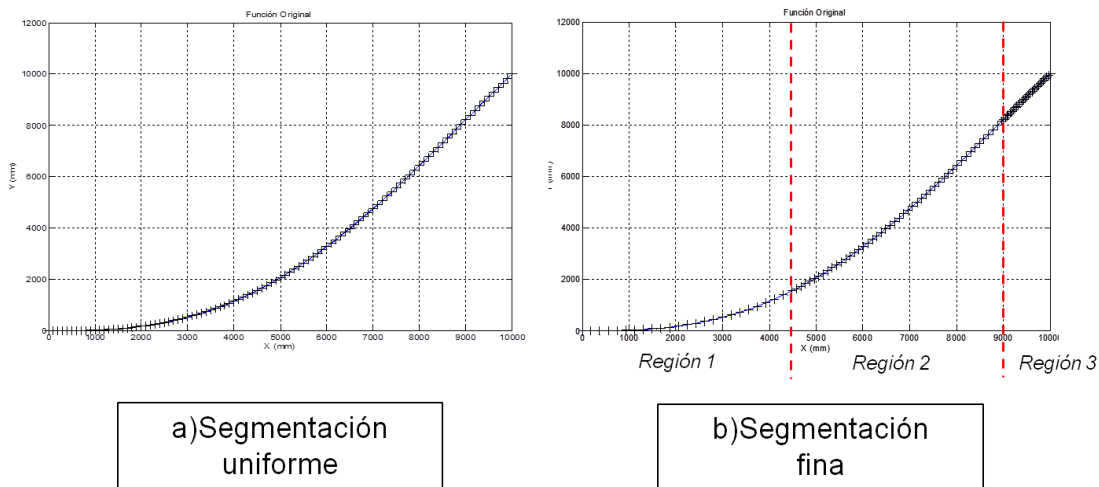


Figura 3.12. Diferentes formas de segmentar.

3.5.1.1. Modelado segmentación uniforme

La segmentación uniforme consiste en que todos los segmentos en distancia en X sean iguales, es decir, la distancia T_x se divide N en partes iguales, lo que arroja N+1 puntos en X.

En la fig. 3.13, se muestra el diagrama de flujo del algoritmo para determinar el valor de cada incremento de las ruedas (delantera y trasera) y su posición en el sistema de referencia mundial.

Los parámetros de entradas del algoritmo son la coordenada y orientación deseada del efector y el número de segmentos en los que se quiere dividir la función.

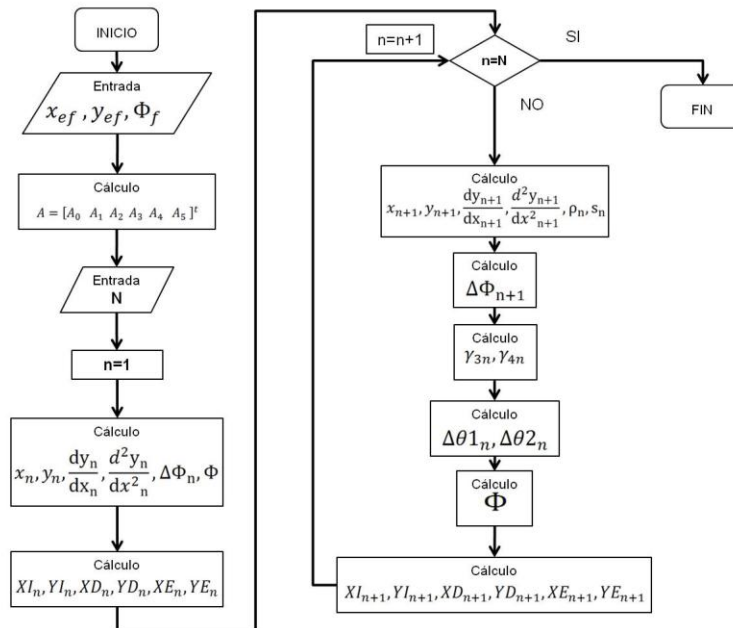


Figura 3.13. Diagrama de flujo de la programación básica

3.5.1.2. Modelado con segmentación fina

La segmentación fina como se muestra en la fig.3.12.b), consiste en dividir la función en tres regiones, en las cuales se le asignarán un número de segmentos de los N totales, dentro de estas regiones se hará una segmentación uniforme.

En el diagrama de flujo fig.3.14, se muestra cómo se implementó el algoritmo de segmentación fina, a diferencia del algoritmo de la fig.3.13, se incorpora la evaluación de las raíces de la función en su segunda derivada, la distribución de los segmentos en las regiones y el cálculo de x_{n+1} .

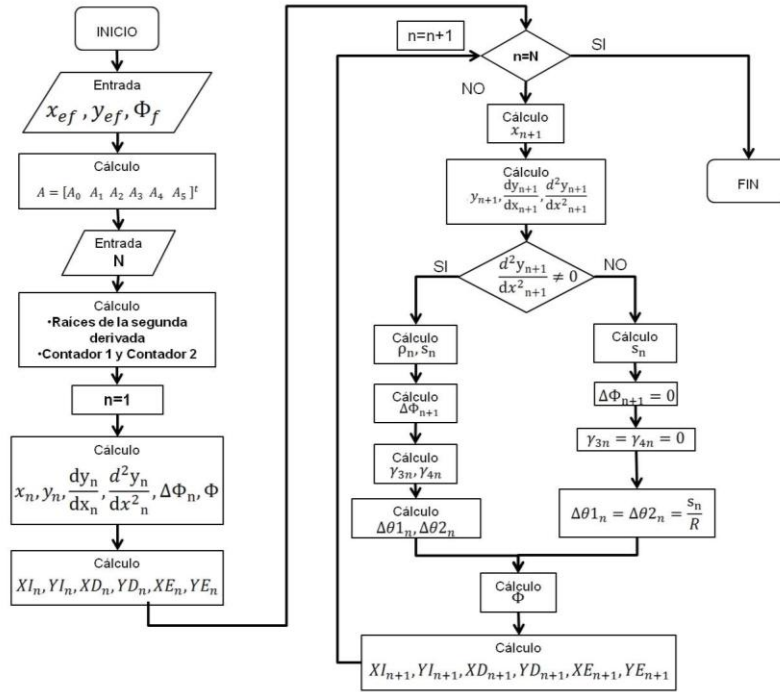


Figura 3.14. Diagrama de flujo de la programación con segmentación fina

Es necesario evaluar la segunda derivada, porque tiene influencia directa en el cambio del radio de curvatura instantáneo para cada segmento (ec.50). En la fig. 3.15 se muestra el algoritmo para calcular y evaluar las raíces de la segunda derivada.

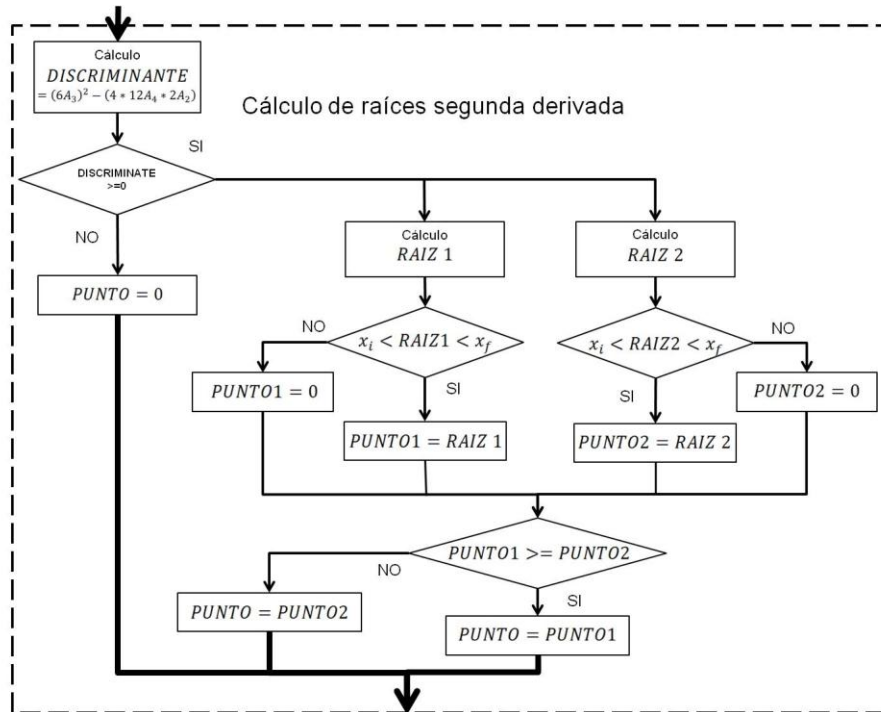


Figura 3.15. Diagrama de flujo del cálculo de las raíces de la segunda derivada

El radio de curvatura instantáneo (ec.50) depende de la primera derivada y de la segunda derivada, cuando la segunda derivada pasa por cero, indica que hay pendientes negativas en la primera derivada, afectando el valor del radio de curvatura instantáneo, si la segunda derivada es igual a cero, produce un radio de curvatura instantáneo infinito, lo que significa un tramo recto.

Para fines de notación se define como “PUNTO” como el valor en el eje X del sistema de referencia mundial, en donde la función de la segunda derivada cruza por cero.

Las regiones se definen de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} PUNTO < REGION_3 \leq x_f \\ \frac{PUNTO}{2} < REGION_2 \leq PUNTO \\ x_i < REGION_1 \leq \frac{PUNTO}{2} \end{aligned}$$

En el algoritmo de la fig. 3.16, se presenta como se determinó en base a experimentación el número de segmentos de cada región, a este número se le denomina “CONTADOR_x”, y se relaciona con las regiones de la siguiente manera.

- Contador_1; Corresponde al número de segmentos de la región uno.
- Contador_2; Corresponde al número de segmentos de la región dos.
- Contador_3; Corresponde al número de segmentos de la región tres.

Dependiendo de donde se ubique “PUNTO” es el número de segmentos que le corresponde a la región tres de los N totales.

En la fig. 3.17, se presenta el algoritmo para calcular x_{n+1} , con los contadores para cada región.

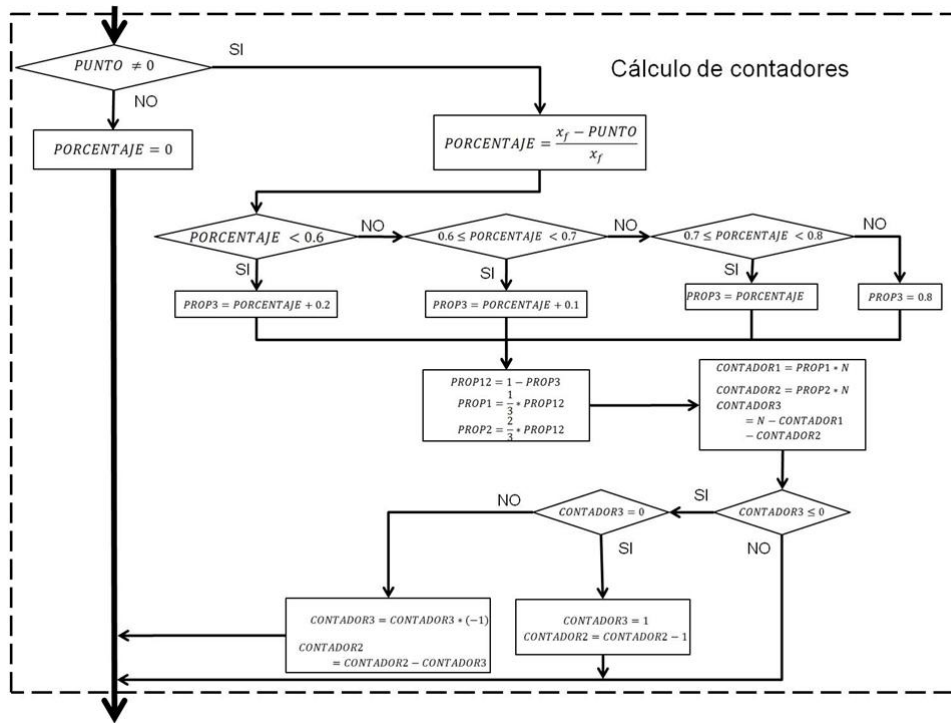


Figura 3.16. Diagrama de flujo del cálculo de los contadores

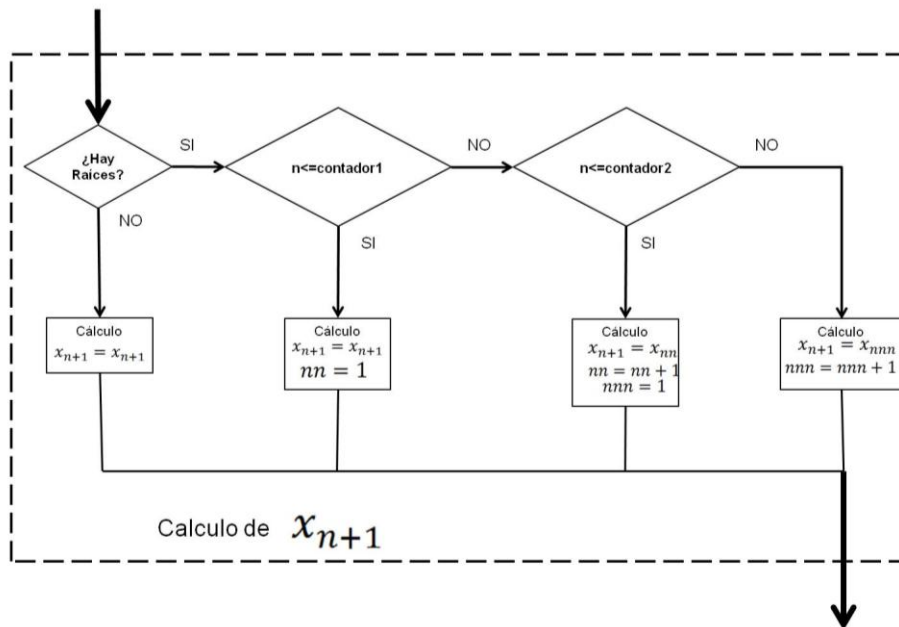


Figura 3.17. Diagrama de flujo del cálculo de x_{n+1}

3.6. Generación de trayectorias por splines cúbicos

Los splines, son funciones muy utilizadas para ajustar datos de interpolación, integración, diferenciación o para unir una nube de datos.

La función que se utilizó para los splines, es una cúbica de la forma siguiente:

$$y = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (73)$$

Las características de los splines cúbicos son las siguientes:

1. Las curvas pasan por todos los puntos.
2. La primera derivada es continua entre puntos.
3. La segunda derivada es continua entre puntos.
4. Las condiciones de frontera no están restringidas en los extremos.

Las curvas generadas por los splines cúbicos, cumplen con la restricción de que el robot móvil no se puede desplazar lateralmente.

Considerando el caso simple teniendo tres puntos dados, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , estos tres puntos generan 2 funciones cúbicas de la forma de la ecuación (73).

Se generan dos splines:

Spline 1

$$y = a_1(x - x_1)^3 + b_1(x - x_1)^2 + c_1(x - x_1) + d_1 \quad (74)$$

$$\frac{dy}{dx} = 3a_1(x - x_1)^2 + 2b_1(x - x_1) + c_1 \quad (75)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 6a_1(x - x_1) + 2b_1 \quad (76)$$

Spline 2

$$y = a_2(x - x_2)^3 + b_2(x - x_2)^2 + c_2(x - x_2) + d_2 \quad (77)$$

$$\frac{dy}{dx} = 3a_2(x - x_2)^2 + 2b_2(x - x_2) + c_2 \quad (78)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = 6a_2(x - x_2) + 2b_2 \quad (79)$$

Para la spline 1, se tiene en el valor de $x = x_1$, por lo tanto $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d^2y}{dx^2_1}$, sustituyendo en la ecuación (76)

$$\frac{d^2y}{dx^2_1} = 6a_1(0) + 2b_1 \quad (80)$$

$$b_1 = \frac{\frac{d^2y}{dx^2_1}}{2} \quad (81)$$

Para el valor de $x = x_2$, por lo tanto $\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d^2y}{dx^2_2}$, sustituyendo en la ecuación (76) y sustituyendo el valor de b_1 .

$$\frac{d^2y}{dx^2_2} = 6a_1(x_2 - x_1) + \frac{2\frac{d^2y}{dx^2_1}}{2} \quad (82)$$

$$\text{Si } h_1 = (x_2 - x_1) \quad (83)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2_2} = 6a_1h_1 + \frac{d^2y}{dx^2_1} \quad (84)$$

$$a_1 = \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} - \frac{d^2y}{dx^2_1}}{6h_1} \quad (85)$$

Sustituyendo el valor de $x = x_1$, en la ecuación (74)

$$y_1 = a_1(0)^3 + b_1(0)^2 + c_1(0) + d_1 \quad (86)$$

$$d_1 = y_1 \quad (87)$$

Sustituyendo el valor de $x = x_2$, en la ecuación (74)

$$y_2 = \left(\frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} - \frac{d^2y}{dx^2_1}}{6h_1} \right) (h_1)^3 + \left(\frac{\frac{d^2y}{dx^2_1}}{2} \right) (h_1)^2 + c_1(h_1) + y_1 \quad (88)$$

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{h_1} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} h_1}{6} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_1} h_1}{3} \quad (89)$$

Con las ecuaciones (81), (85), (87) y (89), se calculan las constantes de las funciones que forman los splines cúbicos. Pero estas ecuaciones dependen del valor de la segunda derivada en cada punto, por lo que será necesario calcularlas.

Si $\frac{dy}{dx_2} = \frac{dy}{dx_2}$ para spline 1 y spline 2, entonces igualando las ecuaciones (75) y (76), con $x = x_2$.

$$3a_1(x_2 - x_1)^2 + 2b_1(x_2 - x_1) + c_1 = 3a_2(x_2 - x_2)^2 + 2b_2(x_2 - x_2) + c_2 \quad (90)$$

$$3a_1(h_1)^2 + 2b_1(h_1) + c_1 = c_2 \quad (91)$$

$$\frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} - \frac{d^2y}{dx^2_1}}{2h_1} (h_1)^2 + \frac{d^2y}{dx^2_1} (h_1) + \left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} h_1}{6} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_1} h_1}{3} \right) = \left(\frac{y_3 - y_2}{h_2} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_3} h_2}{6} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} h_2}{3} \right) \quad (92)$$

$$h_1 \frac{d^2y}{dx^2_1} + 2(h_1 + h_2) \frac{d^2y}{dx^2_2} + h_2 \frac{d^2y}{dx^2_3} = 6 \left[\left(\frac{y_3 - y_2}{h_2} \right) - \left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} \right) \right] \quad (93)$$

La ecuación (93), es la que es utilizada para unir los puntos centrales, donde las incógnitas son los valores de las segundas derivadas. Si se tuvieran más puntos la ecuación (93) servirá para unir los puntos intermedios.

Para los valores de las segundas derivadas de los puntos extremos, se podría considerar el valor de las segundas derivadas son cero. Para este estudio se definen las primeras derivadas de los puntos extremos, a partir de la orientación inicial y final del robot móvil.

Si se conoce el valor de $\frac{dy}{dx_1}$ en $x = x_1$, sustituyendo en la ecuación (75)

$$\frac{dy}{dx_1} = 3a_1(x_1 - x_1)^2 + 2b_1(x_1 - x_1) + c_1 \quad (94)$$

$$\frac{dy}{dx_1} = \frac{y_2 - y_1}{h_1} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} h_1}{6} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_1} h_1}{3} \quad (95)$$

$$2h_1 \frac{d^2y}{dx^2_1} + h_1 \frac{d^2y}{dx^2_2} = 6 \left[\left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} \right) - \frac{dy}{dx_1} \right] \quad (96)$$

Si se conoce el valor de $\frac{dy}{dx_3}$ en $x = x_3$, sustituyendo en la ecuación (78)

$$\frac{dy}{dx_3} = 3a_2(x_3 - x_2)^2 + 2b_2(x_3 - x_2) + c_2 \quad (97)$$

$$\frac{dy}{dx_3} = \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} - \frac{d^2y}{dx^2_1}}{2h_1} (h_2)^2 + \frac{d^2y}{dx^2_2} (h_2) + \frac{y_3 - y_2}{h_2} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_3} h_2}{6} - \frac{\frac{d^2y}{dx^2_2} h_2}{3} \quad (98)$$

$$h_2 \frac{d^2y}{dx^2_2} + 2h_2 \frac{d^2y}{dx^2_3} = 6 \left[\frac{dy}{dx_3} - \left(\frac{y_3 - y_2}{h_2} \right) \right] \quad (99)$$

Con las ecuaciones (83), (85), (88), formamos el siguiente sistema de ecuaciones para solucionar las segundas derivadas y poder calcular las constantes de los splines.

$$\begin{bmatrix} \frac{d^2y}{dx^2_1} \\ \frac{d^2y}{dx^2_2} \\ \frac{d^2y}{dx^2_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2h_1 & 2h_1 & 0 \\ h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 \\ 0 & h_2 & 2h_2 \end{bmatrix}^{-1} 6 \begin{bmatrix} \left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} \right) - \frac{dy}{dx_1} \\ \left(\frac{y_3 - y_2}{h_2} \right) - \left(\frac{y_2 - y_1}{h_1} \right) \\ \frac{dy}{dx_3} - \left(\frac{y_3 - y_2}{h_2} \right) \end{bmatrix} \quad (100)$$

Con la siguientes condiciones iniciales para definir los las constantes de los splines cúbicos (unidades en mm).

$x_i = 0$.- Coordenada inicial del centro de las ruedas.

$y_i = 0$.- Coordenada inicial del centro de las ruedas.

$x_{ef} = \text{Conocido}$.-Coordenada deseada del efector.

$y_{ef} = \text{Conocido}$.- Coordenada deseada del efector.

$x_f = x_{ef} - ed \cos \Phi_f$ - Coordenada final del origen de robot móvil.

$y_f = y_{ef} - ed \sin \Phi_f$.- Coordenada final del origen de robot móvil.

ed .- Distancia del centro del eje de rotación de las ruedas traseras al efector.

Φ_f .- Ángulo de orientación del efector final con respecto a la horizontal (Sistema de referencia mundial), puede tomar valores de $-\frac{\pi}{2} < \phi_f < \frac{\pi}{2}$.

$\frac{dy_i}{dx_i} = 0$.- Primera derivada en el punto inicial, es cero por que se inicia en forma horizontal el movimiento.

$\frac{dy_f}{dx_f} = \tan \Phi_f$.- Primera derivada en el punto final.

Para resolver la ecuación (90), se requieren los siguientes datos que se igualaran con las condiciones iniciales.

$$\begin{array}{rcl} x_1 & = & x_i \\ y_1 & = & y_i \\ x_3 & = & x_f \\ y_3 & = & y_f \\ \frac{dy}{dx_1} & = & \frac{dy_i}{dx_i} \\ \frac{dy}{dx_3} & = & \frac{dy_f}{dx_f} \\ x_2 & = & \text{Desconocido} \\ y_2 & = & \text{Desconocido} \end{array}$$

El mínimo número de puntos para lograr posicionar y orientar el efector del robot móvil, son tres. Dos de estos tres puntos, son el punto inicial y el punto final. El tercer punto puede ser cualquier punto en el espacio cartesiano entre estos dos puntos.

Se propone para ubicar el tercer punto el método mostrado en la fig. 3.18. Este método consiste en que a partir de la orientación final deseada y el punto final deseado se traza una línea desde el punto final deseado con la orientación deseada hasta cruzar en el eje X, esta línea se va a ubicar el punto (x_2, y_2) . En fig. 3.19 se muestra la línea que empieza en el punto final y cruza el eje X con la inclinación del ángulo deseado del robot móvil; para elegir un punto en esta línea se realizará una ponderación según el algoritmo de la fig. 3.18.

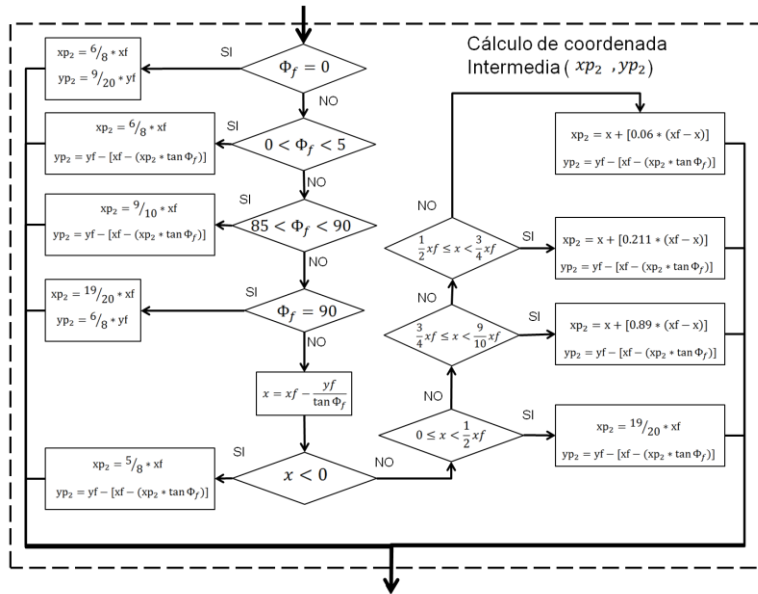


Figura 3.18. Diagrama de flujo para calcular el punto intermedio de los splines cúbicos.

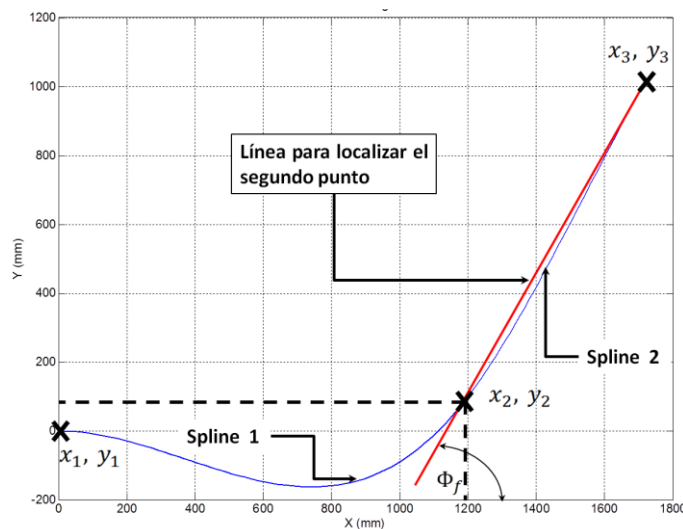


Figura 3.19. Gráfica indicando la localización del segundo punto.

El algoritmo para realizar la trayectoria con splines cúbicos se muestra en la fig. 3.20, donde de entrada se necesita la coordenada y orientación fina del efector. En este algoritmo se segmenta cada función dependiendo de donde se ubique el punto de unión de las dos funciones cúbicas. Una vez que se tengan las constantes de las dos funciones cúbicas, cada Tx se segmenta en “k” partes para realizar los cálculos y obtener los incrementos de rotación y giro de las ruedas del robot móvil.

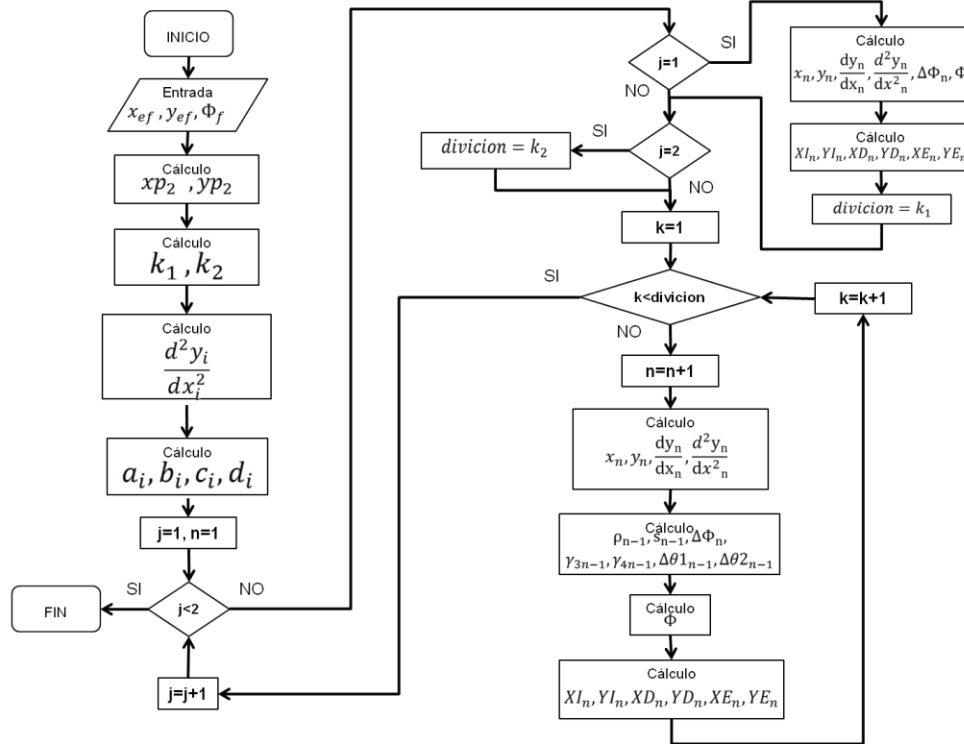


Figura 3.20. Diagrama de flujo principal generación de trayectorias con splines cúbicos.

En la fig. 3.21, se muestra el algoritmo de cómo definir el número de segmentos de cada función spline, dependiendo de donde se ubique el punto (x_2, y_2) .

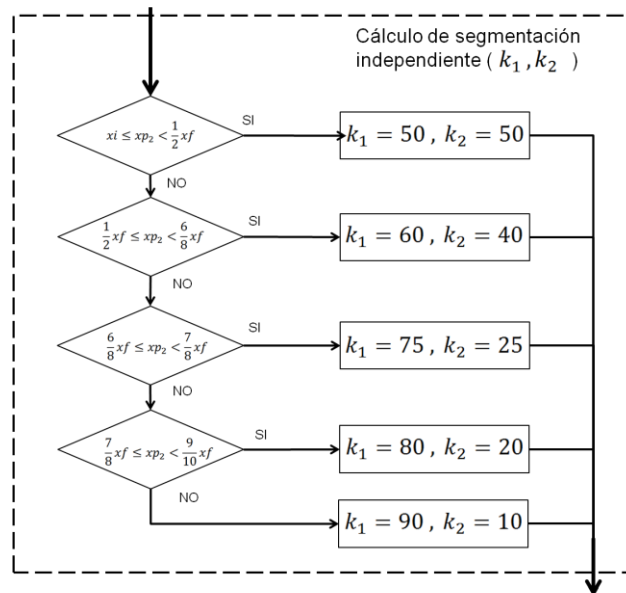


Figura 3.21. Diagrama de flujo para determinar el número de divisiones.

3.7. Validación de los modelos para la generación de trayectorias

La validación de los algoritmos para la generación de trayectorias con polinomios de cuarto orden y con splines cúbicos se programó en Matlab®.

Para las pruebas se considera que el robot móvil lleva un efector en la “punta” de la estructura. Este efector se considera colineal al eje i del robot. Se encuentra ubicado una distancia ed según la fig. 3.6. Este efector es el que se tratará de posicionar en el punto objetivo.

Se consideran dos tipos de pruebas, la primera variando las coordenadas final del efector y manteniendo constante la orientación deseada del robot móvil como se muestra en la fig. 3.22.a) y la segunda variando la orientación deseada del robot móvil y manteniendo constante la coordenada final del efector, como se muestra en la fig. 3.22.b).

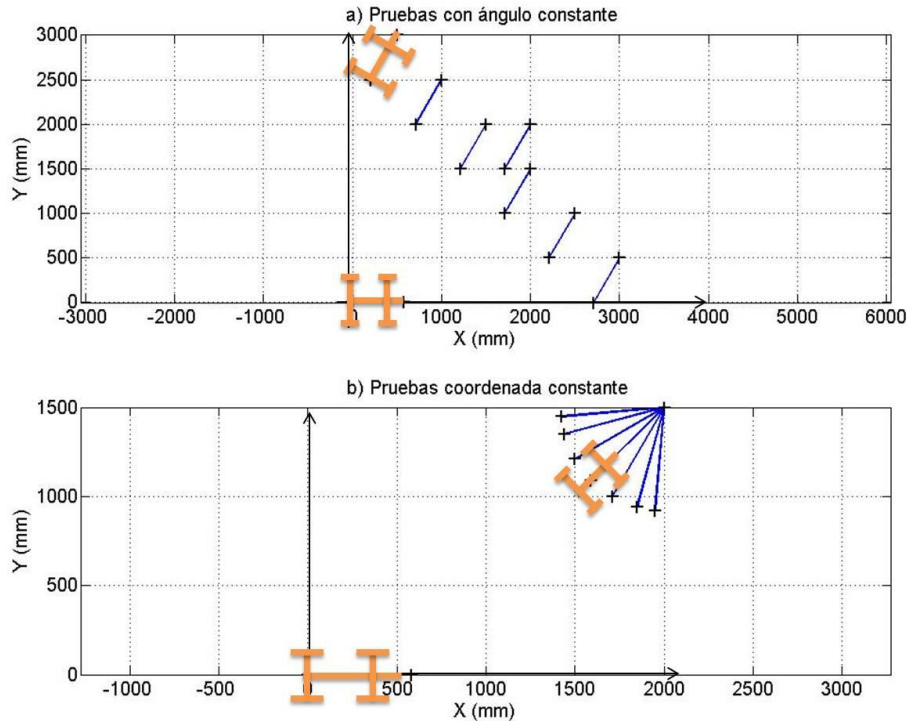


Figura 3.22. a) Esquema de la prueba manteniendo constante la orientación final y variando la posición fina de efector , b) Esquema de la prueba manteniendo constante la coordenada final del efector y variando la orientación del robot móvil .

3.7.1. Validación de trayectorias variando la coordenada deseada del efector final.

Objetivo:

Validar la exactitud de los algoritmos generadores de trayectorias.

Metodología:

Esta prueba consiste en mantener la orientación final del efector constante cambiando la coordenada deseada del efector del robot móvil ver fig. 3.22.a).

Ángulo de orientación final: 60° , entre el eje X del sistema de referencia mundial y el eje i del sistema de referencia del robot.

Coordenadas a evaluar (mm): (500,3000), (1000,2500), (1500,2000), (2000,2000), (2000,1500), (2500,1000), (3000,500).

3.7.1.1. Trayectorias generadas con un polinomio de cuarto orden

En el polinomio de cuarto orden además de variar la coordenada del efector final, se evaluará la exactitud del algoritmo con diferentes números de segmentos.

Número de segmentos a evaluar (N): 5, 10, 15, 50, 100,500.

Se evaluará como influye en la ejecución de la trayectoria la segmentación uniforme y la segmentación fina.

3.7.1.1.1. Segmentación uniforme

Los resultados de dos pruebas representativas se tienen en las tablas 3.1 y 3.2 en ellas se muestran la posición y orientación deseada del efector así como la posición final del origen del robot. Se evalúa el error en la posición del origen del robot móvil así como la posición y orientación del efector final con los diferentes números de segmentos.

En las figuras.3.23 y 3.24, se muestra el trayecto del robot móvil; en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Coordenada final efector X (mm)		1500,00							
Coordenada final efector Y (mm)		2000,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		60,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1210,00							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		1497,71							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1210,00	1497,70	1650,70	1874,80	40,55	0,01	195,92	19,45	7,84
10	1210,00	1497,70	1572,60	1950,40	51,30	0,01	87,93	8,70	3,52
15	1210,00	1497,70	1547,20	1969,60	54,46	0,01	56,14	5,54	2,25
50	1210,00	1497,70	1513,50	1991,90	58,44	0,01	15,74	1,56	0,63
100	1210,00	1497,70	1506,70	1996,10	59,23	0,01	7,75	0,77	0,31
500	1210,00	1497,70	1501,30	1999,20	59,85	0,01	1,53	0,15	0,06

Tabla 3.1. Resultados segmentación uniforme, coordenada 1500,2000(mm)

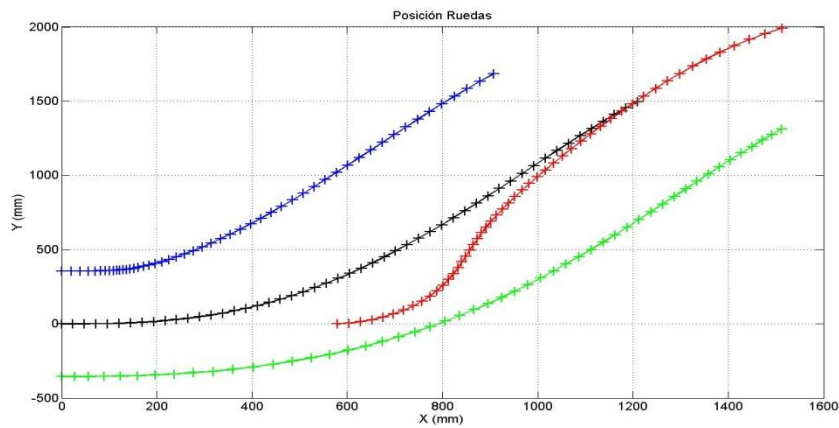


Figura 3.23. Gráfica de segmentación uniforme, coordenada 1500,2000(mm), con 50 segmentos

Coordenada final efector X (mm)		3000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		60,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		2710,00							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		-2,29							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	2710,00	-2,29	2951,20	529,18	65,43	0,00	56,86	-5,43	1,87
10	2710,00	-2,29	2990,80	505,22	61,05	0,00	10,58	-1,05	0,35
15	2710,00	-2,29	2995,80	502,41	60,48	0,00	4,84	-0,48	0,16
50	2710,00	-2,29	2999,60	500,23	60,04	0,00	0,46	-0,04	0,02
100	2710,00	-2,29	2999,90	500,06	60,01	0,00	0,12	-0,01	0,00
500	2710,00	-2,29	3000,00	500,00	60,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.2. Resultados de segmentación uniforme, coordenada 3000,500(mm)

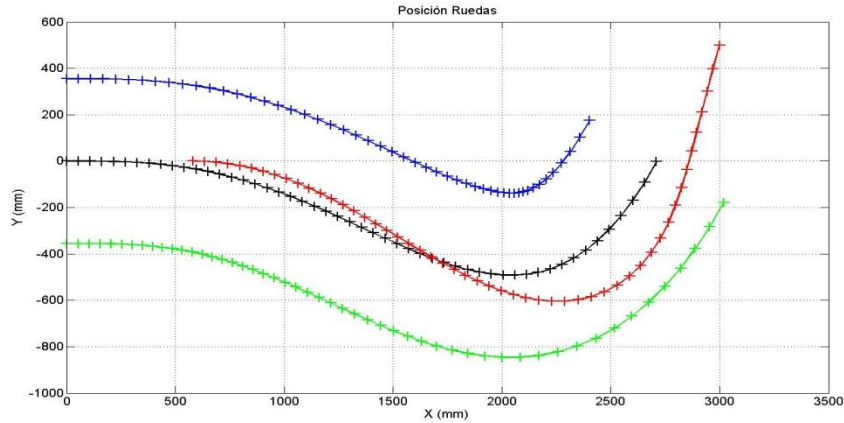


Figura 3.24. Gráfica de segmentación uniforme, coordenada 3000,500(mm), con 50 segmentos

En las tablas 3.1 y 3.2, los resultados muestran que mientras más grande sea el número de segmentos la exactitud mejora y se tiene mejor precisión cuando T_x es mayor a T_y .

3.7.1.1.2. Segmentación fina

Los resultados de dos pruebas representativas se tienen en las tablas 3.3 y 3.4 en ellas se muestran la posición y orientación deseada del efector, como la posición final del origen del robot. Se evalúa el error en la posición del origen del robot móvil así como la posición y orientación del efector final con los diferentes números de segmentos.

Coordenada final efector X (mm)		1500,00							
Coordenada final efector Y (mm)		2000,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		60,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1210,00							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		1497,71							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1210,00	1497,70	1647,40	1878,60	41,05	0,01	190,96	18,95	7,64
10	1210,00	1497,70	1562,70	1958,20	52,55	0,01	75,36	7,45	3,01
15	1210,00	1497,70	1534,60	1978,40	55,97	0,01	40,79	4,03	1,63
50	1210,00	1497,70	1507,50	1995,60	59,14	0,01	8,70	0,86	0,35
100	1210,00	1497,70	1503,30	1998,10	59,62	0,01	3,81	0,38	0,15
500	1210,00	1497,70	1500,60	1999,70	59,93	0,01	0,67	0,07	0,03

Tabla 3.3. Resultados de segmentación fina, coordenada 1500,2000(mm)

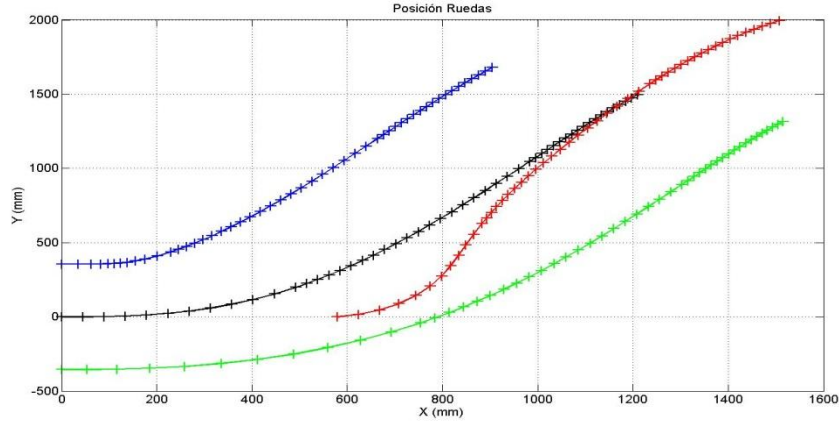


Figura 3.25. Gráfica de segmentación fina, coordenada 1500,2000(mm), con 50 segmentos

En las figs.3.25 y 3.26, se muestra el trayecto del robot móvil, en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Coordenada final efector X (mm)		3000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		60,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		2710,00							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		-2,29							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	2710,00	-2,29	3010,50	493,80	58,80	0,00	12,19	1,20	0,40
10	2710,00	-2,29	3002,80	498,38	59,68	0,00	3,23	0,32	0,11
15	2710,00	-2,29	3011,50	493,19	58,68	0,00	13,36	1,32	0,44
50	2710,00	-2,29	3005,30	496,88	59,39	0,00	6,15	0,61	0,20
100	2710,00	-2,29	3003,40	498,05	59,62	0,00	3,92	0,38	0,13
500	2710,00	-2,29	3000,80	499,53	59,91	0,00	0,93	0,09	0,03

Tabla 3.4. Resultados de segmentación fina, coordenada 3000,500(mm)

En las tablas 3.3 y 3.4, los resultados indican que mientras más grande sea el número de segmentos la exactitud mejora. Se tiene mejor precisión cuando T_x es mayor a T_y .

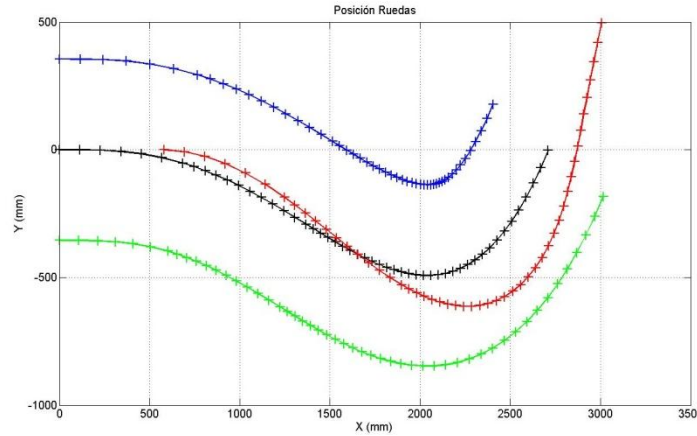


Figura 3.26. Gráfica de segmentación fina, coordenada 3000,500(mm), con 50 segmentos

3.7.1.1.3. Conclusiones

El seguimiento de la trayectoria del origen del robot móvil, se realiza con exactitud, pero la precisión de posición y orientación del efector dependen de la distancia T_x en relación de la distancia T_y .

Para los puntos donde T_x , es menor o igual a T_y , se encontró que la segmentación fina tiene una mejor exactitud que la segmentación uniforme.

Para los puntos donde T_y , es menor a T_x , se encontró que la segmentación uniforme tiene una mejor exactitud que la segmentación fina.

Con un mayor número de segmentos se mejora la exactitud de la posición final del efector. Esto sucede porque el número de N segmentos para dividir T_x , influye directamente en el cálculo del radio instantáneo de curvatura (ec.50), si N es muy grande la precisión aumenta porque $\Delta x \rightarrow dx$. Acorde a la ecuación (50), entre más próximo sea x_n a x_{n+1} , la suposición de que ρ_n y ρ_{n+1} sean iguales es más aproximada a la realidad. Con estos resultados se consideró que 50 segmentos es el mínimo para tener resultados por debajo del 1% de error.

$$\text{Con } N \gg 50, \text{ entonces } \rho_n \cong \rho_{n+1} \quad (101)$$

$$\text{Con } N \ll 50, \text{ entonces } \rho_n \not\cong \rho_{n+1} \quad (102)$$

La precisión aumenta, conforme se incrementa el número de segmentos, para la modelación experimental se tomarán 100 segmentos.

3.7.1.2. Trayectorias generadas con splines cúbicos

Para realización de los splines cúbicos, se tomaron 100 segmentos como el número de segmentos a utilizar.

En las figs. 3.27 y 3.28, se observa el trayecto del robot móvil, en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Prueba	Coordenada deseada efector (mm)		Orientación deseada efector(grados)	Coordenada modelación efector (mm)		Orientación modelación efector(grados)	Error en posición (%)	Error en orientación (grados)
	x	y		x	y			
1	500	3000	60	784,89	2574,5	7,61	16,84	52,39
2	1000	2500	60	1079,7	2444,6	50,40	3,60	9,60
3	1500	2000	60	1509,9	1994,2	58,87	0,46	1,13
4	2000	2000	60	2002,7	1998,4	59,69	0,11	0,31
5	2000	1500	60	1995,4	1502,6	60,52	0,21	-0,52
6	2500	1000	60	2494,6	1003,1	60,61	0,23	-0,61
7	3000	500	60	3000,6	499,64	59,93	0,02	0,07

Tabla 3.5. Resultados de splines cúbicos con orientación constante

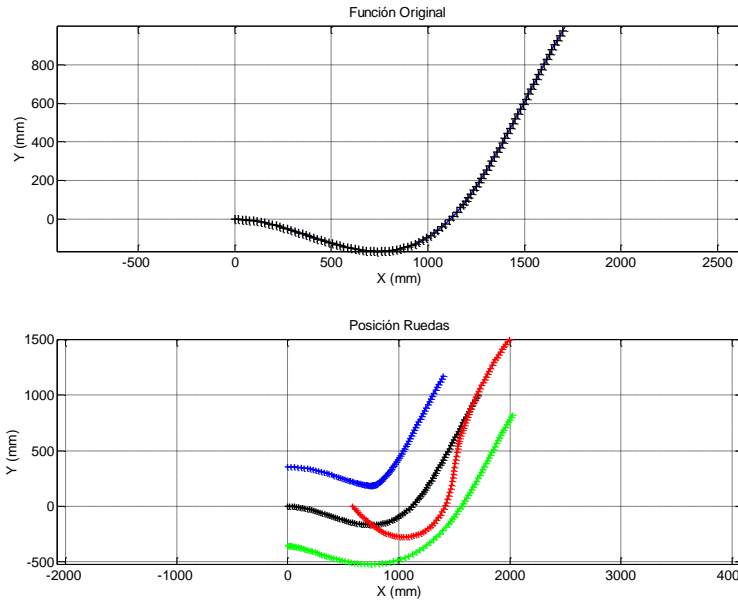


Figura 3.27. Gráfica de splines cúbicos, coordenada 2000,1500(mm)

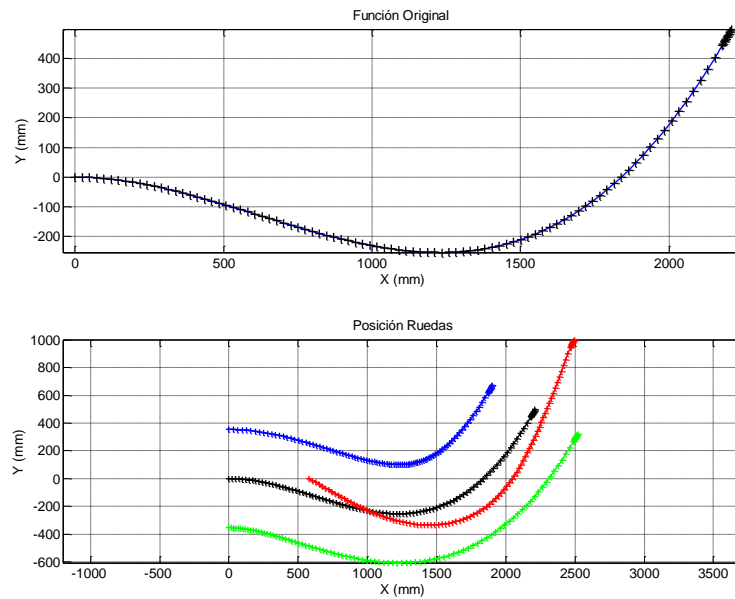


Figura 3.28. Gráfica de splines cúbicos, coordenada 2500,1000(mm)

En la tabla 3.5, se encuentran los resultados que se obtuvieron variando las coordenadas del efector final. En esta tabla se muestra el error del ángulo de orientación y el porcentaje de error en posición.

3.7.1.2.1. Conclusiones

El seguimiento de la trayectoria del origen del robot móvil, se realiza con exactitud, pero la precisión de posición y orientación del efector dependen de la distancia T_x en relación de la distancia T_y .

Para los puntos donde T_x es menor a $T_y/3$, se encontró que la exactitud presenta un error en posición mayor al 1%. Para los puntos donde T_x , es mayor a $T_y/3$, se encontró que el error de posición debajo del 1%.

3.7.2. Validación de trayectorias variando la orientación deseada del efector final.

Objetivo:

Validar la exactitud de los algoritmos generadores de trayectorias.

Metodología:

Esta prueba consiste en dejar constante la posición final del efector, evaluando diferentes orientaciones deseadas del efector del robot móvil ver fig. 3.22.b).

Coordenada final efector (mm): 2000,1500.

Orientaciones a evaluar (°): 5, 15, 30, 45, 60, 75, 85.

3.7.2.1. Trayectorias generadas con un polinomio de cuarto orden

En el polinomio de cuarto orden además de variar la orientación final del efector, se evaluará la exactitud del algoritmo con diferentes números de segmentos.

Número de segmentos a evaluar (N): 5, 10, 15, 50, 100,500.

Se evaluará como influye en la ejecución de la trayectoria la segmentación uniforme y segmentación fina.

3.7.2.1.1. Segmentación uniforme

Los resultados de dos pruebas representativas se tienen en las tablas 3.6 y 3.7 en ellas se muestran la posición y orientación deseada del efector, así como la posición final del origen del robot. Se evalúa el error en la posición del origen del robot móvil así como la posición y orientación del efector final con los diferentes números de segmentos.

En las figs.3.29 y 3.30, se muestra el trayecto del robot móvil: en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Coordenada final efector X (mm)		2000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		1500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		45,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1589,88							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		1089,88							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1589,90	1089,90	2084,30	1393,20	31,53	0,03	136,06	13,47	5,44
10	1589,90	1089,90	2039,90	1455,80	39,12	0,03	59,55	5,88	2,38
15	1589,90	1089,90	2025,80	1472,50	41,28	0,03	37,71	3,72	1,51
50	1589,90	1089,90	2007,30	1492,50	43,97	0,03	10,47	1,03	0,42
100	1589,90	1089,90	2003,60	1496,40	44,49	0,03	5,09	0,51	0,20
500	1589,90	1089,90	2000,70	1499,30	44,90	0,03	0,99	0,10	0,04

Tabla 3.6. Resultados de la segmentación uniforme, ángulo 45°

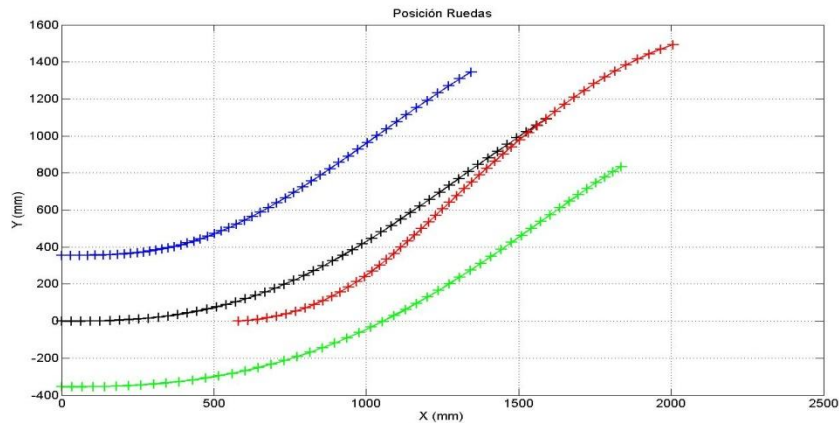


Figura 3.29. Gráfica de segmentación uniforme, ángulo 45°, 50 segmentos

Coordenada final efector X (mm)		2000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		1500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		75,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1849,88							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		939,76							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1849,90	939,76	2076,80	1473,50	66,97	0,02	81,24	8,03	3,25
10	1849,90	939,76	2051,50	1483,60	69,66	0,02	54,05	5,34	2,16
15	1849,90	939,76	2039,30	1488,00	70,94	0,02	41,09	4,06	1,64
50	1849,90	939,76	2014,10	1496,00	73,55	0,02	14,66	1,45	0,59
100	1849,90	939,76	2007,30	1498,00	74,25	0,02	7,57	0,75	0,30
500	1849,90	939,76	2001,50	1499,60	74,85	0,02	1,55	0,15	0,06

Tabla 3.7. Resultados de la segmentación uniforme, ángulo 75°

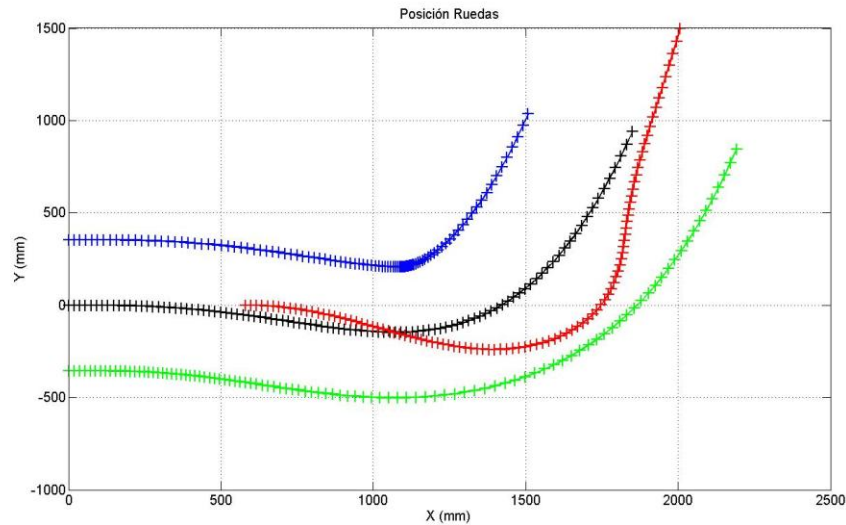


Figura 3.30. Gráfica de segmentación uniforme, ángulo 75° , 100 segmentos

En las tablas 3.1 y 3.2, los resultados muestran que mientras más grande sea el número de segmentos la exactitud mejora.

3.7.2.1.2. Segmentación fina

Los resultados de dos pruebas representativas se tienen en las tablas 3.8 y 3.9 en ellas se muestran la posición y orientación deseada del efector, así como la posición final del origen del robot. Se evalúa el error en la posición del origen del robot móvil así como la posición y orientación del efector final con los diferentes números de segmentos.

En las figs.3.31 y 3.32, se muestra el trayecto del robot móvil: en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Coordenada final efector X (mm)		2000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		1500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		45,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1589,88							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		1089,88							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1589,90	1089,90	2079,40	1401,00	32,44	0,03	126,91	12,57	5,08
10	1589,90	1089,90	2026,10	1472,10	41,23	0,03	38,20	3,77	1,53
15	1589,90	1089,90	2011,40	1488,30	43,38	0,03	16,34	1,62	0,65
50	1589,90	1089,90	2000,90	1499,10	44,88	0,03	1,27	0,12	0,05
100	1589,90	1089,90	2000,00	1500,00	44,99	0,03	0,00	0,01	0,00
500	1589,90	1089,90	2000,00	1500,00	45,00	0,03	0,00	0,00	0,00

Tabla 3.8. Resultados de la segmentación fina, ángulo 45°

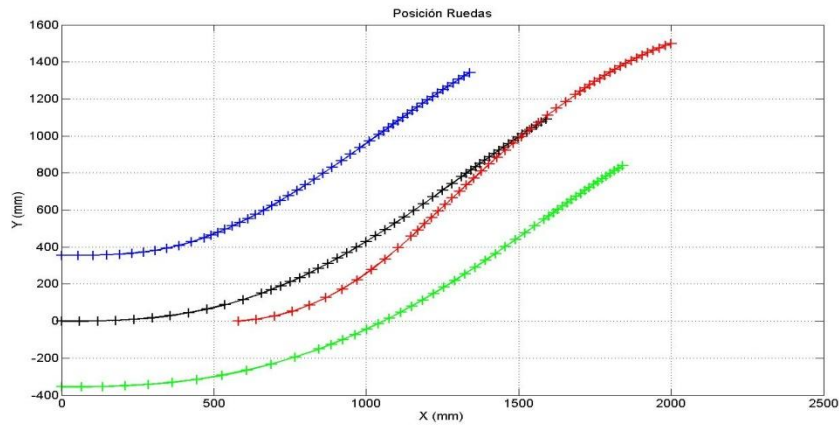


Figura 3.31. Gráfica de segmentación fina, ángulo 45°, 50 segmentos

Coordenada final efector X (mm)		2000,00							
Coordenada final efector Y (mm)		1500,00							
Ángulo orientación final Φ (°)		75,00							
Distancia del efector(mm)		580,00							
Coordenada final origen robot móvil X (mm)		1849,88							
Coordenada final origen robot móvil Y (mm)		939,76							
N	Xcf mm	Ycf mm	Xef mm	Yef mm	Φ f mm	Error centro mm	Error efector mm	Error ángulo grados	Error efector %
5	1849,90	939,76	2082,70	1471,00	66,33	0,02	87,64	8,67	3,51
10	1849,90	939,76	2059,60	1480,50	68,81	0,02	62,71	6,19	2,51
15	1849,90	939,76	2043,10	1486,60	70,54	0,02	45,14	4,46	1,81
50	1849,90	939,76	2017,50	1495,00	73,21	0,02	18,20	1,79	0,73
100	1849,90	939,76	2009,10	1497,50	74,07	0,02	9,44	0,93	0,38
500	1849,90	939,76	2001,90	1499,50	74,81	0,02	1,96	0,19	0,08

Tabla 3.9. Resultados de la segmentación fina, ángulo 75°

En las tablas 3.8 y 3.9, los resultados indican que mientras más grande sea el número de segmentos la exactitud mejora.

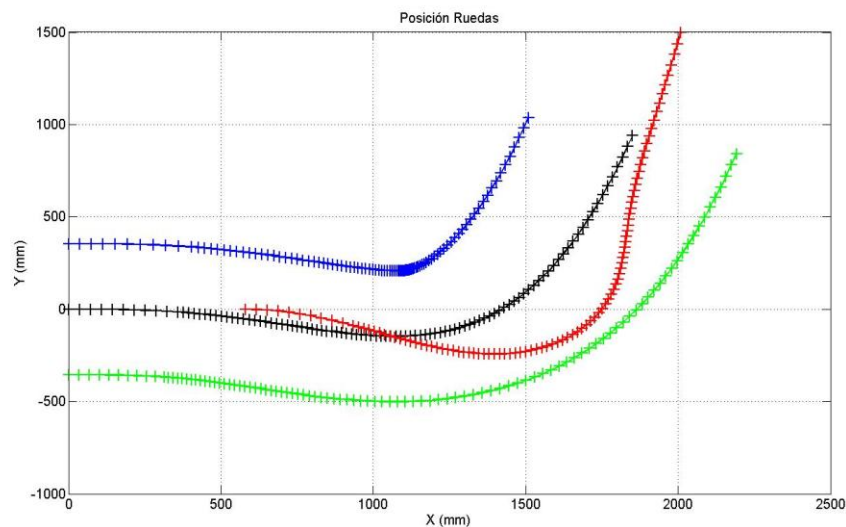


Figura 3.32. Gráfica de segmentación fina, ángulo 75°, 100 segmentos

3.7.2.1.3. Conclusiones

Para la segmentación uniforme a partir de 50 segmentos y ángulos menores del 45°, se tienen un error mayor al 1%. Para la segmentación fina a partir de 50 segmentos y ángulos menores de 15°, se tienen un error mayor al 1%.

Para esta coordenada en particular la segmentación fina es mejor que la segmentación uniforme en ángulos menor o igual a 60°. Para ángulos mayores de 85°, para ambos tipos de segmentaciones se tiene un error mayor al 1%. La precisión mejora, aumentando el número de segmentos, para la modelación experimental la trayectoria será generada en base a 100 segmentos.

3.7.2.2. Trayectorias generadas con splines cúbicos

Para realizar los splines cúbicos, se tomaron 100 segmentos como el número de segmentos a utilizar.

En las figs. 3.33 y 3.34, se observa el trayecto del robot móvil: en color negro el recorrido del origen del robot móvil, en color rojo el recorrido del efector, en color azul el recorrido de la rueda izquierda trasera y en color verde el recorrido de la rueda derecha trasera.

Prueba	Coordenada deseada efector (mm)		Orientación deseada efector(grados)	Coordenada modelación efector (mm)		Orientación modelación efector(grados)	Error en posición (%)	Error en orientación (grados)
	x	y		x	y			
1	2000	1500	5	2002,2	1455,3	0,5828	1,79	4,42
2	2000	1500	15	2008,2	1465,1	11,4579	1,43	3,54
3	2000	1500	30	2010,2	1481,6	27,9182	0,84	2,08
4	2000	1500	45	2004,4	1495,5	44,3793	0,25	0,62
5	2000	1500	60	1995,4	1502,6	60,5222	0,21	-0,52
6	2000	1500	75	1991,9	1502,1	75,8297	0,33	-0,83
7	2000	1500	85	2024,9	1497,3	82,5299	1,00	2,47

Tabla 3.10. Resultados de spline cúbicos con coordenada constante

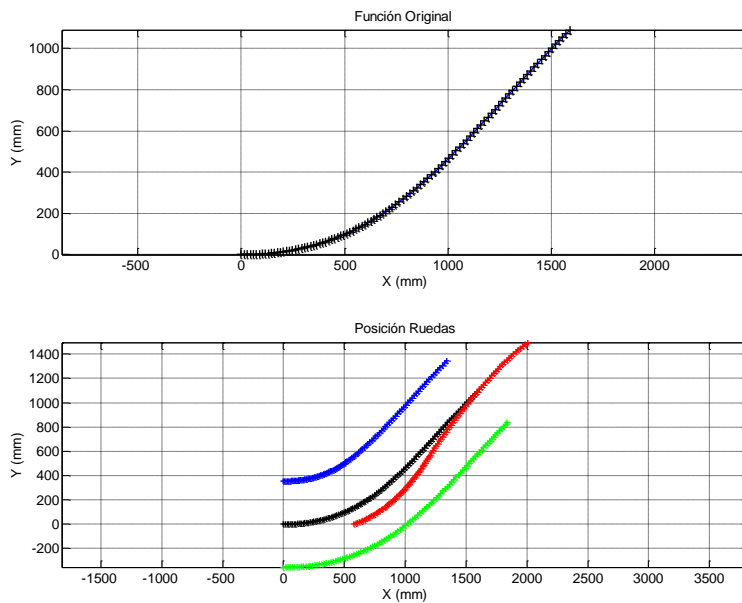


Figura 3.33. Gráfica de splines cúbicos, ángulo 45°

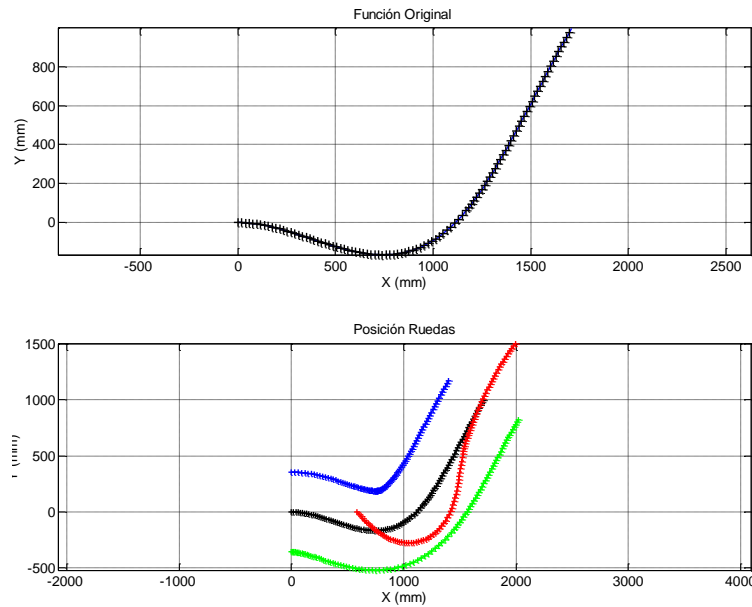


Figura 3.34. Gráfica de splines cúbicos, ángulo 60°

En la tabla 3.10, se encuentran los resultados que se obtuvieron variando las coordenadas del efector final. En esta tabla se tabula el error del ángulo de orientación y el porcentaje de error en posición.

3.7.2.2.1. Conclusiones

En las trayectorias basadas en splines cúbicos para orientaciones menores a ángulos de 30° se tiene un error en posición mayor al 1%. En las trayectorias basadas en splines cúbicos para orientaciones mayores a ángulos de 85° se tiene un error en posición mayor al 1%.

3.8. Análisis de resultados

En esta sección se presentan las conclusiones comparando los resultados de las dos formas de generar las trayectorias, que son por medio de un polinomio de cuarto orden y con splines cúbicos.

La tabla 3.11 muestra los resultados por porcentaje de error en posición y el error en grados para los casos evaluados. Esta tabla corresponde a las pruebas con orientación constante y variando la coordenada objetivo, con 100 segmentos. Se observa que en las pruebas que ofrece una mejor precisión la trayectoria generada por un polinomio de cuarto orden, esto debido a que es generado por sólo una curva. Mientras que la trayectoria de splines cúbicos, va mejorando sus aproximaciones conforme la distancia Tx , incrementa.

Prueba	Coordenada deseada efector (mm)		Orientación deseada efector (grados)	Polinomio de cuarto orden				Spline cúbicos	
				Segmentación uniforme		Segmentación fina		Error en posición (%)	Error en orientación (grados)
	x	y		Error en posición (%)	Error en orientación (grados)	Error en posición (%)	Error en orientación (grados)		
1	500	3000	60	7,40	22,37	5,64	17,00	16,84	52,39
2	1000	2500	60	1,30	3,47	1,16	3,09	3,60	9,60
3	1500	2000	60	0,31	0,77	0,15	0,38	0,46	1,13
4	2000	2000	60	0,10	0,27	0,01	0,03	0,11	0,31
5	2000	1500	60	0,01	0,02	0,01	0,02	0,21	-0,52
6	2500	1000	60	0,00	0,00	0,09	0,24	0,23	-0,61
7	3000	500	60	0,00	-0,01	0,13	0,38	0,02	0,07

Tabla 3.11. Comparativa de resultados con orientación constante, 100 segmentos

Las tablas 3.11 y la 3.12, las casillas marcadas con azul muestran los mejores resultados en porcentaje de error para la posición.

Prueba	Coordenada deseada efector (mm)		Orientación deseada efector (grados)	Polinomio de cuarto orden				Spline cúbicos	
				Segmentación uniforme		Segmentación fina		Error en posición (%)	Error en orientación (grados)
	x	y		Error en posición (%)	Error en orientación (grados)	Error en posición (%)	Error en orientación (grados)		
1	2000	1500	5	1,89	4,66	1,11	2,75	1,79	4,42
2	2000	1500	15	1,46	3,61	0,83	2,05	1,43	3,54
3	2000	1500	30	0,75	1,86	0,34	0,85	0,84	2,08
4	2000	1500	45	0,20	0,51	0,00	0,01	0,25	0,62
5	2000	1500	60	0,01	0,02	0,01	0,02	0,21	-0,52
6	2000	1500	75	0,30	0,75	0,38	0,93	0,33	-0,83
7	2000	1500	85	0,36	0,88	0,31	0,77	1,00	2,47

Tabla 3.12. Comparativa de resultados con coordenada constante, 100 segmentos

En la tabla 3.12 observamos que para ángulos menores o iguales a 15° , el porcentaje de error en la posición aumenta y para ángulos mayores a 85° el porcentaje de error en la posición aumenta. Con la información contenida en las tablas 3.11 y 3.12, se clasificó las zonas donde las trayectorias tendrán errores en precisión mayores al 1%.

En la fig. 3.35, se muestra la primera clasificación de zonas, por ángulo de orientación final. La zona marcada con rojo es donde se presentan errores en posición mayores al 1%. Y en la zona verde serán donde se presentan errores en posición menores al 1%.

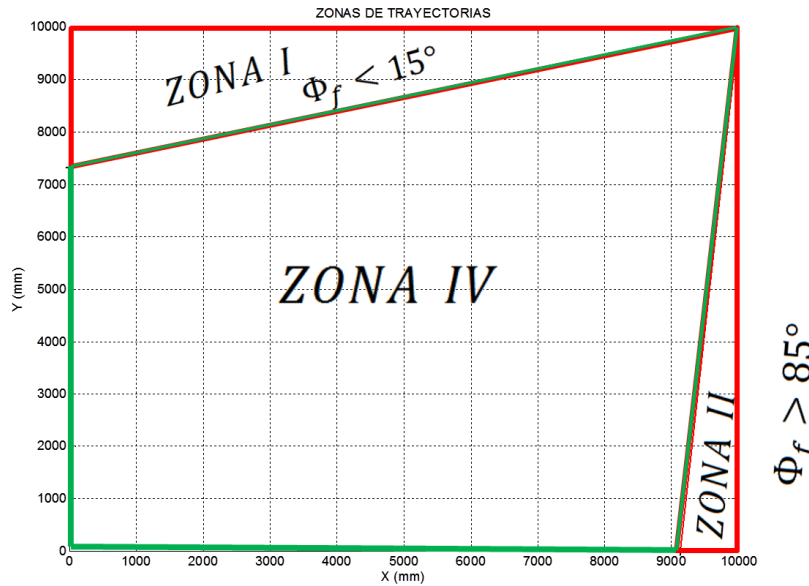


Figura 3.35. Clasificación de las zonas dependiendo su ángulo

Zona I; Para trayectorias con ángulos menores a 15 grados.

Zona II; Para trayectorias con ángulos mayores a 85 grados.

En la fig. 3.35, se muestra la segunda clasificación de zonas, por la distancia T_x en relación de la distancia T_y . Esto es tomando en cuenta la distancia T_y constante y el valor que debe tener T_x para tener un error menor al 1% en posición.

Zona III; Para trayectorias con T_x menor a $T_y/3$.

Zona IV; Para todas las trayectorias que tendrán un error en posición menor al 1%.

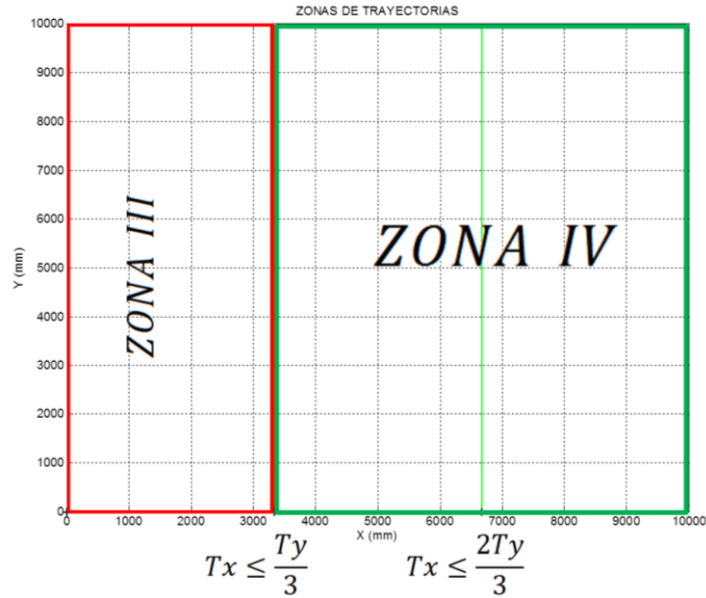


Figura 3.36. Clasificación de las zonas dependiendo Tx

En la fig. 3.37, se sobreponen las fig. 3.32 y 3.36, para determinar la zona IV, que es la comprendida en color verde. Con esta clasificación podemos predecir si la coordenada y orientación final del efector del robot móvil, tendrá un error en posición menor al 1%,

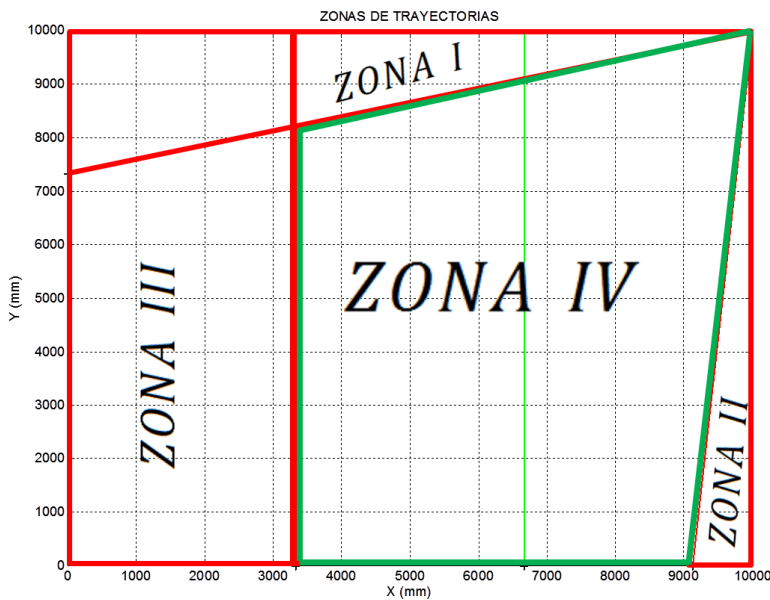


Figura 3.37. Clasificación de las zonas

En este capítulo se analizó a nivel modelación dos diferentes formas de generar las trayectorias del robot móvil, una basada en polinomios de cuarto orden y otra en splines cúbicos.

Se plantearon las trayectorias de tal forma que las funciones fueran independientes en el tiempo. Como resultado dio que la precisión de las trayectorias ahora dependen del número de segmentos de arcos de circunferencia con los que se reconstruye la curva de la función.

Se encontró que con mayor número de segmentos en los que se divide T_x , se tiene una precisión mayor. Para implementación en las pruebas experimentales se recomienda tener un número de segmentos mayor o igual a 50.

Se obtuvo un error menor al 1% en las trayectorias, cuando las distancia T_x , es mayor a un tercio de la distancia T_y y teniendo un ángulo de orientación final entre 15° y 85° .

Se combinarán la segmentación fina y la segmentación uniforme en un sólo algoritmo para mejorar la precisión de la generación de trayectorias con un polinomio de cuarto orden.

Se obtuvo un menor porcentaje de error en posición con en el polinomio de cuarto orden que con el spline cúbico. En el polinomio de cuarto orden se usa solo una función para generar la trayectoria con dos puntos por lo cual se puede saber si es "suave" la curvatura desde un inicio y realizar diferentes tipos de segmentación. En el spline cúbico se genera con tres puntos y son dos funciones con diferentes parámetros; el punto intermedio define las características de las dos funciones cúbicas que conforman el spline; la precisión del algoritmo depende de la ubicación de este punto y los M valores que puede tener. El algoritmo generador de trayectorias de spline cúbicos se generalizó para diferentes coordenadas dentro del primer cuadrante cartesiano.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se discutirán los experimentos de validación para las trayectorias modeladas y para el desempeño del robot móvil. El principal objetivo es evaluar experimentalmente las formas de trayectorias (ver Capítulo III) que son:

- Trayectorias basadas en un polinomio de cuarto orden.
- Trayectorias basadas en splines cúbicos.

La manera de evaluar las trayectorias es midiendo la posición y orientación final del efector. Esta medición se realizó físicamente comparando una marca que establece la coordenada deseada y un indicador que proyecta la posición del efector final del robot móvil en el campo de pruebas (sistema coordenado mundial (x, y)).

Las pruebas se realizaron en un ambiente estructurado, en la fig. 4.1 se muestra el lugar de las pruebas así como una coordenada preestablecida en $(2000, 1500)$ mm como punto objetivo en las pruebas.

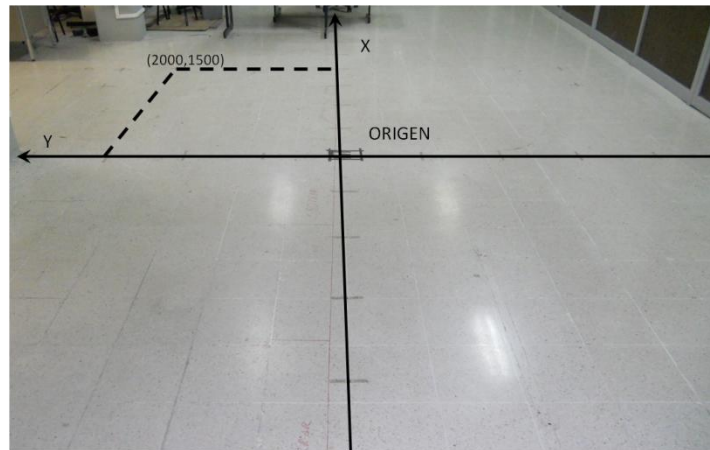


Figura 4.1. Ambiente controlado para las pruebas del robot CIEP_1

Se realizaron ocho experimentos, de los cuales uno se realizó con la configuración del robot con dirección tipo Ackerman y las otras siete con la configuración del robot con dirección tipo diferencial, con dos ruedas de tracción y una rueda “loca”.

Para el primer experimento se generó la trayectoria por medio de un polinomio de cuarto orden para llegar al punto objetivo y se utilizó la configuración que se muestra en la figura 1.10.

El segundo experimento se realizó con dirección tipo diferencial, con dos ruedas de nylamind y se acondicionó una rueda de 200 mm de diámetro y un espesor de 100 mm como rueda “loca”.

Los experimentos del 3 al 8 se realizaron con dirección tipo diferencial, con dos ruedas de tracción y se acondicionó una rueda de 100 mm de diámetro de radio y un espesor de 25 mm como rueda “loca”.

La forma en que se realizaron las pruebas, fue mediante los siguientes pasos:

1. Se colocó el robot móvil en el espacio de trabajo.
2. Se alineó el eje i del robot móvil con el eje X del sistema de referencia mundial. El frente del robot móvil se orienta hacia el valor positivo del eje X.
3. Se alineó, el eje j del robot móvil con el eje Y del sistema de referencia mundial, esta es la posición inicial del robot móvil al iniciar la prueba.
4. Se ejecutó el programa de generación de trayectorias seleccionado.
5. Se estableció la coordenada objetivo del efector del robot móvil.
6. Se estableció la orientación objetivo del efector final.
7. Se enviaron los incrementos angulares de las ruedas al controlador del robot móvil y se inició el movimiento.
8. Se midió la distancia entre el lugar donde llegó el efector y el punto objetivo.
9. Se midió la orientación del efector (el efector es paralelo al eje i del robot móvil) con respecto al eje X del sistema de referencia mundial.

En la siguientes secciones se presentan los resultados de las pruebas, se discutirá la precisión de llegada del efector del robot móvil, y la repetibilidad de las mismas.

4.1. Pruebas con dirección tipo Ackerman

En las pruebas con la configuración que utiliza la dirección de tipo Ackerman sólo se realizaron con la trayectoria basada en el polinomio de cuarto orden. El objetivo de esta prueba es evaluar el algoritmo de control de la dirección.

4.1.1. Verificación experimental 1

Objetivo:

Probar el robot móvil en su configuración de dirección tipo Ackerman, para probar la funcionalidad del algoritmo de control de la dirección, utilizando una trayectoria generada con un polinomio de cuarto orden.

Metodología:

Ubicar el efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada, enviando los incrementos paso a paso.

En la fig. 4.2 se muestra al robot móvil, en su configuración de dirección tipo Ackerman. En esta configuración se tienen las ruedas de diámetro de 200 mm con un recubrimiento de neopreno de 3 mm, para disminuir el deslizamiento entre la rueda de aluminio y la superficie lisa. Se simula que el efector se coloca al frente del robot móvil, colineal al eje i del robot móvil, la distancia entre la proyección del efector en el campo de prueba y la proyección del origen del robot móvil es de 580mm.



Figura 4.2. Configuración de dirección Ackerman robot CIEP_1

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000,1500

Orientación final del efector (grados): 60

Distancia del efector (mm):580

Número de segmentos de la prueba: 50

Resultados:

Por modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 2000.4, 1499.8

Orientación final del efector (grados): 59.95

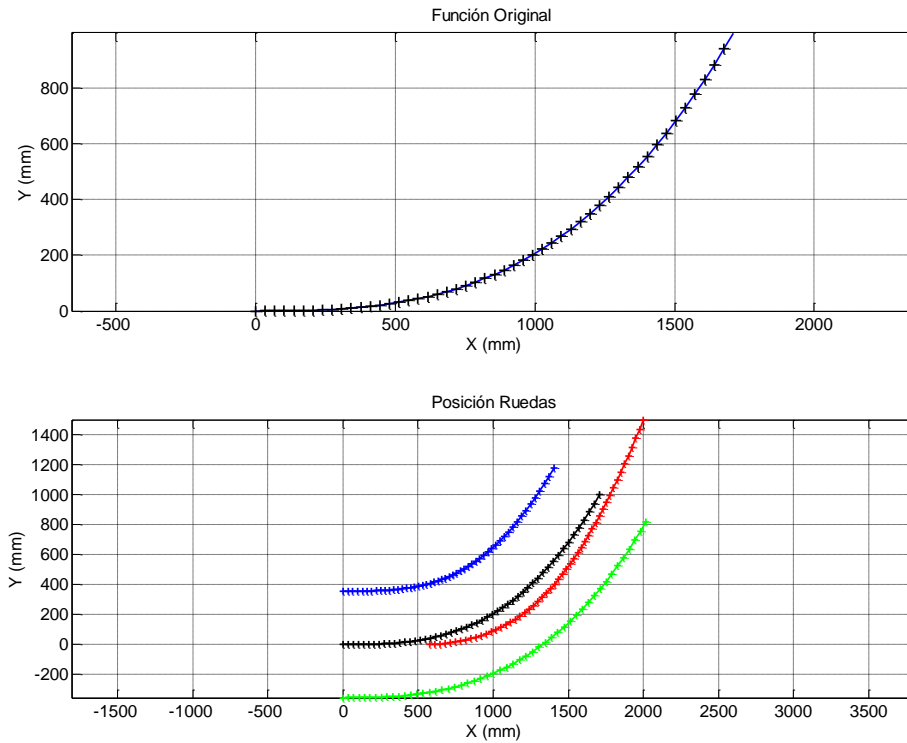


Figura 4.3. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda derecha, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig. 4.3 se muestra el recorrido teórico, que realiza el robot móvil, la línea color negro es el recorrido del origen del robot móvil, la trayectoria se planea en base al recorrido que realiza el punto medio del eje que une las ruedas motrices (origen del robot móvil). Esta figura nos sirve de base para observar el tipo de recorrido que deberá realizar el robot móvil.

En la fig. 4.4 se muestra en las gráficas el valor de los ángulos (en grados) $\theta_1, \theta_2, \gamma_3, \gamma_4$, a lo largo de cada segmento; los ángulos γ_3, γ_4 son el giro de la dirección de las ruedas delanteras; los ángulos θ_1, θ_2 son el giro de las ruedas motrices.

Esta prueba se realizó en una secuencia de movimiento paso-paso (ver sección 2.3.3). En esta secuencia se realiza primero los movimientos de las ruedas de dirección y una vez terminada se ejecuta el movimiento de las ruedas de tracción, para cada segmento.

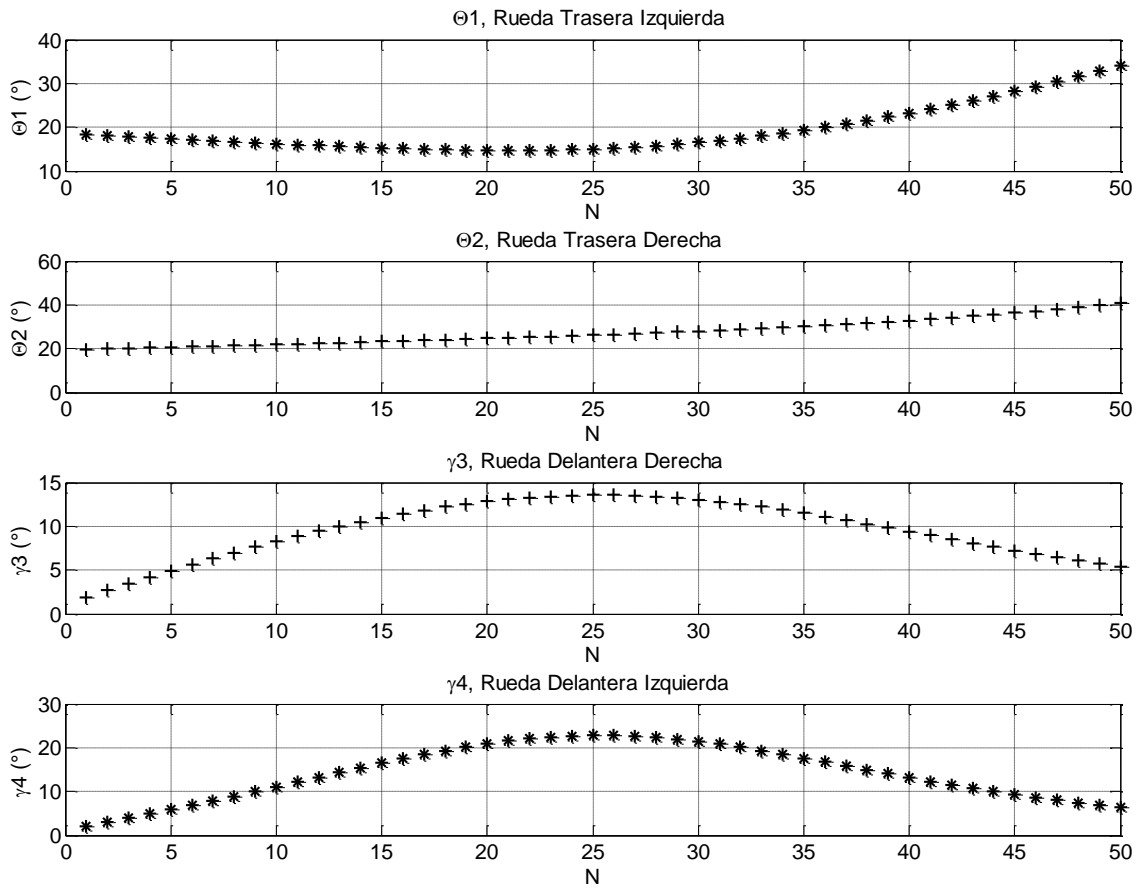


Figura 4.4. El valor de los incrementos para las ruedas de tracción y dirección.

En la fig. 4.5 se muestra cómo se llevara acabo las mediciones, se realizó la medición de la distancia entre el efector final y la marca de la posición deseada. El indicador del efector se sujeta en la parte frontal del robot móvil colineal al eje i del robot móvil. En esta figura se muestra también la medición del ángulo para determinar la orientación del efector final.

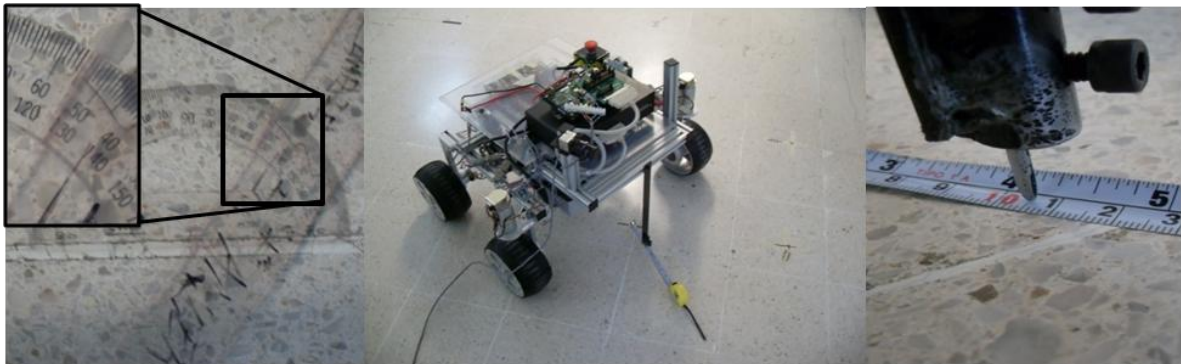


Figura 4.5. Medición de la proyección del efector. (Sexta prueba de validación)

Para este tipo de experimentos se realizaron siete pruebas, en las cuales el resumen de resultados se encuentra en la tabla 4.1. En esta tabla se muestra el error en el ángulo de orientación y el error distancia. El error en distancia se define como la distancia entre el punto objetivo y el efector final.

Prueba	Angulo deseado efector (°)	Angulo obtenido efector (°)	Error distancia (mm)	Error en angulo (°)
1	59,95	-	140	-
2	59,95	55	115	5
3	59,95	59	117	1,0
4	59,95	65	217	-5
5	59,95	48	450	12
6	59,95	55	105	5
7	59,95	64	200	-4

Tabla 4.1. Resultados experimentales polinomio de cuatro grados de libertad

Conclusiones:

Los resultados obtenidos no fueron los esperados al ser los cercanos al objetivo los siguientes:

- La mejor aproximación al punto objetivo se obtuvo en la sexta prueba con 105 mm y con un error en la orientación de 5°.
- La mejor orientación fue en la tercera prueba con 59°, y con un error en posición de 117 mm.

La condición mecánica del robot no permitió lograr una mejoría en los resultados, ya que los motores que se tienen instalados desde un principio en la suspensión móvil no son los adecuados en términos de potencia.

Se dejó aquí el estudio de ejecución de trayectorias con el robot móvil CIEP_1 utilizando la dirección tipo Ackerman, por las siguientes causas:

- Se tenían problemas de control debido a las inercias del sistema; el robot móvil tiene un peso aproximado de 90 kilos. Y los motores actuales no cuentan con la potencia suficiente.

4.2. Dirección tipo diferencial (*uniciclo*)

La dirección tipo diferencial, viene dada por la diferencia que se puede lograr en desplazamiento angular entre las ruedas de tracción. En esta configuración además se cuenta con una rueda de soporte.

La rueda de soporte, debe ser una rueda del tipo “loca”, consiste en una rueda que no opone resistencia a los giros, productos de un cambio de dirección y debe rotar libremente; para ser una rueda “loca”, el eje de rotación y el eje de giro deben estar perpendiculares entre sí pero no deben cruzarse.

Se cambiaron las ruedas de tracción por unas ruedas de nylamind negro, de radio de 54.5 mm y un ancho de 25mm. Las anteriores eran ruedas de aluminio de diámetro de 200mm. Se realizó el cambio para aprovechar de mejor manera el torque de salida de los motores. La forma de enviar el movimiento al robot móvil desde la programación en C++, fue en movimiento secuencial (ver, sección 2.2.3).

4.2.1 Verificación experimental 2

Objetivo:

Validar del algoritmo de generación de trayectorias con un polinomio de cuarto orden, para evaluar la precisión del efector final, en una configuración del robot móvil con tracción trasera y la rueda delantera de apoyo de tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

En la fig. 4.6 se muestra la configuración del robot para esta prueba. Con una rueda “loca” de diámetro de 200 mm y espesor de 100 mm.



Figura 4.6. Configuración mecánica para las pruebas

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000, 1500

Orientación final del efector (grados): 60

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):0

Número de segmentos en la prueba: 100

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 2000, 1500

Orientación final del efector (grados): 59.8613

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 2660.84

En la fig.4.7 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura el efector y el origen del robot coinciden, para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron diez pruebas de las cuales se registró:

Para evaluar la precisión:

- el ángulo de orientación final del robot móvil.
- la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

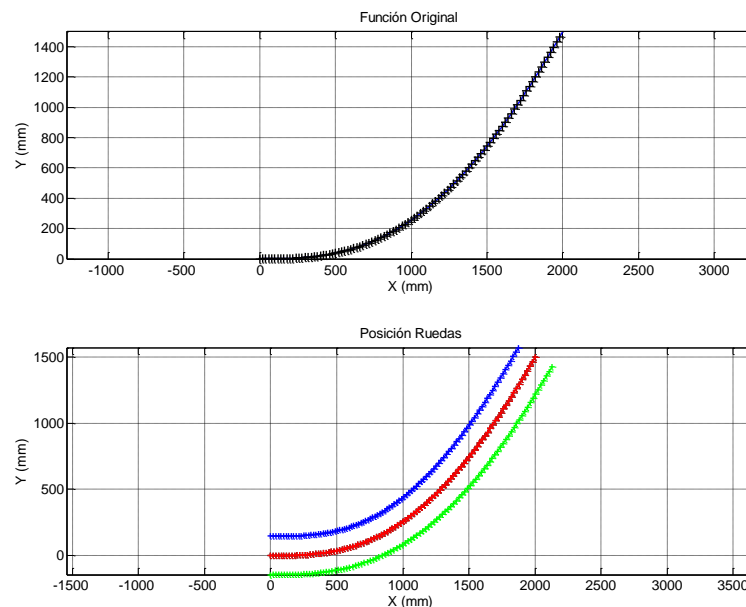


Figura 4.7. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En las figs. 4.8 y 4.9, se muestran los recorridos obtenidos en la pruebas 5 y la prueba 9. Se eligieron estas dos pruebas, porque muestran como la rueda “loca”, afectaban claramente la precisión. Se observó como la posición inicial de la rueda “loca” influía directamente en la posición de llegada del robot móvil. En la prueba cinco, el efector se desplazó a la derecha del punto objetivo, mientras que en la prueba nueve, el efector se desplazó a la izquierda del punto objetivo.

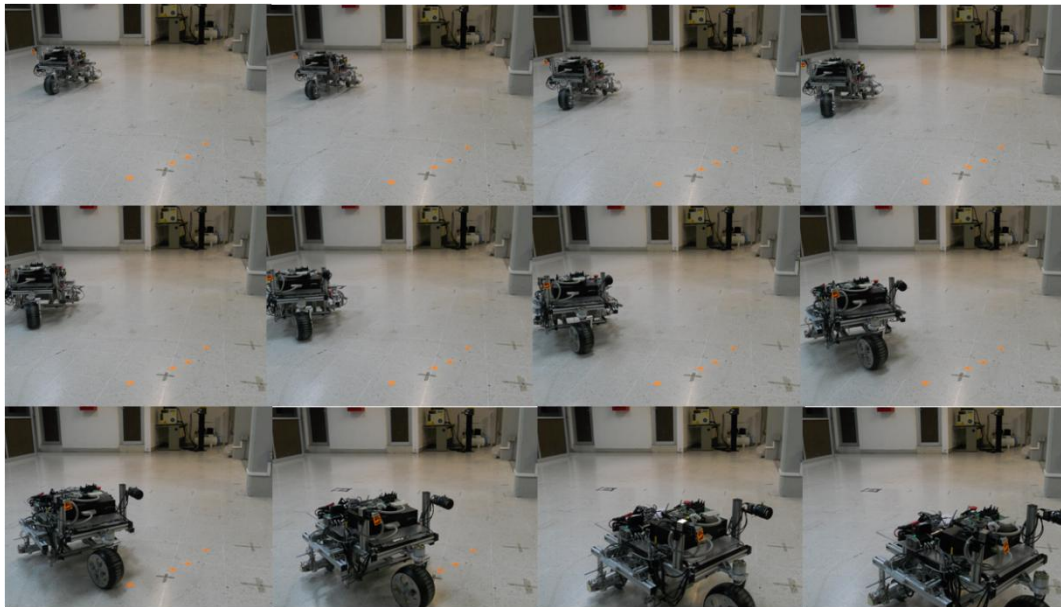


Figura 4.8. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 5 del robot móvil.

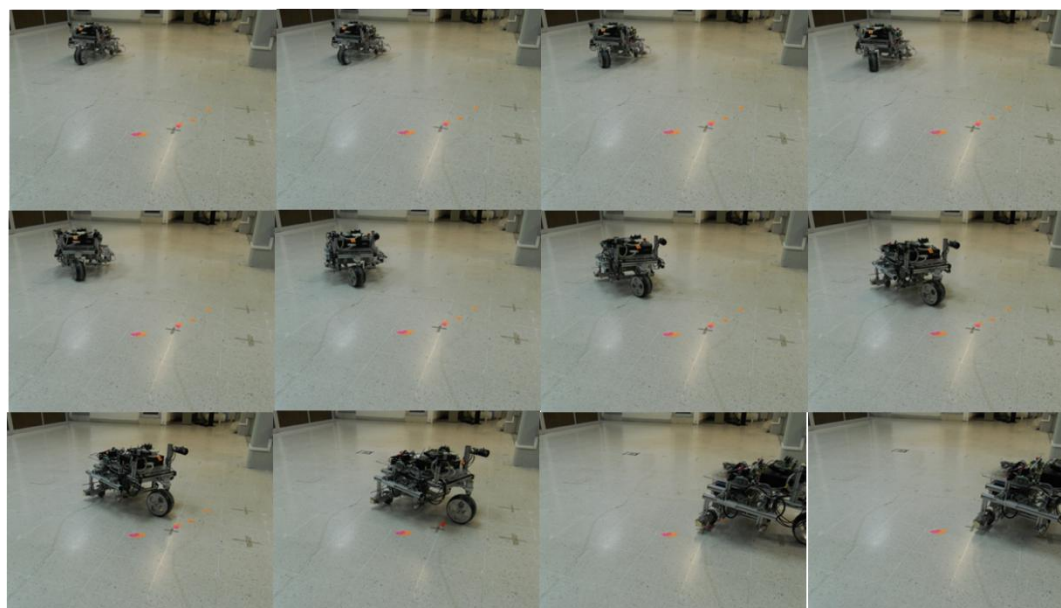


Figura 4.9. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 9 del robot móvil

En la tabla 4.2 se muestra los de resultados de las pruebas de este experimento, se marca con rojo los resultados máximos y con azul los mínimos. Además de la distancia entre los puntos de llegada y el punto objetivo con el cual se evalúa la repetibilidad.

Prueba	Posición (mm)	Orientación (°)	Repetibilidad (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	95	68		368	289	127	315	31	324	353	173	90
2	463	60	368		652	244	679	397	653	710	201	280
3	207	57	289	652		414	28	266	39	70	465	378
4	219	74	127	244	414		442	154	450	479	50	40
5	235	59	315	679	28	442		295	19	46	493	407
6	65	64	31	397	266	154	295		301	333	200	118
7	244	59	324	653	39	450	19	301		34	498	411
8	277	55	353	710	70	479	46	333	34		530	443
9	266	72	173	201	465	50	493	200	498	530		87
10	183	71	90	280	378	40	407	118	411	443	87	

Tabla 4.2. Tabla de resultados.

Para validar los resultados experimentales, se realizaron diez pruebas en las cuales se registró, el ángulo de orientación final del robot móvil, la distancia entre el punto objetivo y el efector, y la distancia entre cada punto final del efector. En la fig.4.10 se muestra la distribución de puntos finales, de esta prueba se observa que se generaron dos grupos de puntos. Claramente se nota que la posición inicial de la rueda “loca” determina la zona en la que llegaba el robot móvil.

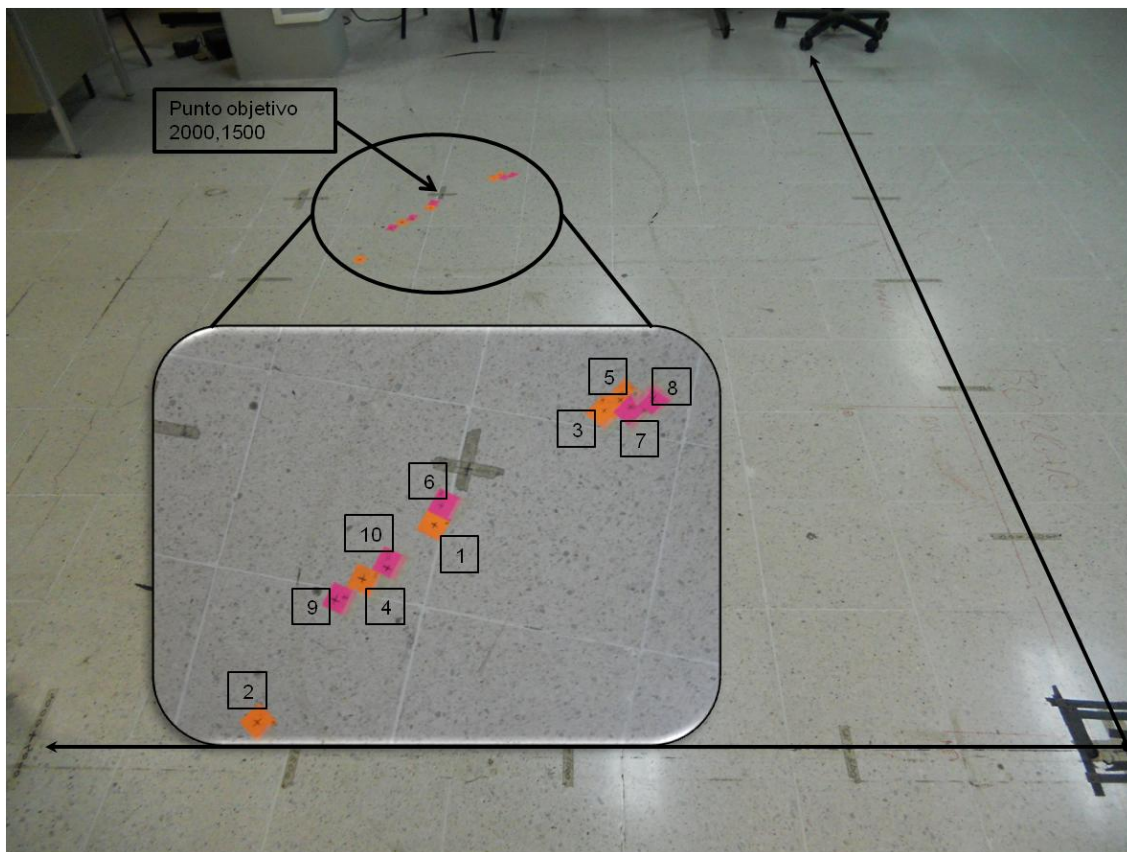


Figura 4.10. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:
 Error mínimo en ubicación (mm):65
 Error máximo en ubicación (mm):463
 Error promedio ubicación (mm):225.4

Orientación mínima (grados):60
Orientación máxima (grados):74
Promedio orientación (grados):63.9

Resultados finales repetibilidad:
Distancia mínima entre puntos (mm): 19
Distancia máxima ente puntos (mm): 652

Conclusiones:

- Se tuvo una gran dispersión de puntos de llegada. La causa es que la orientación inicial de la rueda “loca” del robot móvil hacía que se sesgara los resultados a dos zonas claramente definidas.
- La rueda loca, utilizada para este experimento influyó para que los resultados no fueran satisfactorios. La rueda loca utilizada para estos experimentos se compone de un módulo mecánico fabricado para convertir una rueda orientable en una rueda orientable descentrada.
- En la fig. 4.10 se muestra los puntos de llegada que quedaron por debajo del punto objetivo, lo que significa que las ruedas de tracción patinaron y se generó deslizamiento del robot móvil.
- El error mínimo en posición de esta experimento corresponde a 65 mm que es un 2.4% obtenido en la prueba seis.
- El error máximo en posición corresponde a 463mm que es un 17.4% en obtenido en la prueba dos.
- De estas pruebas se concluyó que se requería cambiar la rueda “loca”, por una de diámetro menor, y así demandar menos torque a los motores para desplazarse y tener un coeficiente de fricción menor.

4.2.2. Verificación experimental 3

Objetivo:

Validar el algoritmo de generación de trayectorias basado en un polinomio de cuarto orden, evaluar la precisión del efector final con una configuración del robot móvil con tracción trasera y con una rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

En la fig. 4.11 se muestra la configuración del robot para esta prueba. A diferencia del experimento 2, se cambio la rueda “loca”, por una rueda de 4 pulgadas de diámetro y 1 pulgada de espesor de diferente material con objeto de disminuir la fricción.

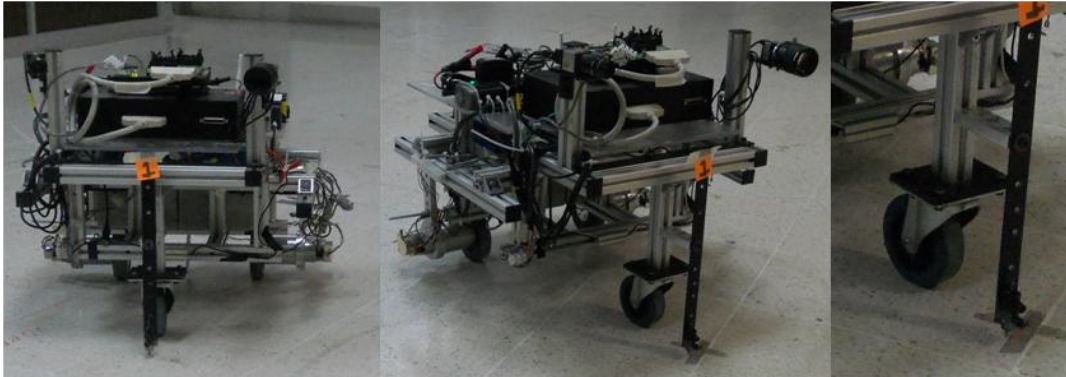


Figura 4.11. Configuración mecánica para las pruebas

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000, 1500

Orientación final del efector (grados): 60

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):545

Número de segmentos en la prueba: 100

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 2000.2, 1499.9

Orientación final del efector (grados): 59.97

Coordenada final del origen (mm):1727.5, 1028.0

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 2142.65

En la fig.4.12 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido del efector (línea color roja) y el recorrido del origen del robot móvil (línea negra).

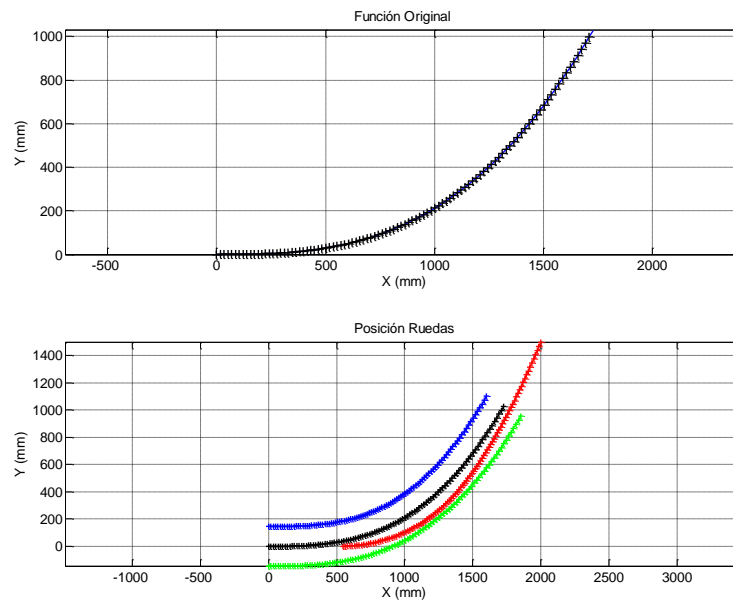


Figura 4.12. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron diez pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

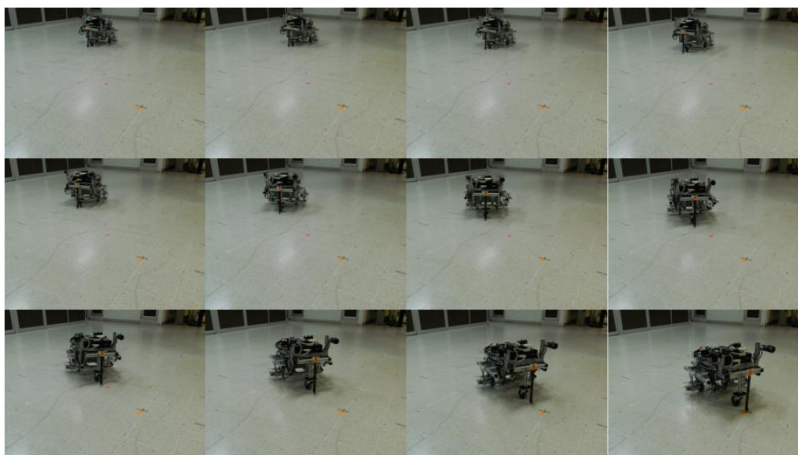


Figura 4.13. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 3 del robot móvil

En la fig. 4.13 se muestra la prueba tres y en la fig.4.14, se muestra la prueba diez. En estas figuras se observa el desplazamiento del robot móvil para llegar al punto objetivo.

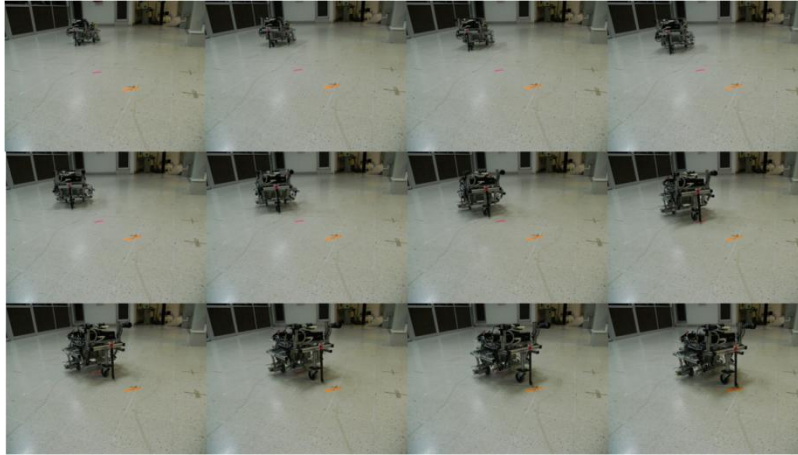


Figura 4.14. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 10 del robot móvil

En las tablas 4.3 y 4.4, se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos. En la tabla 4.3 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas.

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	58	39		6,5	33	12	29	29	68	37	27	15
2	58	39	6,5		26	16	35	21	73	43	33	11
3	59	35	33	26		41	61	47	99,5	69	58	20
4	59	50	12	16	41		19	6,5	58	28	27	27
5	58	67	29	35	61	19		14	39,5	9	4	45
6	56	54	29	21	47	6,5	14		52,5	22	11	31
7	55	102,5	68	73	99,5	58	39,5	52,5		31	31	83,5
8	55	72	37	43	69	28	9	22	31		11	52
9	55	62,5	27	33	58	27	4	11	31	11		42
10	58	25	15	11	20	27	45	31	83,5	52	42	

Tabla 4.3. Tabla de resultados de la orientación y posición del efector.

En la tabla 4.4 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de llegada.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	39		5	23	13	33	21	59	36	29	9
2	42,5	5		21	14	34	24	61	34,5	28	13
3	39,5	23	21		35	55	44	82	59	49	19
4	48	13	14	35		20	9	46	36	13	28
5	64	33	34	55	20		14	28,5	14,5	8	41
6	50	21	24	44	9	14		39,5	16	6,5	29
7	86	59	61	82	46	28,5	39,5		23,5	33,5	67,5
8	65	36	34,5	59	36	14,5	16	23,5		10	44
9	56	26	28	49	13	8	6,5	33,5	10		34
10	30	9	13	19	28	41	29	67,5	44	34	

Tabla 4.4. Tabla de resultados de la posición del origen del robot móvil.

La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.15.

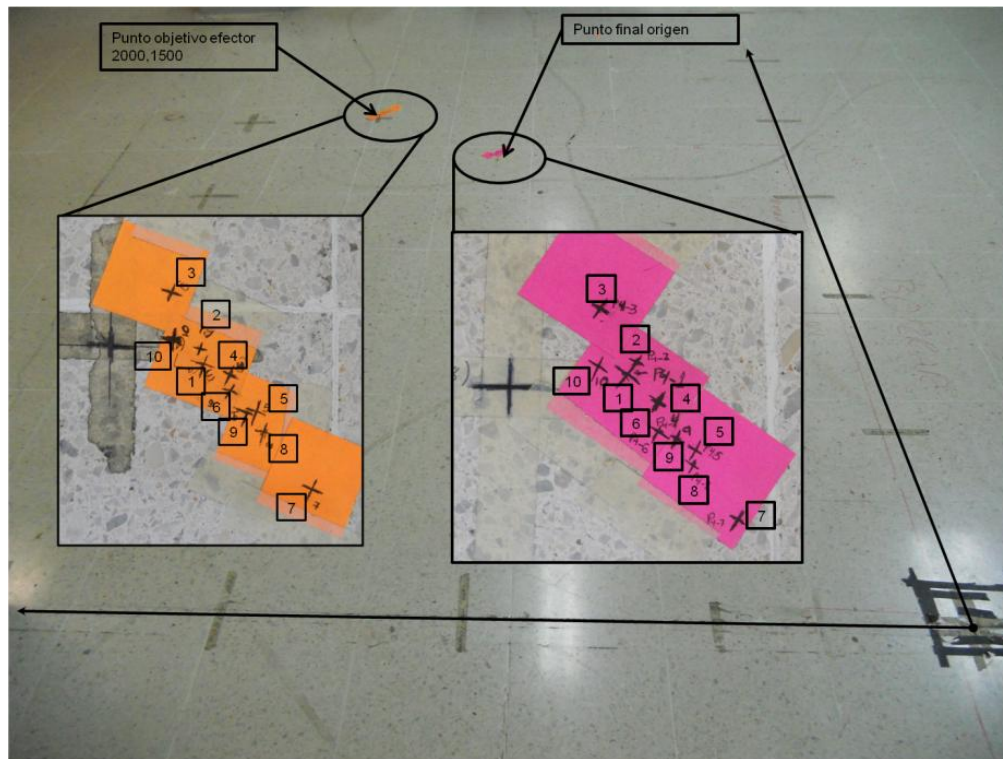


Figura 4.15. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:
 Error mínimo en ubicación (mm):25
 Error máximo en ubicación (mm):102.5
 Error promedio ubicación (mm):54.6
 Orientación mínima (grados):59
 Orientación máxima (grados):55
 Promedio orientación (grados): 57.1

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm): 4

Distancia máxima entre puntos (mm):99.5

Conclusiones:

- Los punto de llegada del efector final, tiene un rango de repetibilidad de 99.5 mm, mientras que en precisión en el punto objetivo 102.5mm.
- El error mínimo en posición es 25mm que corresponde al 1.16% de la distancia total recorrida.
- El error máximo en posición es 102.5mm que corresponde al 4.7% de la distancia total recorrida.
- En la orientación obtenida en la prueba 3 y 4 se llegó a 59°, es decir un error de un grado en orientación y a una distancia de 35mm y 50 mm respectivamente al punto objetivo.
- Comparando los resultados con los obtenidos en sección 4.2.1, se obtuvo una mejoría en el error mínimo en posición de 2.4 % a 1.16%, y en el error máximo en posición del 17.4 a 4.7%. El error máximo en orientación que se tenía era de 14° y se mejoró a 5°.
- Se tomará esta configuración para realizar los experimentos faltantes.
- Al utilizar una rueda loca comercial, se obtuvieron mejores resultados que en la prueba experimental 2.

4.4.3. Verificación experimental 4

Objetivo:

Validar, el algoritmo de generación de trayectorias con spline cúbicos, para evaluar la precisión del efector final en una configuración del robot móvil con tracción trasera y la rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

Se utilizará la configuración, de la sección 4.2.2.

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000, 1500

Orientación final del efector (grados): 60

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):545

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 1996, 1502.3

Orientación final del efector (grados):60.488

Coordenada final del origen (mm):1727.5, 1028.0

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 2378.29

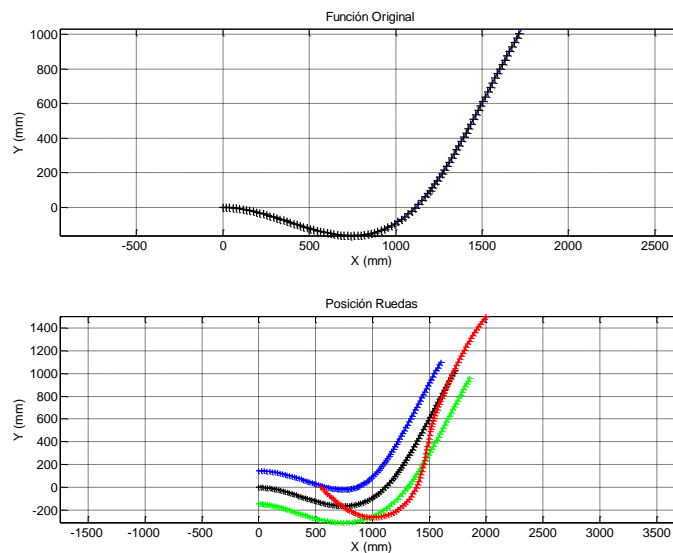


Figura 4.16. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig. 4.16 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido del efector (línea color roja) y del origen del robot móvil (línea negra). En la fig. 4.17 y 4.18, se muestran los recorridos de las pruebas.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron diez pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

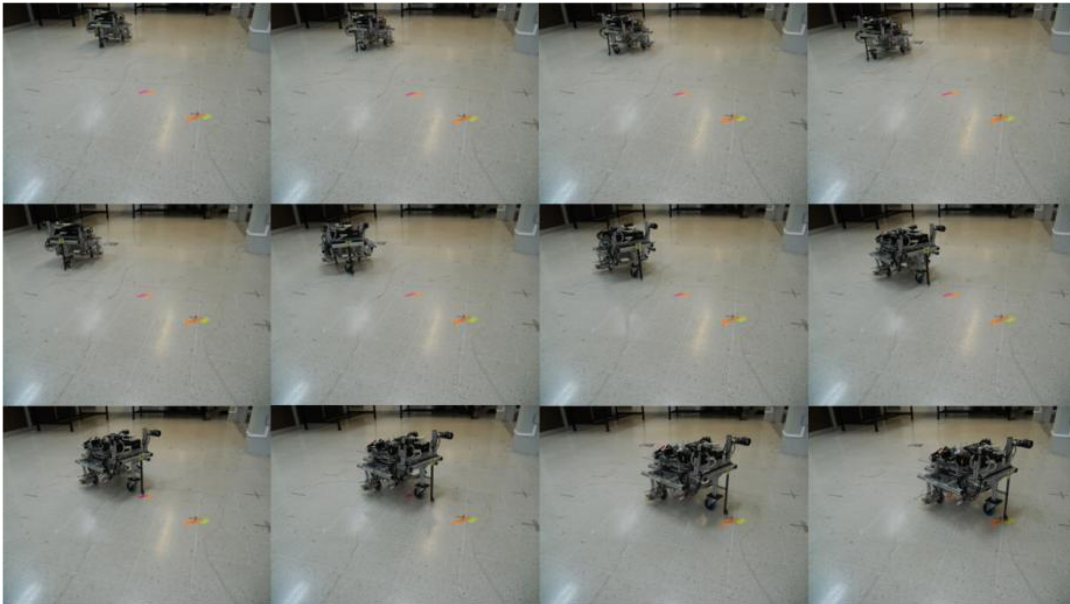


Figura 4.17. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 7 del robot móvil.

En las tablas 4.5 y 4.6, se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos. En la tabla 4.5 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas.

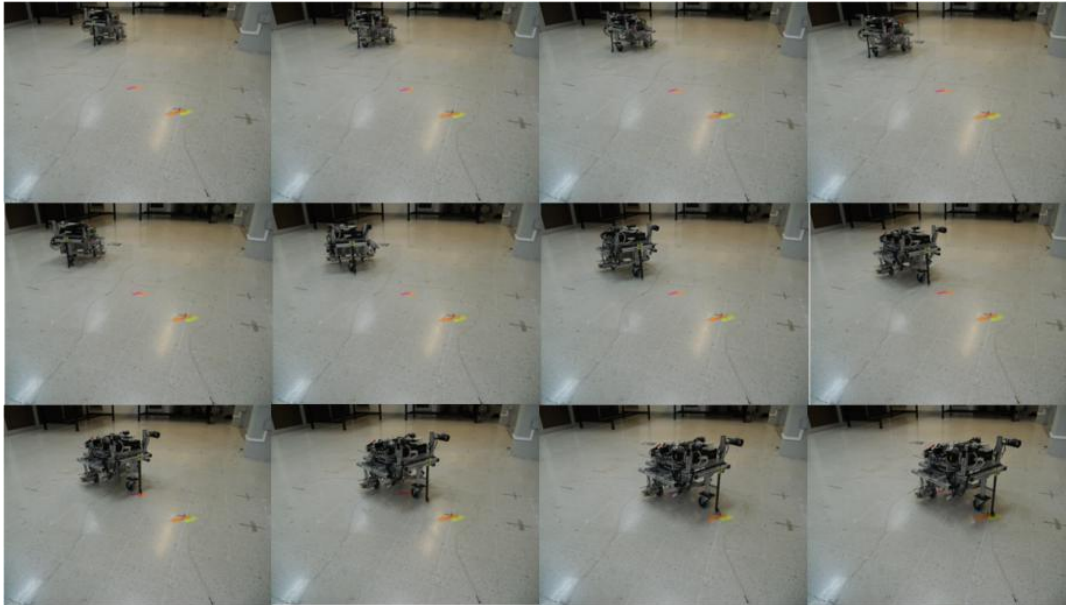


Figura 4.18. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 9 del robot móvil

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	60	81		18,5	49	37,5	6	37	60	49	61	18
2	59	64	18,5		13	23,5	24	30	46	41	50	24
3	59	56	49	37		13	55	12	11	16	13	37,5
4	57	55	37,5	23,5	13		44	5	22,5	23	27	29
5	55	87	6	24	55	44		42	66	54	66	22
6	55	59	37	30	12	5	42		24	19	25	27
7	60	52	60	46	11	22,5	66	24		23	10	44
8	60	72	49	41	16	23	54	19	23		17	33
9	56	62	61	50	13	27	66	25	10	17		47
10	59	82	18	24	37,5	29	22	27	44	33	47	

Tabla 4.5. Tabla de resultados de la orientación y posición del efector.

En la tabla 4.6 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de llegada.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	79		17,5	49	35	45	34	49	38	46	14
2	62	17,5		38	21	19	21	36	33	35	21
3	65	49	38		19	53	17	8	17	3	40
4	55	35	21	19		38	5	15	22	17	29
5	79	45	19	53	38		37	52	42	50	12
6	60	34	21	17	5	37		15	14	14	27
7	58	49	36	8	15	52	15		22	8,5	41
8	76	38	33	17	22	42	17	22		15	26
9	65	46	35	3	17	50	14	8,5	15		37
10	81	14	21	40	29	12	27	41	26	37	

Tabla 4.6. Tabla de resultados de la posición del origen del robot móvil.

La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.19, a comparación de la fig. 4.15 en la sección 4.2.2, los puntos de llegada del efector final se encuentra en un rango más compacto.

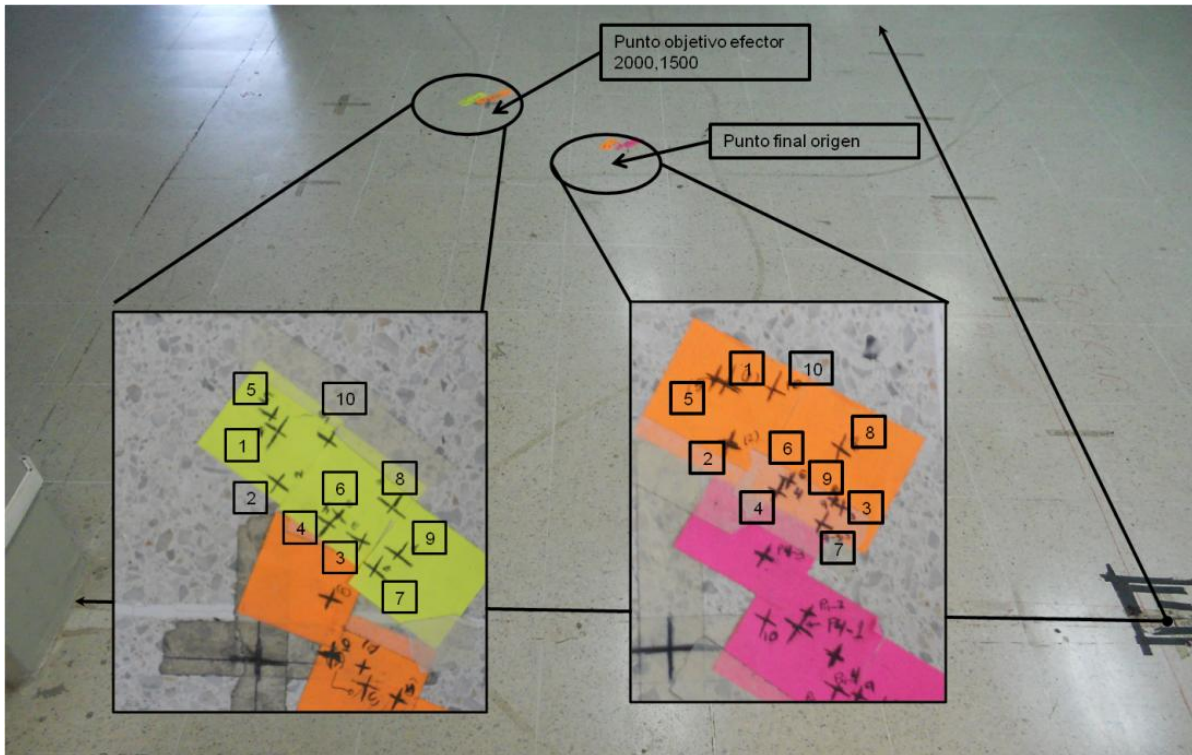


Figura 4.19. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:

Error mínimo en ubicación (mm):55

Error máximo en ubicación (mm):87

Error promedio ubicación (mm):67

Orientación mínima (grados):60

Orientación máxima (grados):55

Promedio orientación (grados): 58

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm): 5

Distancia máxima ente puntos (mm): 66

Conclusiones:

- Los puntos de llegada del efector, tiene un rango de repetibilidad de 66 mm, mientras que en precisión en el punto objetivo 87 mm.

- El error mínimo en posición es 55 mm que corresponde al 2.31% de la distancia total recorrida, obtenido en la prueba 7, con un ángulo de orientación de 60°.
- El error máximo en posición es 87 mm que corresponde al 3.65% de la distancia total recorrida, obtenido en la prueba 5, con un ángulo de orientación de 55°.
- En la orientación obtenida en la prueba 1, prueba 7 y prueba 8 se llegó a 60° y el error de posición fue de 81 mm, 52 mm y 72mm respectivamente.
- En posición la prueba 7 tuvo la menor distancia al punto objetivo con 52mm y con una orientación de 60° sin error.

Comparando los resultados con los obtenidos, en la sección 4.2.2, teniendo en cuenta que es el mismo sistema, misma coordenada y orientación objetivo del robot móvil, se puede concluir lo siguiente:

- El spline cúbico tuvo un mejor promedio de orientación final.
- El spline cúbico tuvo un radio de repetibilidad menor que el polinomio de cuarto orden.
- El polinomio de cuarto orden presentó el mejor valor de precisión de los 20 casos de prueba con 25mm.

Las trayectorias generadas con splines cúbicos tienen un radio menor de repetibilidad, y logran una orientación mejor que las trayectorias generadas con polinomios de cuarto orden, por las siguientes razones.

- El polinomio de cuarto orden, es más sensible a las perturbaciones que genera la rueda “loca”. Estas perturbaciones se generan cuando la rueda “loca” desliza provocando un cambio de orientación en el robot móvil. Recordando que la curva generada por el polinomio de cuarto orden, se aproxima por pequeños segmentos de arcos de circunferencia, y la orientación final del robot móvil es la suma de los arcos de circunferencias, entonces si se presenta un deslizamiento en la rueda “loca”, esto provoca un cambio en la orientación que al no tener retroalimentación no se compensa para lograr la orientación deseada.
- Las trayectorias generadas por los spline cúbicos no se ven afectadas por las perturbaciones generadas por la rueda “loca”, estas perturbaciones no afectan la orientación final del efector, por que cuando empieza el último spline ya se logró orientar un 80% de la orientación final, por lo que las perturbaciones debidas a la rueda loca ya no son significativas en la orientación final.

4.4.4. Verificación experimental 5

Objetivo:

Validar el algoritmo de generación de trayectorias basado en un polinomio de cuarto orden, evaluar la precisión del efector final con una configuración del robot móvil con tracción trasera y con una rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

Se utilizará la configuración, de la sección 4.2.2.

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000, 2000

Orientación final del efector (grados): 75

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm): 545

Número de segmentos en la prueba: 100

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 2005.6, 1998.5

Orientación final del efector (grados): 74.42

Coordenada final del origen (mm): 1849.9, 1439.8

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm):2720.09

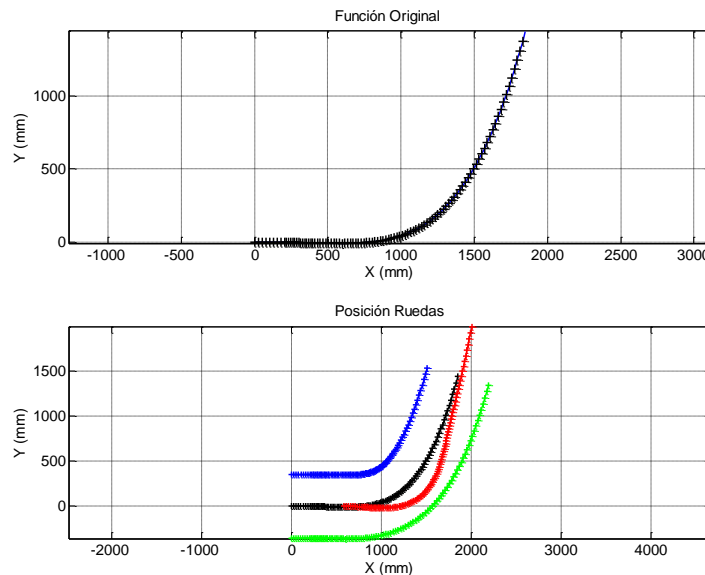


Figura 4.20. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig.4.20 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido del efector y del origen del robot móvil.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron cinco pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

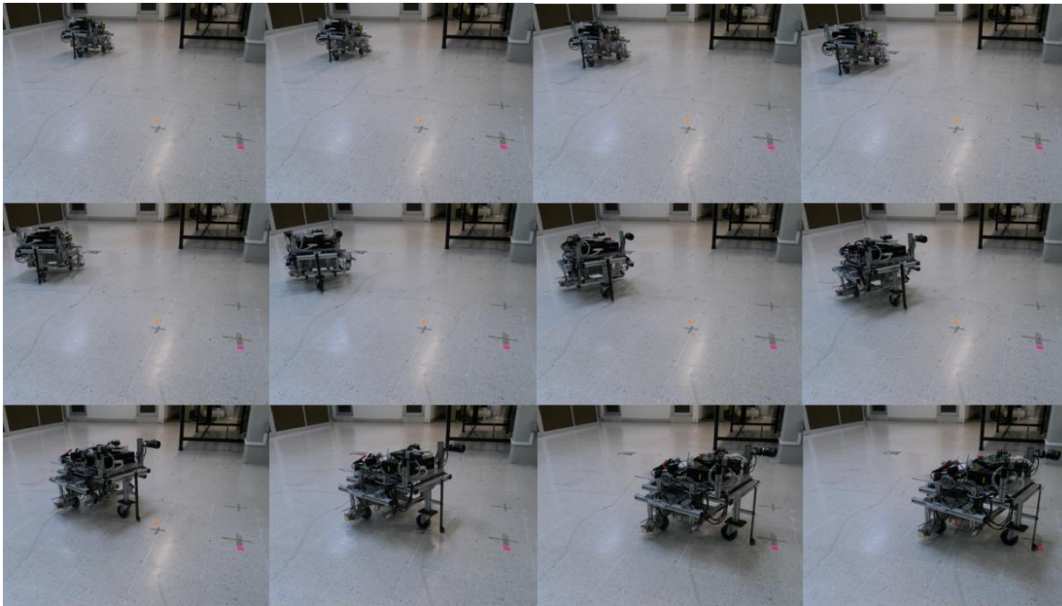


Figura 4.21. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 2 del robot móvil.

En la fig. 4.21 se muestra la prueba tres y en la figura 4.22, se muestra la prueba diez. En estas figuras se observa el desplazamiento del robot móvil para llegar al punto objetivo.

En las tablas 4.7 y 4.8, se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos. En la tabla 4.7 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas.

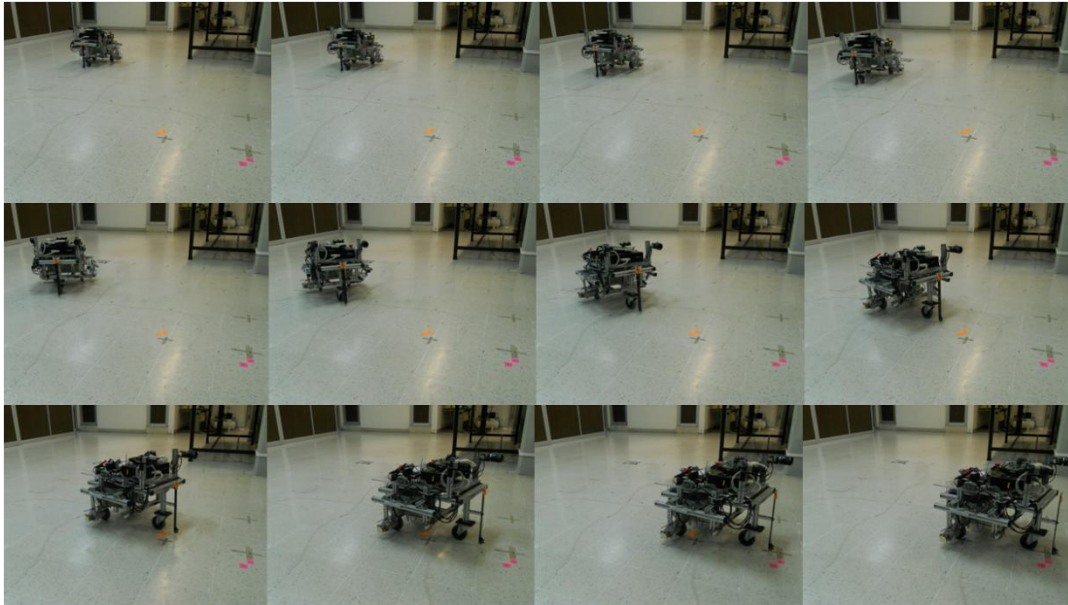


Figura 4.22. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 3 del robot móvil

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)				
			1	2	3	4	5
1	74	95		62	85	35	13
2	70	150	62		145	95	62
3	75	70	85	145		52	87
4	71	72	35	95	52		22
5	72	85	13	62	87	22	

Tabla 4.7. Resultados de la orientación y posición del efector.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)				
		1	2	3	4	5
1	75		50	75	22	9
2	110	50		122	72	56
3	100	75	122		52	65
4	72	22	72	52		15
5	78	9	56	65	15	

Tabla 4.8. Resultados de la posición del origen del robot móvil.

En la tabla 4.8 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de

llegada. La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.23.

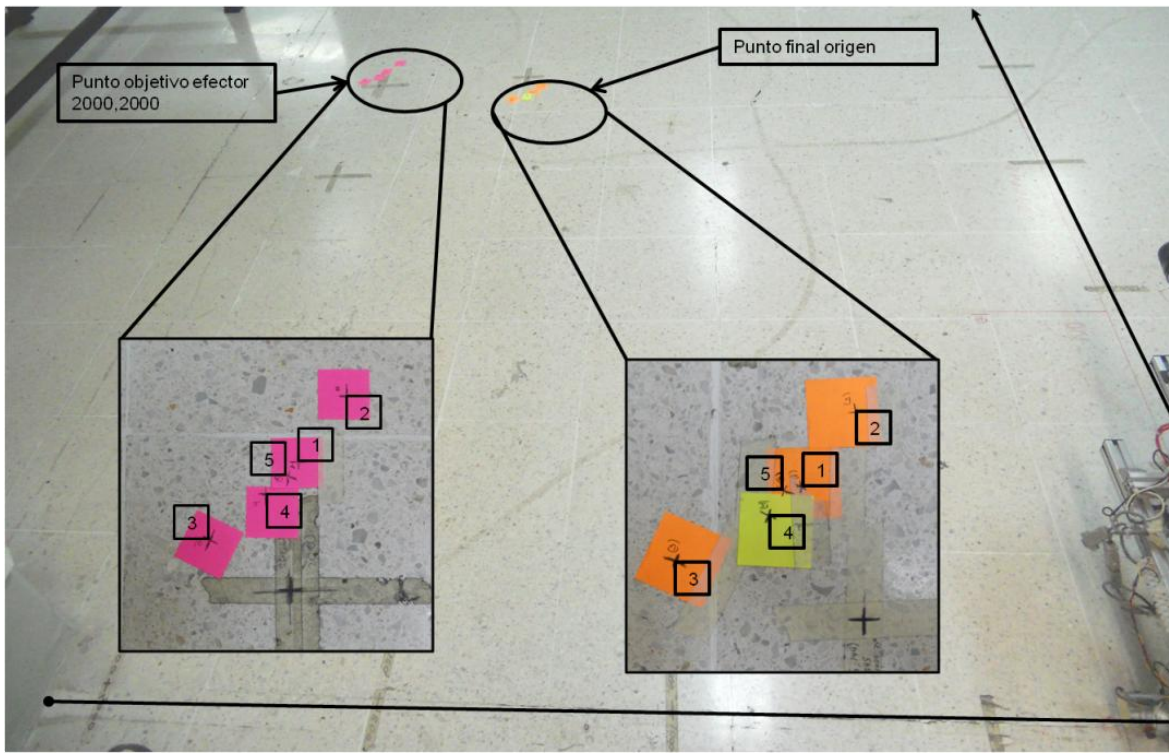


Figura 4.23. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:

Error mínimo en ubicación (mm): 70
 Error máximo en ubicación (mm):150
 Error promedio ubicación (mm):94.4
 Orientación mínima (grados):75
 Orientación máxima (grados):70
 Promedio orientación (grados): 72.4

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm):13
 Distancia máxima ente puntos (mm):145

Conclusiones:

- Los puntos de llegada del efector final tienen un rango de reptibilidad de 145mm. Se pudo lograr una precisión de 70mm.
- El error mínimo en posición es 70mm que corresponde al 2.5% de la distancia total recorrida.
- El error máximo en posición es 150 mm que corresponde al 5.5% de la distancia total recorrida.

- En lo que respecta a orientación obtenida en la prueba 3 llegó a un error en orientación de 0° y tuvo la mejor precisión del experimento con un error en posición de 70mm.
- La prueba 1 y la prueba 5, fueron las más cercanas entre ellas con 13 mm.
- Se apreció que las perturbaciones que tenía la rueda “loca”, afectan directamente a la precisión de la orientación, con un cambio en su direccionamiento podría llegar al punto objetivo con una orientación final correcta.
- El deslizamiento de las ruedas de tracción aunado a los efectos inerciales del robot, provoca que el robot móvil se detenga después del punto objetivo.

4.2.5. Verificación experimental 6

Objetivo:

Validar, el algoritmo de generación de trayectorias con spline cúbicos, para evaluar la precisión del efector final en una configuración del robot móvil con tracción trasera y la rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

Se utilizará la configuración, de la sección 4.2.2

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 2000,2000

Orientación final del efector (grados): 75

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):545

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 1997.5, 2000.7

Orientación final del efector (grados): 75.27

Coordenada final del origen (mm):1858.9, 1473.6

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 2930.12

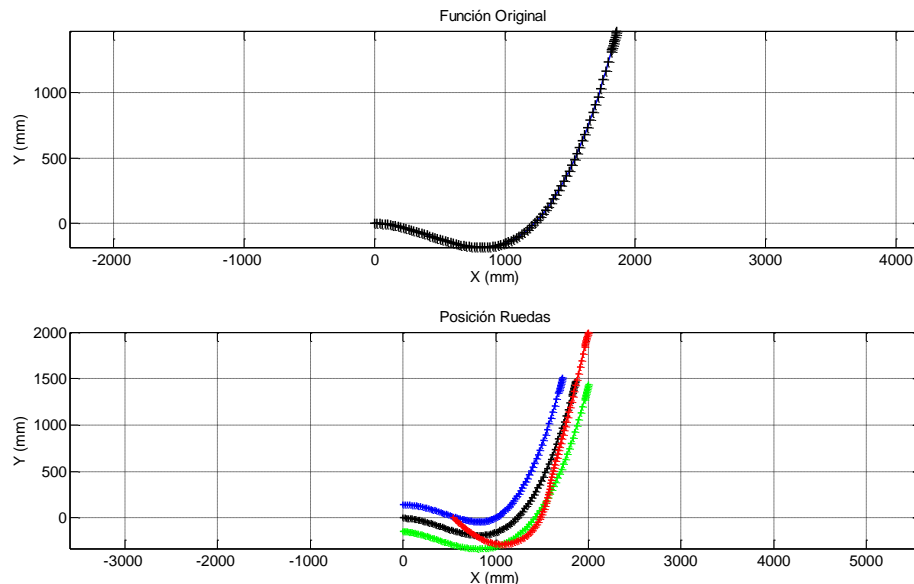


Figura 4.24. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda derecha, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig. 4.39 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido real del efector y del origen del robot móvil. En la fig. 4.25 y la 4.26, se muestran los recorridos de las pruebas.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron cinco pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

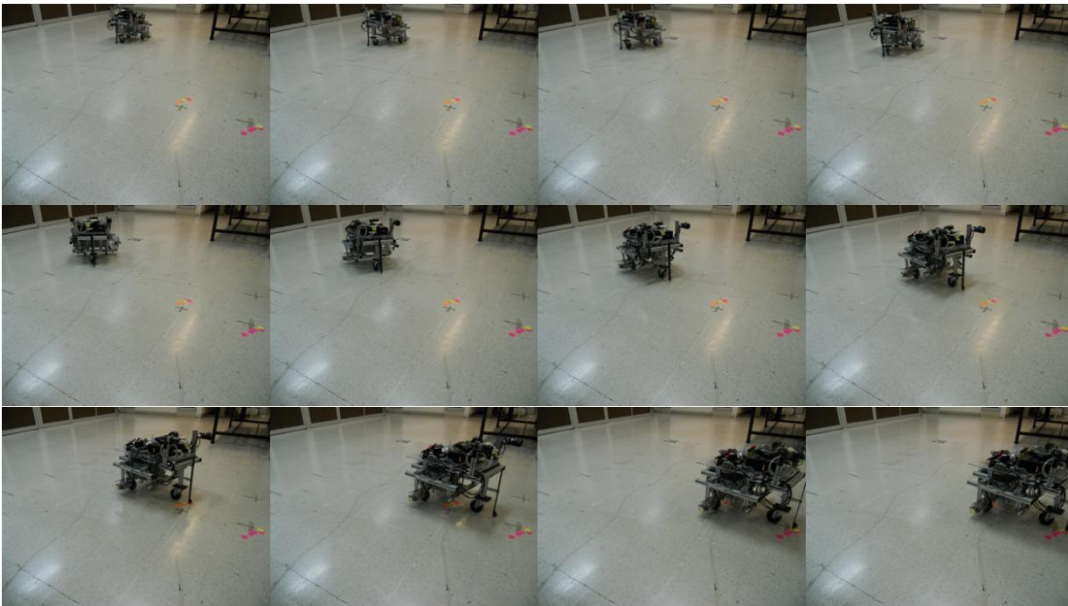


Figura 4.25. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 2 del robot móvil.

En las tablas 4.9 y 4.10, se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos. En la tabla 4.9 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas

En la tabla 4.10 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de llegada.

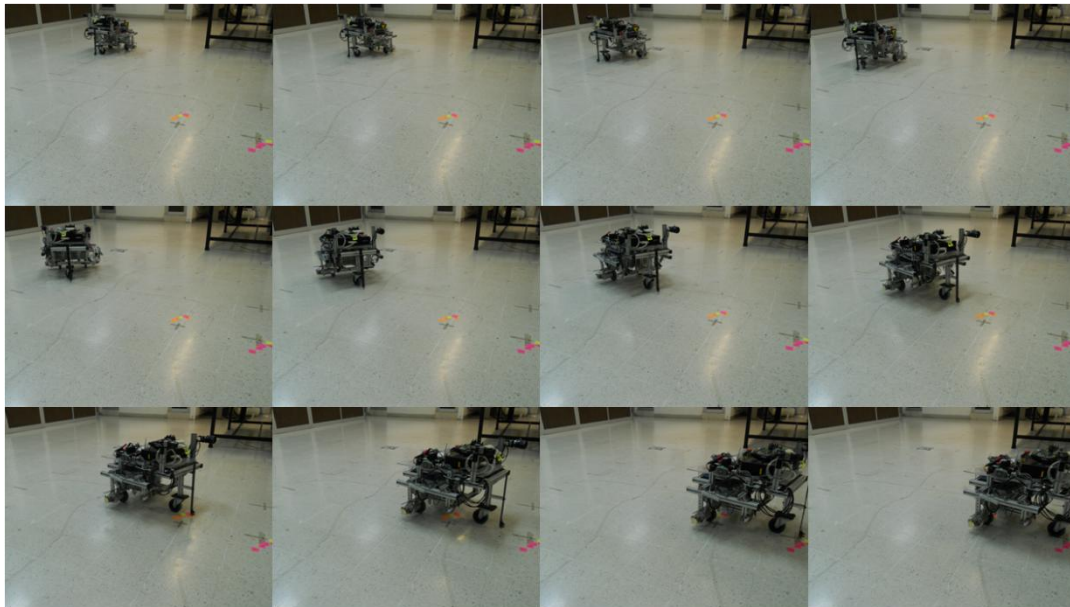


Figura 4.26. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 4 del robot móvil.

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)				
			1	2	3	4	5
1	75	55		17	13	23	17
2	75	70	17		15	11	10
3	74	67	13	15		13	7
4	75	78	23	11	13		7
5	74	73	17	10	7	7	

Tabla 4.9. Resultados de la orientación y posición del efector.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)				
		1	2	3	4	5
1	62		10	6	14	7
2	66	10		15	13	12
3	65	6	15		14	6
4	76	14	13	14		8
5	70	7	12	6	8	

Tabla 4.10. Resultados de la posición del origen del robot móvil.

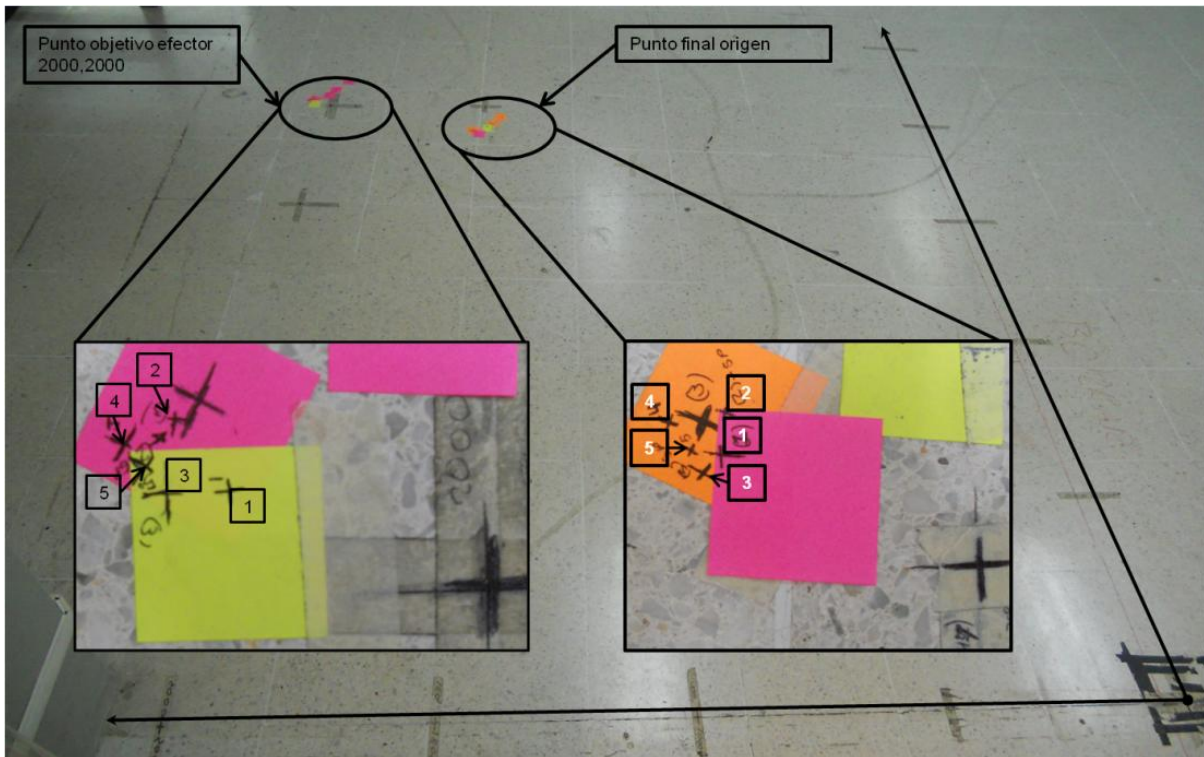


Figura 4.27. Distribución de los puntos de llegada.

La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.27, a comparación de la fig. 4.23 en la sección 4.2.4, los puntos de llegada del efector final se encuentra en un rango más compacto.

Resultados finales de precisión:

Error mínimo en ubicación (mm):55

Error máximo en ubicación (mm):78

Error promedio ubicación (mm):68.6

Orientación mínima (grados):75

Orientación máxima (grados):74

Promedio orientación (grados): 74.6

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm): 7

Distancia máxima ente puntos (mm): 23

Conclusiones:

- Los puntos de llegada del efector final tienen un rango de repetibilidad de 23mm, se llego a una precisión de 55mm de error en posición
- El error mínimo en posición es 55 mm que corresponde al 1.87% de la distancia total recorrida.

- El error máximo en posición es 78 mm que corresponde al 2.66% de la distancia total recorrida.
- En lo que respecta a orientación obtenidas en las pruebas 1, 2, 4 llegaron a la orientación deseada y en la prueba 1 se obtuvo la mejor precisión con un error en posición de 55 mm.
- La obtenida en prueba 1 y la prueba 3, fueron las más cercanas con 7 mm entre ellas.
- El robot móvil se detiene después del punto objetivo es originado en parte por el deslizamiento de las ruedas con el suelo aunado a los efectos inerciales del robot no considerados en la modelación. Otra parte es debido al perfil de velocidades propuesto.

4.2.6. Verificación experimental 7

Objetivo:

Validar el algoritmo de generación de trayectorias basado en un polinomio de cuarto orden, evaluar la precisión del efector final con una configuración del robot móvil con tracción trasera y con una rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

Se utilizará la configuración, de la sección 4.2.2.

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 3000,1500

Orientación final del efector (grados): 45

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):545

Número de segmentos en la prueba: 100

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 2999.8, 1500.2

Orientación final del efector (grados): 45.0263

Coordenada final del origen (mm):2614.6, 1114.6

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 2932.55

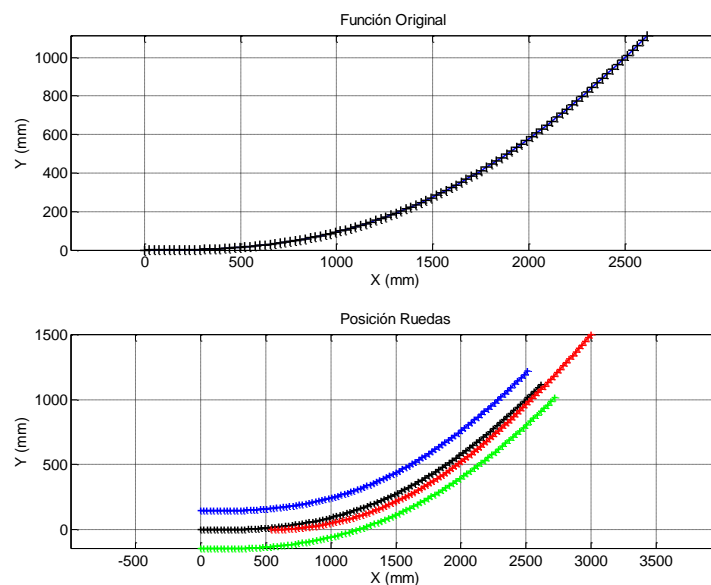


Figura 4.28. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig.4.28 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido del efector y del origen del robot móvil.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron cinco pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

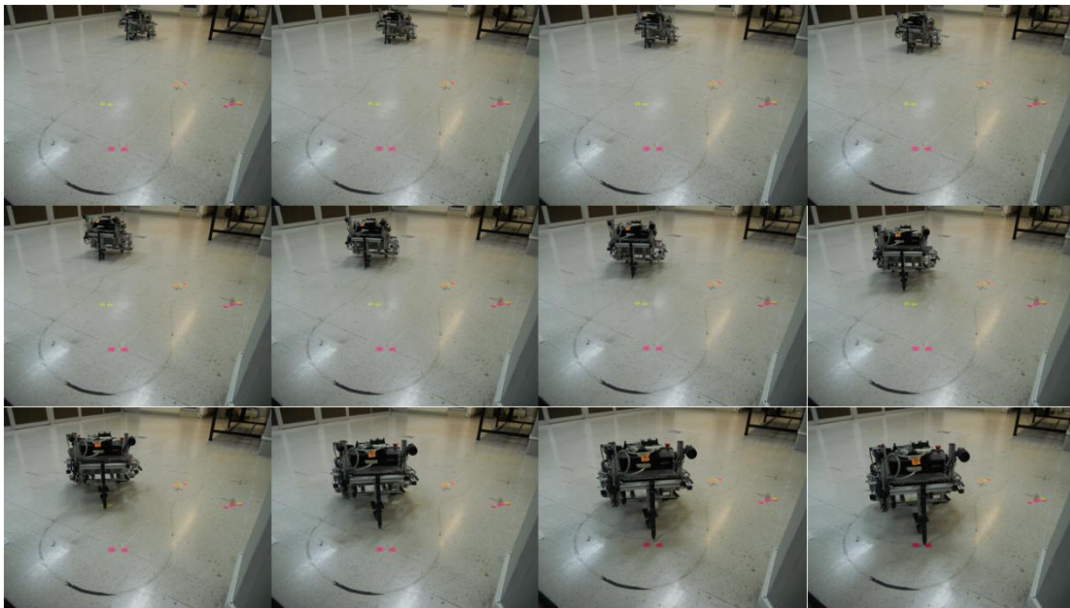


Figura 4.29. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 3 del robot móvil.

En la fig. 4.29 se muestra la prueba tres y en la 4.30, se muestra la prueba cuatro. En estas figuras se observa el desplazamiento del robot móvil para llegar al punto objetivo. En las tablas 4.11 y 4.12, se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos.

En la tabla 4.11 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas.

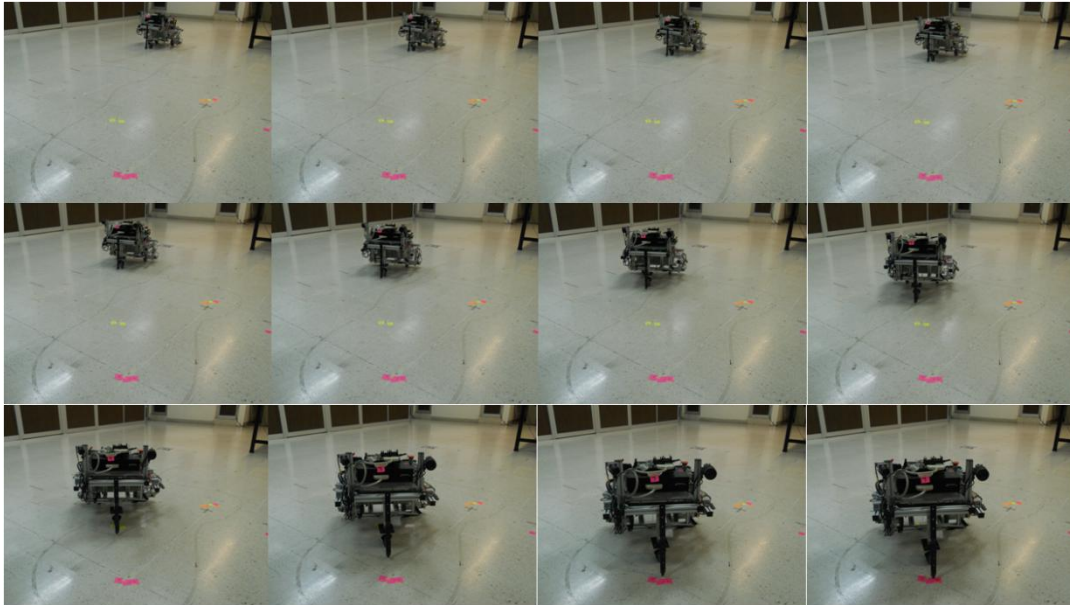


Figura 4.30. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 4 del robot móvil

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)				
			1	2	3	4	5
1	43	50		74	55	59	30
2	45	53	74		20	15	42
3	44	37	55	20		4	24
4	45	40	59	15	4		29
5	44	40	30	42	24	29	

Tabla 4.11. Resultados de la orientación y posición del efector.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)				
		1	2	3	4	5
1	35		60	45	48	22
2	47	60		18	15	40
3	43	45	18		3	25
4	43	48	15	3		27
5	35	22	40	25	27	

Tabla 4.12. Resultados de la posición del origen del robot móvil.

En la tabla 4.12 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de llegada.

La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.31.

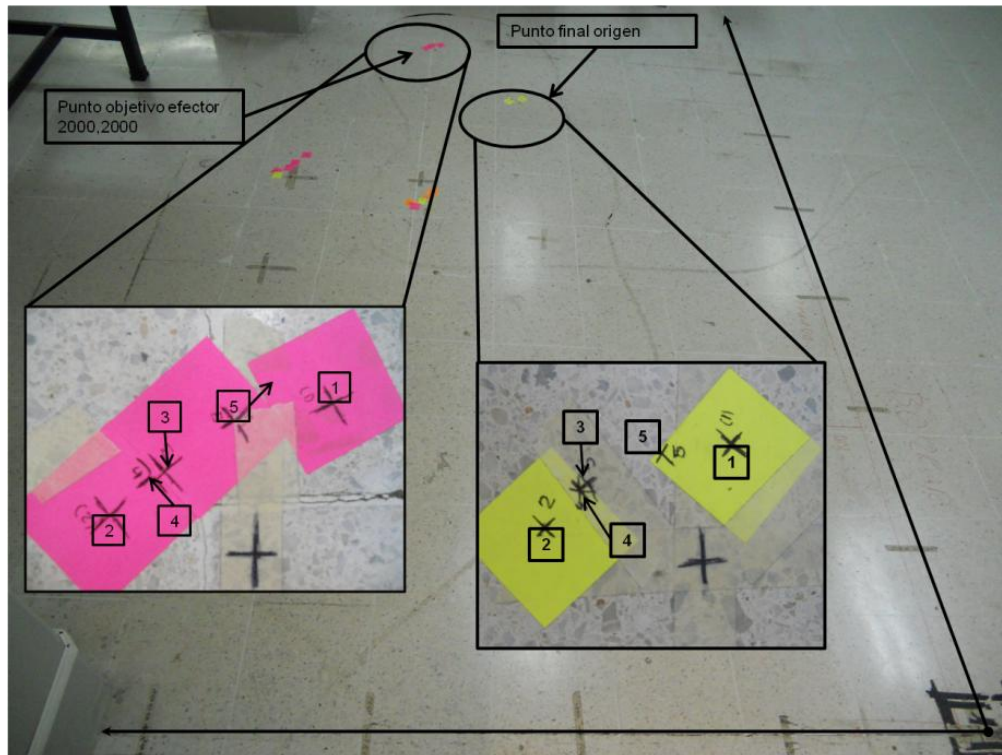


Figura 4.31. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:

Error mínimo en ubicación (mm):37

Error máximo en ubicación (mm):53

Error promedio ubicación (mm):44

Orientación mínima (grados):45

Orientación máxima (grados):43

Promedio orientación (grados): 44.2

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm):4

Distancia máxima ente puntos (mm):74

Conclusiones:

- Los puntos de llegada del efector final tienen un rango de repetibilidad de 74mm. Se llegó a una precisión de 37mm de error en posición.
- El error mínimo en posición es 37mm que corresponde al 1.26% de la distancia total recorrida.

- El error máximo en posición 53 mm que corresponde al 2.51% de la distancia total recorrida.
- En lo que respecta a orientación, las obtenidas en las prueba 2 y 4 llegaron a la orientación deseada con 45° y en la prueba 3 tuvo la mejor precisión con un error en posición de 37 mm.
- Se apreció que las perturbaciones que tenía la rueda “loca”, afectan a la precisión de la orientación por lo que en un instante en la pruebas con un ligero cambio en su direccionamiento se podría llegar al punto objetivo con una orientación final correcta.
- El deslizamiento de las ruedas de tracción aunado a los efectos inerciales del robot no considerados en la modelación provoca que el robot móvil, se detenga después del punto objetivo.

4.2.7. Verificación experimental 8

Objetivo:

Validar, el algoritmo de generación de trayectorias con spline cúbicos, para evaluar la precisión del efector final en una configuración del robot móvil con tracción trasera y la rueda delantera de apoyo del tipo “loca”.

Metodología:

Ubicar al efector final en una coordenada establecida, con una orientación final determinada.

Se utilizará la configuración, de la sección 4.2.2.

Características a evaluar en la prueba:

Coordenada final del efector (mm): 3000, 1500

Orientación final del efector (grados): 45

Distancia del efector al origen del robot móvil (mm):545

Resultados:

En modelación se obtuvieron los siguientes resultados:

Coordenada final del efector (mm): 3000.2, 1499.8

Orientación final del efector (grados): 44.97

Coordenada final del origen (mm): 2614.6, 1114.6

Distancia recorrida por el origen del robot móvil (mm): 3079.02

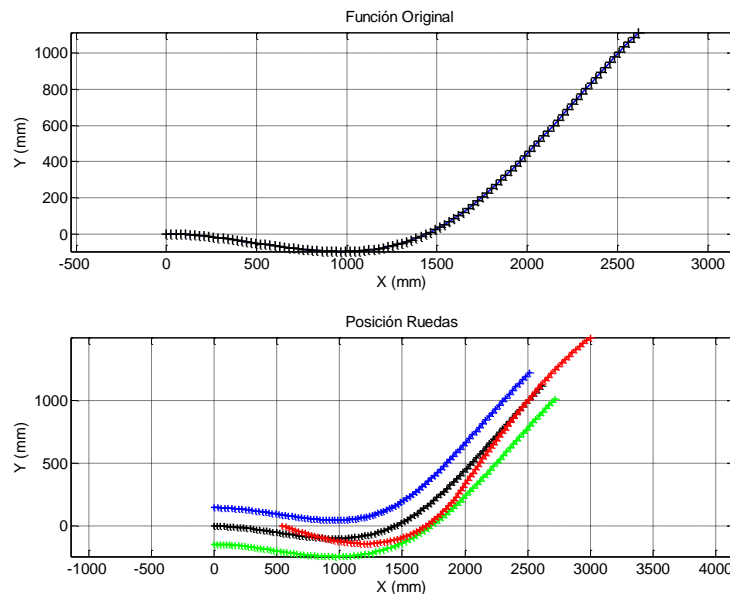


Figura 4.32. Recorrido del robot móvil según modelación. La gráfica superior muestra el recorrido del origen del robot móvil. En la gráfica inferior, se muestra en azul rueda izquierda, en verde rueda izquierda, en rojo efector, en negro el origen del robot móvil.

En la fig. 4.32 se muestra el recorrido del robot móvil según la modelación. En esta figura se puede ver el recorrido del efector y del origen del robot móvil.

Para efectuar un análisis a partir de los resultados experimentales, se realizaron cinco pruebas de las cuales se registró, para evaluar la precisión:

- a) el ángulo de orientación final del robot móvil.
- b) la distancia entre el punto objetivo y el efector.

Y para evaluar la repetibilidad:

- c) la distancia entre todos los puntos marcados al final de las trayectorias.

En la fig. 4.33 y 4.34, se muestran los recorridos de las pruebas.

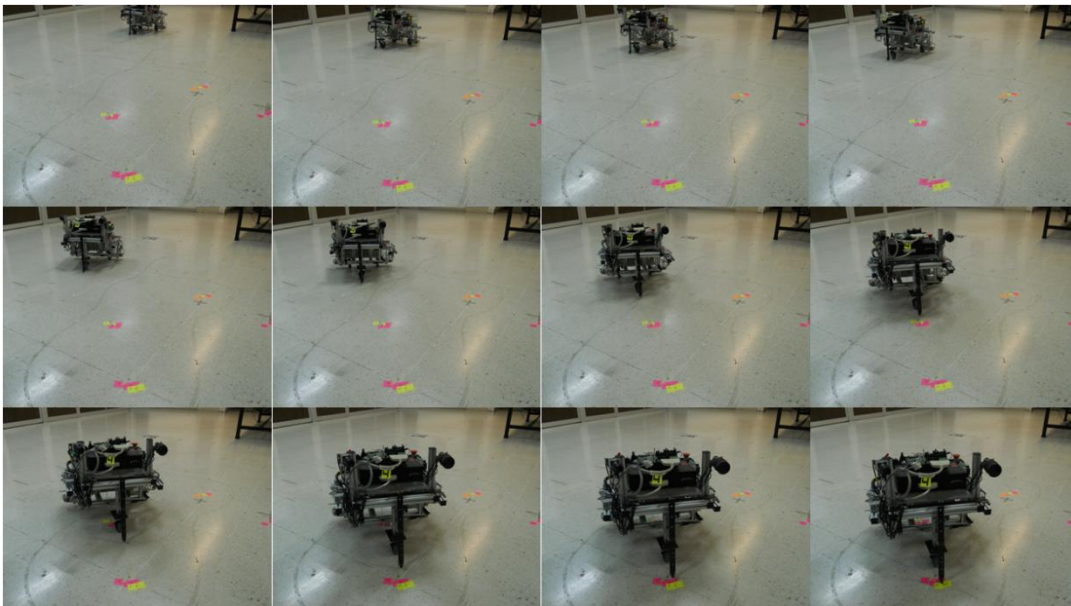


Figura 4.33. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 4 del robot móvil.

En las tablas 4.13 y 4.14 se marcan con azul los valores mínimos y con rojo los valores máximos.

En la tabla 4.13 se muestra los resultados de las pruebas realizadas. La precisión se evalúa con la orientación y la posición del efector, mientras que para evaluar la repetibilidad en esta tabla se midió la distancia entre el punto de llegada con los puntos de llegada registrados en las otras pruebas.

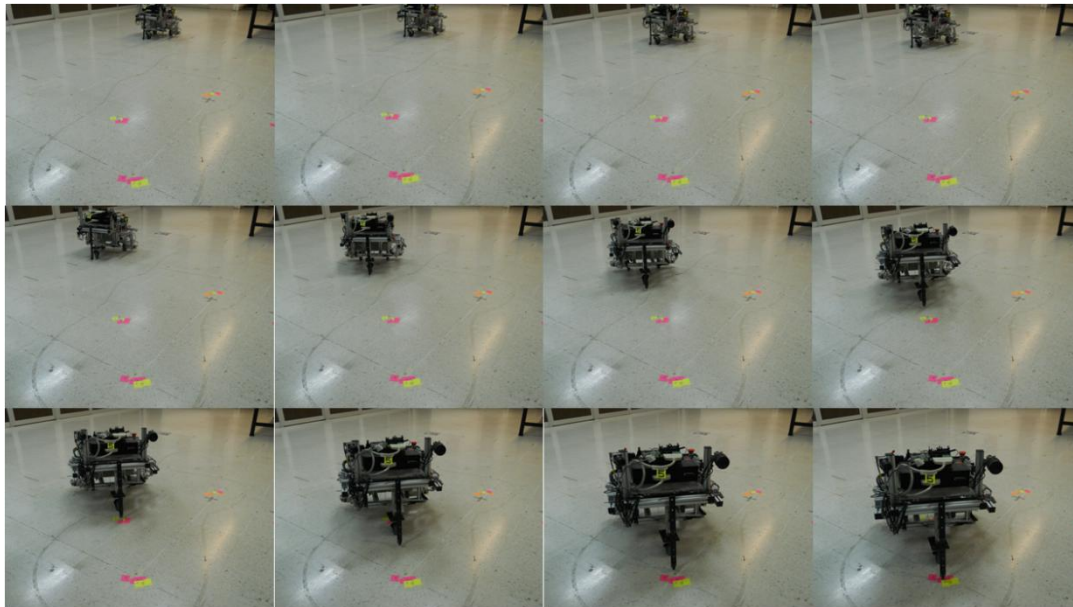


Figura 4.34. Secuencia del recorrido del robot móvil durante la prueba 5 del robot móvil.

Prueba	Orientación efector (°)	Posición efector (mm)	Repetibilidad efector (mm)				
			1	2	3	4	5
1	45	53		13	28	12	36
2	45	63	13		24	8	34
3	45	52	28	24		18	10
4	45	63	12	8	18		29
5	45	49	36	34	10	29	

Tabla 4.13. Resultados de la orientación y posición del efector.

Prueba	Posición centro (mm)	Repetibilidad centro (mm)				
		1	2	3	4	5
1	59		9	25	60	31
2	62	9		21	8	28
3	52	25	21		14	22
4	60	60	8	14		9
5	44	31	28	22	9	

Tabla 4.14. Resultados de la posición del origen del robot móvil.

En la tabla 4.14 se muestra la precisión de robot móvil, con respecto a la posición del origen “teórico y el real”, y se realiza la medición entre los puntos de llegada.

La distribución de puntos de llegada del efector final y del origen del robot móvil, se muestran en la fig.4.35, a comparación de la fig. 4.21 en la sección 4.2.6, los puntos de llegada del efector final se encuentra en un rango más compacto.

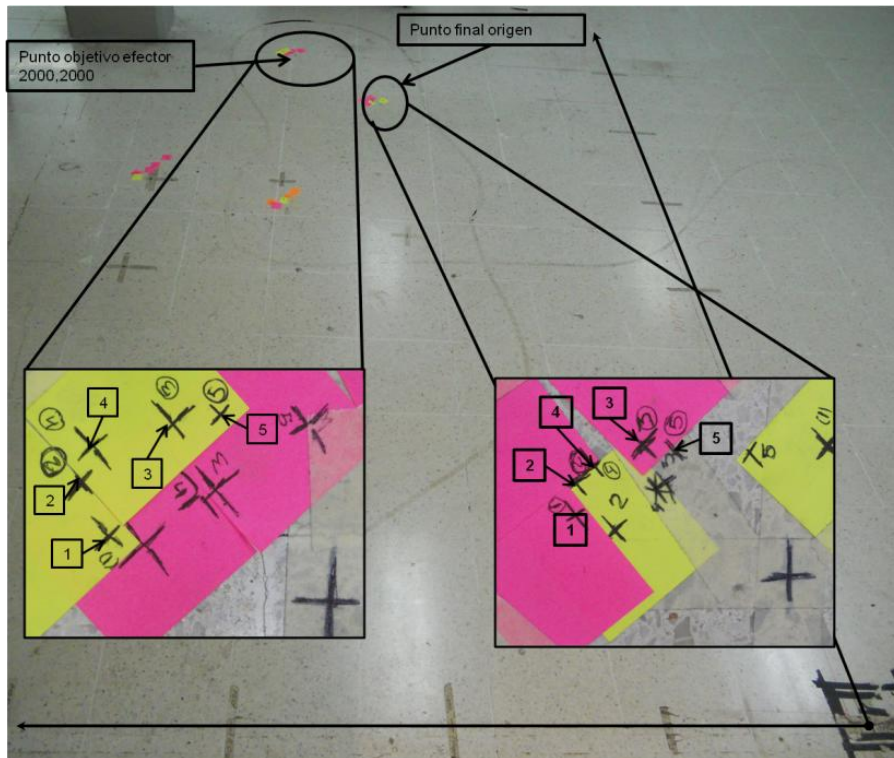


Figura 4.35. Distribución de los puntos de llegada.

Resultados finales de precisión:

Error mínimo en ubicación (mm):49

Error máximo en ubicación (mm):63

Error promedio ubicación (mm):56

Orientación mínima (grados):45

Orientación máxima (grados):45

Promedio orientación (grados): 45

Resultados finales repetibilidad en el efector:

Distancia mínima entre puntos (mm):8

Distancia máxima ente puntos (mm):36

Conclusiones:

- Los puntos de llegada del efector final tienen un rango de repetibilidad de 36mm. Se llegó a una precisión de 44mm de error en posición.
- El error mínimo en posición es 49 mm que corresponde al 1.59% de la distancia total recorrida.
- El error máximo en posición es 63 mm que corresponde al 2.04% de la distancia total recorrida.
- En lo que respecta a orientación todas las pruebas obtuvieron la orientación deseada y en la prueba 5 se obtuvo la mejor precisión con un error de 49 mm.
- El robot móvil se detiene después del punto objetivo es originado en parte por el deslizamiento de las ruedas con el suelo aunado a los efectos inerciales del robot no considerados en la modelación. Otra parte es debido al perfil de velocidades propuesto.

4.3. Análisis dinámico del robot móvil CIEP_01

En esta sección se mencionarán algunos efectos dinámicos del robot móvil observados durante las pruebas experimentales, que fueron el deslizamiento y las perturbaciones de la rueda loca.

*El generador de trayectorias **sólo** considera la cinemática del robot móvil y en las pruebas experimentales **no** se considera ninguna retroalimentación de algún sensor (cámara, ultrasonido ó lector laser).*

Las variaciones del modelado teórico con respecto a las pruebas experimentales se pueden atribuir a los siguientes efectos dinámicos:

- Perfil de velocidad, que del teórico al que se ejecuta en el robot móvil varía. Esta variación corresponde a que no se está considerado el peso del robot móvil. Tampoco se tienen un algoritmo para compensar las ganancias de los motores.
- Deslizamiento de las ruedas motrices contra la superficie de contacto, ya que se tienen una rueda lisa de nylamind contra una superficie que en este caso es un piso liso.
- Singularidades de la rueda loca, que se relacionan con las perturbaciones registradas en las pruebas experimentales.

4.3.1. Perfil de velocidad

En la sección 3.2, se definen las curvas de aceleración y velocidad del robot móvil con respecto a la distancia total recorrida. En la fig.4.36 se observa que al empezar el movimiento la aceleración es máxima y la velocidad empieza a aumentar en forma proporcionalidad hasta que llega a un punto máximo. Una vez que la velocidad está en su punto máximo se mantiene constante hasta la distancia correspondiente para empezar a desacelerar. Cuando empieza a desacelerar se supone que la aceleración llega a su punto máximo instantáneamente y empieza la disminución de la velocidad hasta llegar a cero en el 100% de la distancia recorrida.

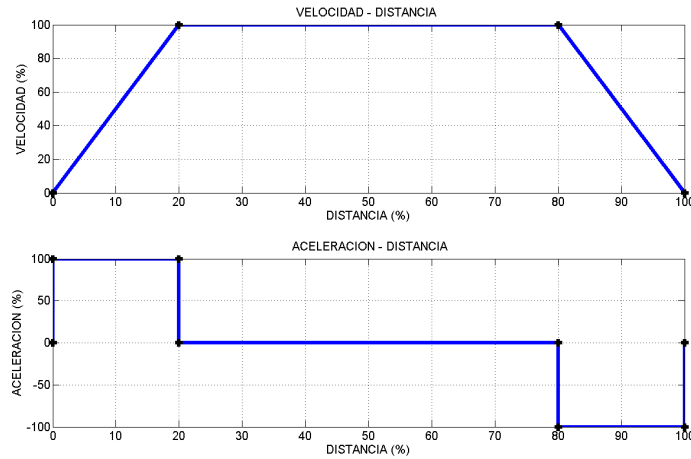


Figura 4.36. Perfil teórico de velocidad y aceleración en relación con la distancia total recorrida

En la práctica el perfil de velocidades se muestra en la fig.4.37, en esta figura se exagera la escala de las variaciones de la aceleración y velocidad. La línea azul es el perfil de velocidad y aceleración definido, la línea verde el perfil de velocidad y aceleración real. Esta variación es producida por que los motores del robot móvil no son capaces de alcanzar la aceleración o desaceleración de forma instantánea, si no que requieren un tramo de distancia para alcanzar la velocidad deseada.

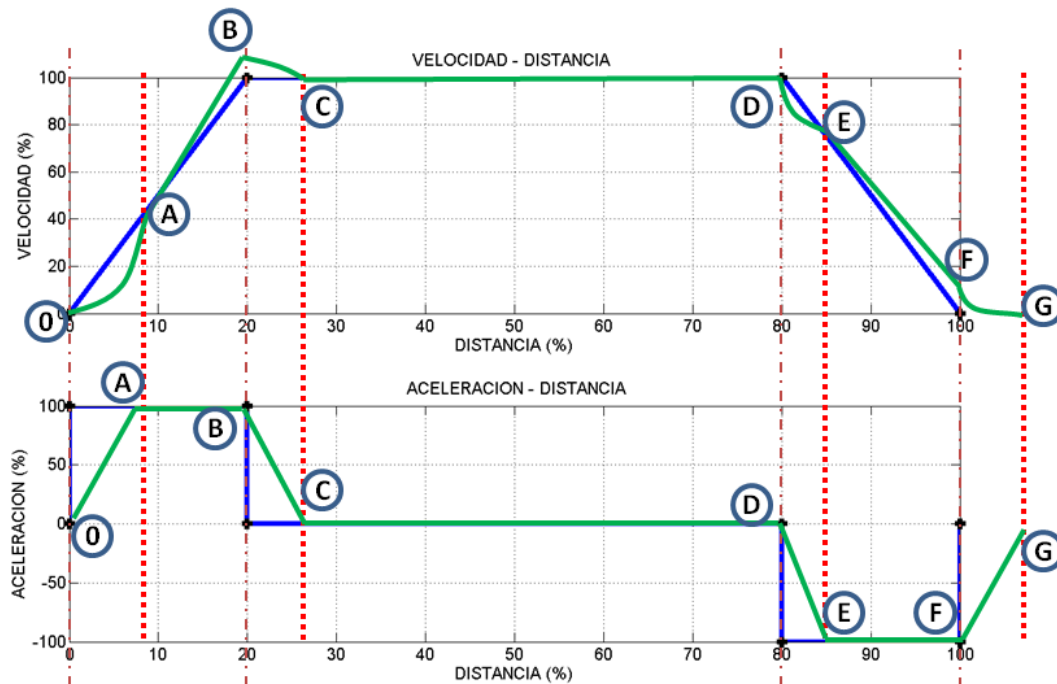


Figura 4.37. Perfil real de velocidad y aceleración en relación con la distancia total recorrida.

En la fig. 4.37, se muestran varios puntos del perfil de velocidades que se describen en la tabla 4.15.

Trayecto	Aceleración	Velocidad
0-A	Aumenta en línea recta	Aumenta con una curva de segundo orden
A-B	Constante	Aumenta en línea recta
B-C	Disminuye en línea recta	Disminuye con una curva de segundo orden
C-D	Cero	Constante
D-E	Disminuye en línea recta	Disminuye con una curva de segundo orden
E-F	Constante	Disminuye en línea recta
F-G	Aumenta en línea recta	Aumenta con una curva de segundo orden

Tabla 4.15. Definición de los trayectos en el perfil de velocidad real.

En los trayectos 0-A, D-E, F-G, en donde se tienen que cambiar de “estado” como son de estar en reposo a tener movimiento o viceversa.

0-A.- Es el tramo donde el robot móvil tiene que cambiar de su estado estático a un estado de movimiento.

D-E.- Es el tramo donde empieza la desaceleración y debe contrarrestar el impulso generado por la velocidad alcanzada por el robot móvil.

F-G.-Es el tramo que se debe eliminar todo el impulso generado por la velocidad alcanzada por el robot móvil y debe cambiar su estado de movimiento a un estado estático.

Según los resultados de las pruebas realizadas en el robot móvil CIEP_1 toma importancia por las características físicas del robot. Entre ellas que el centro de gravedad no cruza por el eje de rotación de la ruedas de tracción como se muestra en la fig.4.38, teniendo como consecuencia la disminución de la fuerza de fricción entre las ruedas de tracción y la superficie, lo que genera un deslizamiento de las ruedas.

Si disminuye la fuerza de fricción de la superficie y las ruedas de tracción, produce un deslizamiento, lo que ocasiona que el perfil de velocidades tenga variaciones.

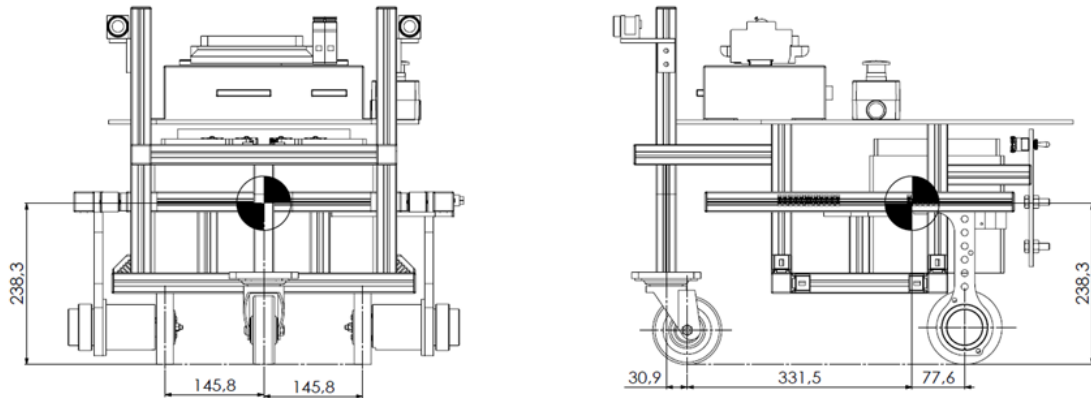


Figura 4.38. Localización del centro de gravedad de la configuración del robot móvil utilizada en la pruebas experimentales.

A demás de que no se tiene ningún control dinámico del robot móvil, lo que produce que en las pruebas del robot móvil éste se detenga unos milímetros adelante del punto objetivo. Por lo que se recomienda como trabajo a futuro implementar un sistema de frenado para que la disminución de la velocidad no dependa únicamente de los motores de tracción.

4.3.2. Singularidades de la rueda loca (rueda orientable descentrada)

En general en los modelos cinemáticos de los vehículos, no se toman en cuenta las velocidades de las ruedas y los ángulos de orientación de las ruedas locas. De modo que hay valores que pueden llegar a influir en la movilidad y provocar una singularidad no considerada en el modelo cinemático. Esta singularidad implicará, deslizamiento o pérdida de movilidad en el vehículo.

Luis Gracia en su trabajo de tesis realiza un estudio sobre la singularidad de las ruedas locas haciendo un planteamiento geométrico para encontrar las singularidades [16]. De su planteamiento geométrico se destaca las siguientes reglas para ubicar geoméricamente las singularidades de las ruedas locas.

Para un modelo cinemático con un conjunto m de velocidades de rueda libremente asignadas, donde m es el grado de movilidad actual, se produce singularidad cuando las siguientes rectas son paralelas o intersectan en un punto en común:

1. Los ejes de rotación de todas las ruedas fijas, orientables y omnidireccionales singulares;
2. Las rectas definidas por los planos de todas las ruedas fijas, orientables descentradas (locas) con la velocidad de rotación como asignada;[16]

Si se analiza la configuración del robot móvil CIEP_1 utilizada para las pruebas experimentales y se aplica las definiciones de singularidad anteriores, obtiene los ángulos de singularidad de la rueda loca (orientable). En la fig. 4.39 se muestra las cuatro formas de singularidad que tiene la configuración del robot CIEP_1.

En la fig. 4.39 (a), se muestra la singularidad cuando los ejes de rotación son paralelos.

En la fig. 4.39 (b), se muestra la singularidad cuando el eje de rotación de la rueda loca se intersecta en un punto de las ruedas de tracción.

En la fig. 4.39 (c), se muestra la singularidad cuando la recta del plano de las rueda loca y las ruedas fijas se intersectan.

En la fig. 4.39 (d), se muestra la singularidad cuando la recta del plano de las rueda loca se intersecta en un punto de las ruedas de tracción.

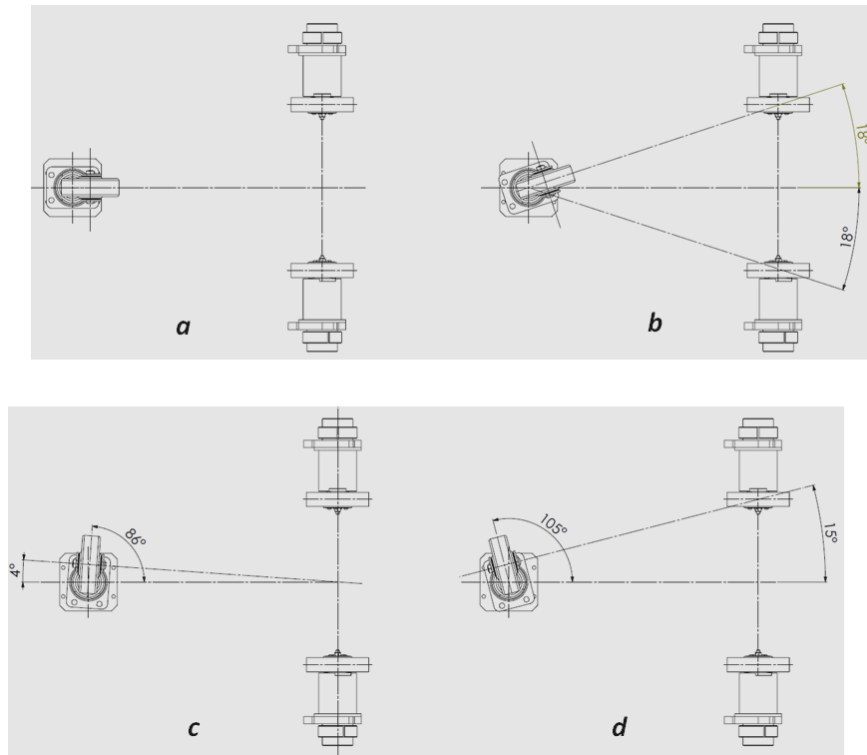


Figura 4.39. Singularidades de la rueda loca en la configuración del robot móvil CIEP_1.

Las singularidades de la rueda loca, provocan que el robot móvil CIEP_1 no llegara a la posición deseada. El efecto de la singularidad en la rueda loca no se considera en los generadores de trayectorias a nivel modelación. Esto provocó que surgieran diferencias entre los resultados experimentales con los resultados teóricos obtenidos en modelación.

4.4. Discusión final de resultados

Una vez terminadas las pruebas experimentales se puede destacar que el algoritmo de generación de trayectorias funciona adecuadamente porque reproduce la trayectoria teórica, pero como está programado en un control de lazo abierto la precisión con la que llega al punto objetivo no es la esperada, ya que los efectos dinámicos no considerados influyen en que se pueda alcanzar una mejor precisión experimental para alcanzar el punto objetivo.

Después de revisar los ocho experimentos representativos con diferentes configuraciones del robot móvil CIEP_01, y con dos formas de ejecutar las trayectorias y probar diferentes coordenadas y orientaciones, se ha realizado un resumen de los resultados. En la tabla 4.16, se reportan los resultados de los experimentos 3 a la 8, que fueron realizadas con la misma configuración mecánica.

Experimento	Orientación efector (°)		Error en posición del efector (mm)		Valor repetibilidad (mm)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3	59	55	25	102,5	4	99,5
4	60	55	55	87	5	66
5	75	70	70	150	13	150
6	75	74	55	78	7	23
7	45	43	37	53	4	74
8	45	45	49	63	8	36

Tabla 4.16. Distribución de los puntos de llegada

Las conclusiones a las que se llegaron con respecto a la movilidad del robot, son las siguientes:

- Del experimento 1, que se realizó con una dirección tipo Ackerman, se comprobó la funcionalidad del control de la dirección con el algoritmo propuesto. Por medio de los resultados se pudo comprobar el limitado desempeño del robot que ya se tenía previstos debido a que las características de potencia y mecánicas del robot no son las adecuadas para soportar el peso del hardware de control.
- Del experimento 2, donde se utilizó como rueda “loca” una rueda fabricada de aluminio de 200 mm de diámetro, se observó que la rueda “loca” generaba perturbaciones en la trayectoria, lo cual inducía errores grandes de precisión comparados con los obtenidos a partir de los experimentos 3 al 8.

- Los experimentos 3 a la 8, se realizaron con una rueda “loca” comercial, esta rueda redujo las perturbaciones en comparación de la rueda loca instalada en el experimento 2.

Las conclusiones a las que se llegaron con respecto a la generación de trayectorias, corresponden a los experimento de la 3 a la 8 y son las siguientes:

- Del comparativo de la tabla 4.16, entre los resultados obtenidos con el polinomio de cuarto orden muestra una mejor precisión en sus resultados a diferencia de los obtenidos con los que se obtuvieron al utilizar los splines cúbicos.
- Con el spline cúbico se tiene una mejor repetibilidad que con el polinomio de cuarto orden, esto se observa en la tabla 4.16.
- Con el spline cúbico se tiene una mejor orientación que con el polinomio de cuarto orden, esto se observa en la tabla 4.16.
- Las perturbaciones que genera la rueda “loca”, afecta más al polinomio de cuarto orden y se refleja en su repetibilidad y en la orientación final del efector. En el spline cúbico estas perturbaciones no afectan de manera significativa porque en su curva final (spline 2), se hace una trayectoria que es una aproximación a una línea recta y la cual es menos susceptible.
- El problema del deslizamiento afecta a las dos trayectorias, se observa que el indicador del efector pasa por encima de la marca del objetivo antes que el robot se detengan, cuando el robot logra detenerse totalmente se ha rebasado la posición de la marca objetivo.
- El deslizamiento es generado en el momento que el robot móvil empieza a disminuir su velocidad, el impulso logrado no se compensa por la desaceleración que el motor y las ruedas logran para tratar de detener el movimiento y llevarlo a cero.

En conclusión se propone utilizar las trayectorias generadas por splines cúbicos, por las siguientes razones.

- Se tiene mejor repetibilidad en las trayectorias generadas con splines cúbicos que con las trayectorias generadas con un polinomio de cuarto orden.
- Se registró una menor variación en la orientación final.
- Se observó una menor afectación por las perturbaciones de la rueda “loca”.
- Se propone utilizar un control en lazo cerrado y que la retroalimentación se base en visión para corregir los diferentes efectos dinámicos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se planteó como objetivo integrar el hardware de control (módulo de control) en una plataforma móvil para la implementación de pruebas de algoritmos generadores de trayectorias. Al principio del trabajo se contaba con la suspensión cinemática desarrollada por Víctor Medina [10]. El objetivo se cumplió al tener funcionando correctamente el robot móvil CIEP_01.

La clave para que se cumpliera el objetivo planteado fue el satisfacer los dos objetivos específicos del trabajo. El primer objetivo era integrar el hardware con el software. El segundo era desarrollar e implementar un algoritmo generador de trayectorias. A continuación se enlistan las principales aportaciones del trabajo divididas según los objetivos específicos propuestos.

Integración hardware-software

En esta parte del proyecto, se llevó a cabo la integración del módulo de control (ver capítulo II), logrando flexibilidad de conexión y desconexión entre los diferentes módulos que conforman las reconfiguraciones mecánicas del CIEP_1, (ver capítulo I), de esta etapa se reportan las siguientes aportaciones del trabajo:

- Se integraron los componentes de control dentro de una estructura fabricada de perfil de aluminio, a todo esta integración se le llama módulo de control. Este módulo de control se diseñó de tal forma que si es necesario desmontarlo del robot móvil, éste pudiera desensamblarse rápidamente. Los conectores de alimentación de los motores y de los encoders se desconectan. Después se pueden retirar los tornillos de fijación del módulo de control con las estructura principal del robot móvil.
- Se logró un sistema flexible de reconfiguración del tipo de dirección. Cuando se requirió pasar de una dirección de tipo Ackerman a una configuración de dirección tipo diferencial con tres ruedas. Este cambio se realizó un tiempo dos horas. Sin requerir ningún cambio en el módulo de control.
- Se implementó una red inalámbrica, utilizando un ruteador. Esto flexibiliza la comunicación entre la computadora y la tarjeta de control de movimiento. La red inalámbrica permite que se opere el robot móvil de una forma remota (sin que la computadora esté a bordo del robot). La velocidad de la red inalámbrica es de 5.74 milisegundos, mientras con conexión con cable es de 3.3 milisegundos.
- El módulo de control permite, la conexión de diferentes sensores (ópticos, ultrasonidos, inductivos, etc.) y la operación remota desde la red inalámbrica. Es posible la lectura de diferentes tipos de señales de control, esto gracias a la variedad de entradas y salidas digitales como analógicas con las que cuenta la tarjeta de control de movimiento.

Además que el módulo de control cuenta con los siguientes voltajes +5, +12 y +24 volts en directa y 110 volts en alterna para la alimentación de periféricos. La tarjeta de control tiene “libres” 8 entradas analógicas y 40 entradas digitales I/O.

- Se desarrolló un programa en lenguaje C++, para realizar envíos de instrucciones al módulo de control. Para este fin se programaron los siguientes módulos de funciones: a) función para establecer comunicación con el controlador, b) función para reiniciar parámetros del controlador, c) función para configuración de parámetros, d) función para envío de incrementos a los motores y lectura de los encoders. Estos módulos de funciones se agruparon en una librería en lenguaje C++. La librería permitió una flexibilidad en la programación del algoritmo generador de trayectorias al ser independiente del tipo de trayectoria a utilizar.
- Se desarrollaron programas en Matlab para la modelación y simulación de los algoritmos de generación de trayectorias. Una vez validados estos algoritmos se fueron implementando en programas en lenguaje C++. Por lo cual se realizó una librería con módulos de funciones que son utilizados en los algoritmos de generación de trayectorias.

Generación de trayectorias

En lo que corresponde a los algoritmos de generación de trayectorias, se propusieron, analizaron y se probaron a nivel de simulación varios modelos de trayectorias. Los modelos se basaron en funciones polinomiales y spline cúbicos (ver capítulo III) para posteriormente validarse experimentalmente en el robot móvil CIEP_1 (ver capítulo IV). Para lo cual se realizó lo siguiente:

- Se desarrolló un algoritmo generador de trayectorias basado en funciones que son independientes en el tiempo. La independencia en el tiempo se logró definiendo un perfil de velocidad, además de la segmentación de las funciones propuestas.
- Se implementó un programa generador de trayectorias con base en un polinomio de cuarto orden. Se buscó generar una curvatura “suave” en la que su primer derivada debería tener pendientes positivas en los segmentos finales (ver sección 3.2).
- Se programó un polinomio de cuarto orden, que permite determinar el ángulo de orientación y posición final del efector del robot móvil. En lo que corresponde al modelo de la trayectoria de un polinomio de cuarto grado se combinaron la segmentación fina y la segmentación uniforme (ver sección 3.2.1.1 y 3.2.1.2).

- Se desarrolló otro algoritmo generador de trayectorias basado en un spline. El spline se forma con dos funciones cúbicas permitiendo ser definida la posición y orientación del efector final del robot. La primera función cúbica del spline no se le restringe la curvatura, mientras que la segunda función se aproxima a una línea recta. Estas dos curvas se generan con tres puntos de control, el primer punto corresponden al origen del robot móvil y el último al punto final al que debe llegar el origen del robot móvil. Para el punto intermedio se desarrolló un algoritmo para definir su ubicación (ver sección 3.3).
- Se estableció una clasificación para el tipo de trayectorias que se generan en base a la factibilidad de ejecución y sus resultados obtenidos para el robot móvil. Esta clasificación se presenta continuación:
 - Zona I, abarca las trayectorias de ángulos de orientación final menor a 15° .
 - Zona II, abarca las trayectorias de ángulos mayores de 85° .
 - Zona III, abarca las trayectorias con un T_x , menor o igual a un tercio de T_y .
 - Zona IV, abarca todas las trayectorias restantes.
- Se evaluaron en las pruebas experimentales, la precisión y la repetibilidad. En la parte de precisión los mejores resultados fueron los que se obtuvieron con la trayectoria generada por polinomio de cuarto orden. En repetibilidad las trayectorias generadas por spline fueron las que mostraron mejores resultados.
- El polinomio de cuarto orden, es más sensible a las perturbaciones que genera la rueda “loca”. Estas perturbaciones se generan cuando la rueda “loca” desliza provocando un cambio de orientación en el robot móvil. Recordando que la curva generada por el polinomio de cuarto orden, se aproxima por pequeños segmentos de arcos de circunferencia, y la orientación final del robot móvil es la suma de los arcos de circunferencias, entonces si existen un deslizamiento en la rueda “loca”, esto provoca un cambio en la orientación que al no tener retroalimentación el sistema, no es posible compensar para lograr la orientación deseada.
- Las trayectorias generadas por los spline cúbicos se ven afectadas de menor manera por las perturbaciones generadas por la rueda “loca”, estas perturbaciones afectan la orientación final del efector en menor grado, porque cuando empieza el último spline el robot móvil se orientó un 80% de la orientación final, de tal forma que las perturbaciones debidas a la rueda loca ya no son significativas en la orientación final.
- En lo que se refiere en precisión final del efector, se encontró que el deslizamiento les afecta por igual a las dos formas de generar las

trayectorias (ver sección 4.5). El deslizamiento se produce, cuando el robot móvil llega a su velocidad máxima, adquiere inercia y se requiere frenar abruptamente pero el sistema no se detiene al instante sino que continua, el modelo no consideró este efecto dinámico sólo se considera la cinemática del robot móvil.

- Se comprobó el funcionamiento del robot móvil CIEP_1 con una configuración de dirección tipo Ackerman. Se observó el adecuado funcionamiento del control con cuatro motores. Como era esperado, la precisión en las pruebas con dirección tipo Ackerman es menor que las pruebas con dirección tipo diferencial, el robot móvil no está diseñado para soportar su propio peso más el peso del módulo de control, lo que ocasiona un movimiento errático y dificultades para detenerse una vez comenzado el movimiento.

Recomendaciones y trabajo a futuro

Para continuar en el desarrollo del robot móvil CIEP_1 se presentan a continuación algunas recomendaciones para mejorar la movilidad del robot móvil y mejorar la precisión del mismo.

- Cuando se requiera utilizar una dirección tipo Ackerman, es necesario que los motores a utilizar, tengan una caja de reducción de tipo engranes planetarios lo suficientemente robusta.
- Implementar un freno a las ruedas para detener gradualmente el robot móvil, y no depender únicamente de la reducción de la velocidad por medio de los motores.
- Realizar un algoritmo para adecuar las ganancias de los servomotores en base a la velocidad lineal deseada del robot móvil.
- Mejorar la precisión del efector, con respecto al punto deseado con una retroalimentación por visión.
- Integrar diferentes tipos de sensores para retroalimentación de la posición, aprovechando las entradas y salida de la tarjeta de control de movimiento y la comunicación inalámbricas.
- Cambiar las cámaras USB, por cámaras que tengan comunicación ethernet, esto con el fin de aprovechar la red inalámbrica.
- Diseñar, fabricar e instalar un brazo manipulador al robot móvil.
- Realizar una aplicación para smartphone (teléfono inteligente), para controlar el robot móvil, a partir de la red inalámbrica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Aníbal Ollero Baturone, *“Robótica, Manipuladores y robots móviles”*, Editorial Alfaomega Grupo Editorial, 2007.

[2] Elena García, María Antonia Jiménez, Pablo González de Santos, Manuel Armada, *“The evolution of robotics research from industrial robotics to field and service robotics”*, IEEE Robotics and automation magazine, pp 1070-9932, 2007.

[3] G.H.Ballantyne and F. Moll “The da Vinci telerobotic surgical system : The virtual operative field and telepresence surgery”, Surg. Clin. North. Amer., vol. 86, n° 6, pp 1293-1304, 2003.

[4] T. Takubo, K. Inove, and T. Arai, “Pushing an object considering the hand reflect forcé by humanoid robot in dinamic walking”, IEEE Int, Conf. Robotics Automation, pp 1718-1723, 2005.

[5] <http://www.darpagrandchallenge.com>, Oct. 2011.

[6] <http://www.tartanracing.org/index.html>, Oct. 2011.

[7] <http://marsrover.nasa.gov/overview/>, Oct. 2011.

[8] <http://msl-scicorner.jpl.nasa.gov/ScienceGoals/>, Oct. 2011.

[9] Víctor Matus, Mauro Maya, Luis Murillo, Antonio Cárdenas, *“Diseño y construcción de un robot móvil de tipo unicycle”*, VII Reunión Internacional de Ingeniería Mecánica 2011.

[10] Victor Medina Rivera, Antonio Cárdenas, Hugo Medellín, Alejandro Perez, *“Kinematical design and simulation of a mobile robot with adaptable suspension”*, ASME 2011 International Mechanical Engineering Congrees & Exposition.

[11] Nelson David Muñoz, Carlos Andrés Andarde, Nelson Londoño, *“Diseño y construcción de un robot móvil orientado a la enseñanza”*, Ingeniería & Desarrollo, Número 19, Enero-Junio, 2006, pp 114-127.

[12] Qun Ma, *“Supervisory Control of a Mobile Robot Using Point-and-Click Mobile Camara-Space-Manipulation”*, Tesis Maestria Universidad de Notre Dame, 2000.

[13] Juan Antonio Cárdenas Galindo, *“A visión-guidance strategy to control hybrid holonomic / nonholonomic robot”*, Tesis doctoral Universidad de Notre Dame, 2003.

[14] Jingang Yi, Hongpeng Wang, Dezhen Song, Suhada Jayasuriya, Jingtai Liu, *“Kinematic Modeling and Analysis of Skid-Steered Mobil Robots Whit Applications to Low-Cost Inertial-Measurement-Unit-Based Motion Estimation”*, IEEE Transactions on Robotics, Vol. 25, N°5,2009.

[15] Ríos G, Luis Hernando, Bueno L. Maximiliano, “*Modelo matemático para robot móvil*”, Colombia, Scientia Et Technica, Vol XIV, Num 38, Junio 2008, pp13-18.

[16] Luis Ignacio Gracia Caladín, “*Modelado cinemático y control de robots móviles con ruedas*”, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2008.

[17] Heriberto Casarubias Vargas, “*Generación de trayectorias para un robot móvil Khepera II usando técnicas de aprendizaje automático*”, Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2007.

[18] Yandun Torres Aracely Inés, “*Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil*”, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2011.

[19] Fernández Lancha Miguel Ángel, Fernández Sanz David, Valmaseda Plasencia Carlos, “*Planificación de trayectorias para un robot móvil*”, Proyecto de sistemas informáticos, Universidad Complutense Madrid, España, 2010.

[20] F. Reyes C., J. Cid M., J. Méndez M., G Villegas R., F. Porras S., A Lara E., “*Diseño, modelado y construcción de un robot móvil*”, Segundo congreso nacional de electrónica, México, 2002.

[21] Fernández Lorenzo Ignacio, “*Sistema de posicionamiento absoluto de un robot móvil utilizando cámaras externas*”, Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá, España, 2005.

[22] Adept Technology Inc, “*Aqua2*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[23] Adept Technology Inc, “*Maveric*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[24] Adept Technology Inc, “*Seekur*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[25] Adept Technology Inc, “*Seekur Jr*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[26] Adept Technology Inc, “*Pioneer 3-AT*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[27] Adept Technology Inc, “*Pioneer 3-DX*”, www.mobilerobots.com, abril 2012.

[28] Festo, “*Robotino*”, www.festo.com/cms/es-mx_mx/11450.htm, agosto 2012.

[29] K Team Mobile Robotics, “*Khepera II*”, <http://www.k-team.com/mobile-robotics-products/khepera-ii>, agosto 2012.

[30] del Rio Hernán, da Silva Gillig Julián, Schmit Rubén Xior, “*Diseño de un robot móvil autónomo experimental*”, Worlshop del CAFR2004

[31] Pérez Jorge, Tovar Saúl, Villaseñor Ubaldo, Gorrostieta Efrén, Pedraza Jesús, Vargas José, Ramos Juan, Sotomayor Artemio, “*Robot móvil de tracción diferencial con plataforma de control modular para investigación y desarrollo ágil de proyectos*”, 10° Congreso Nacional de Mecatrónica, Puerto Vallarta, Jal, Mex.

[32] Arroyave Maribel, Mazo Diana, Cano Juan, Arias Muricio, Vergara Jairo, Londoño Nelson, Nelson David, Sierra Carlos, “Robot para navegación en terrenos irregulares”, *Scientia Et Technica*, Vol. XII, Num. 32, 2006, pp 79-84.

[33] Siegwart R., “Mobile Robots Facing the Real World”, in Springer Tracts in Advanced Robotics. Germany, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, vol. 24, pp. 21-30, 2006.

[34] Lauria, M., Piguet, Y. and Siegwart, R., “Octopus - An Autonomous Wheeled Climbing Robot”, Fifth International Conference on Climbing and Walking Robots, Bury St Edmunds and London, UK, 2002.

[35] Kucherenko, V., Bogatchev, A., Van Winnendael, M., “Chassis Concepts for the ExoMars Rover”, Paper presented at the 8th ESA Workshop on Advanced Space Technologies for Robotics and Automation (ASTRA'04), Noordwijk, The Netherlands, 2004.

[36] Galil Motion Control Inc, “*DMC Win32 Galil Windows API Toll Kit*”, User manual, manual rev 2.2.

[37] Galil Motion Control Inc, “*DMC-21x2/21x3*”, User manual, manual rev 1.0g.

[38] Galil Motion Control Inc, “*Command reference*”, Optima/Econo DMC-2xxx series, manual rev 1.04.

[39] Galil Motion Control Inc, “*Manual Tuning Methods*”, Application Note #3413.

[40] Galil Motion Control Inc, “*Connecting to a Ethernet controller from Windows*”, Application Note #3413.

[41] Martín-Larrauri Jaime Boal, “Desarrollo de un robot 4x4 para la navegación por terreno agrestes”, Proyecto fin de carrera, Universidad Pontificia Comillas, Madrid 2010.

APÉNDICE

Comandos de la tarjeta Galil

Se enlistan los siguientes comandos de la tarjeta de control de movimiento, clasificados por la función que desarrollan.

Control

KD	Ganancia derivativa, puede tener valores de 0 a 4095.875 en incrementos de 1/8.
KI	Ganancia integrativa, puede tener valores de 0 a 2047.875 en incrementos de 1/128
KP	Ganancia proporcional, puede tener valores de 0 a 1023.875 en incrementos de 1/8
TE	Sirve para decir el error en el giro del motor
TK	Delimita el torque pico aplicado al motor, el rango es de 0 a 9.99 volts
TL	Torque limite, limita el voltaje de salida al motor, el rango es de 0 a 9.98 volts

Retroalimentación

TP	Mostrar posición, este comando regresa la posición en la que se encuentra el motor
----	------------------------------------------------------------------------------------

Movimiento simple

AC	Fija la aceleración lineal del motor, su rango es de 1024 a 67107840 en cuentas por segundo cuadrado
BG	Con este comando inicia el movimiento de los ejes o de un eje en específico.
DC	Fija la desaceleración lineal del motor, su rango es de 1024 a 67107840 en cuentas por segundo cuadrado
JG	Con este comando se especifica la velocidad con la que se debe hacer los movimientos, tiene un rango es de 0 a $\pm 12\ 000\ 000$ cuentas por segundo.
PA	Fija la posición final de cada eje (motor). La posición esta referenciada con el cero absoluto de cada eje. Su rango es de -2147483648 a 2147483647
PR	Fija la el incremento de distancia y dirección para el movimiento de cada eje (motor). El movimiento esta referenciada con respecto a la posición anterior.
SP	Fija la velocidad de cada eje, para movimientos independientes. Su rango es de 0 a $\pm 12\ 000\ 000$ cuentas por segundo.

Movimiento vectorial

CA	Este comando especifica el sistema del movimiento coordinado.
CS	Limpia la secuencia de un movimiento coordinado.
LE	Define el último incremento para un movimiento coordinado.
LI	Especifica el incremento de cada eje, en un movimiento

VA	coordinado. Tiene un rango de -8 388 607 a 8 388 607 cuentas Vector de aceleración, define la aceleración para un movimiento coordinado. El rango es de 1024 a 68 431 360 en cuentas por segundo cuadrado.
VD	Vector de desaceleración, define la desaceleración para un movimiento coordinado. El rango es de 1024 a 68 431 360 en cuentas por segundo cuadrado
VS	Vector de velocidad, especifica la velocidad en un movimiento coordinado. El rango es de 2 a 12 000 000 de cuentas por segundo.