

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA

TESIS DE MAESTRÍA

**Desarrollo de una Plataforma
Experimental para el Modelo Cinemático
de un AGV con Carga Variable**

Autor:

Xavier García Gutiérrez

Director de tesis:

Dra. Wendy Flores
Fuentes

Co-Director de tesis:

Dr. Oleg Sergiyenko

Tesis en cumplimiento de los requisitos para
obtener el grado de Maestro en Ciencias
en la

Facultad de Ingeniería

Campus Mexicali

Mexicali, B. C. a 27 de Junio de 2022



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
MEXICALI**

Declaración de Autoría

Yo, Xavier de Jesús García Gutiérrez, declaro que esta tesis titulada «*Desarrollo de una Plataforma Experimental para el Modelo Cinemático de un AGV con Carga Variable*» y el trabajo presentado en esta es de mi autoría. De igual manera confirmo que:

- Este trabajo fue realizado por completo o principalmente para obtener el grado de maestría en esta universidad.
- Donde cualquier parte de esta tesis fue revisada por mi comité.
- Donde consulté el trabajo publicado por otros, siempre es atribuido claramente.
- Donde he citado el trabajo de otros, la fuente siempre es proporcionada. Con excepción de esas citas, esta tesis es completamente mi trabajo.
- Reconocí todas las fuentes de principal ayuda.
- Donde la tesis es basada en trabajo hecho por mí en conjunto con otros, se aclara exactamente que fue realizado por otros y cuál es mi contribución.

Firma: _____

Fecha: _____

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Resumen

Facultad de Ingeniería

Campus Mexicali

Maestría en Ciencias.

Desarrollo de una Plataforma Experimental para el Modelo Cinemático de un AGV con Carga Variable

por Xavier de Jesús García Gutiérrez

Esta tesis describe la influencia en la navegación de vehículos guiados automáticamente (AGV, de sus siglas en inglés) al aplicarse una variación en la carga. Se desarrolla en la búsqueda de la optimización en la navegación de AGV's en ambientes industriales con tarea de navegación con carga variable y evasión de obstáculos. El análisis resultante presentado se basa en la evaluación de la influencia que tiene en la navegación un centro de gravedad arbitrario en las traslaciones y rotaciones, que es producto de la variación de la cantidad y la posición de la carga en el AGV durante su trayectoria. El esquema de la navegación se basa en la detección de obstáculos y la evasión de estos mismos en un ambiente desconocido por medio de un método de triangulación dinámica. El modelo cinemático del AGV obtenido en este trabajo fue diseñado con la integración de la información de un sistema de visión artificial para la navegación y considerando la influencia del centro de gravedad arbitrario en el *AGV* debido a las variaciones de su carga durante las trayectorias.

Reconocimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por brindar el apoyo tanto económico como material para financiar el desarrollo de la investigación durante estos 2 años.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), por brindar la oportunidad de estudiar un posgrado y obtener el grado de Maestro en Ciencias.

A la Facultad de Ingeniería (FIM), de la UABC Campus Mexicali, por proveer el equipo necesario para el desarrollo de la investigación.

A mi Directora de Tesis, Dra. Wendy Flores Fuentes por brindar la oportunidad de participar en este proyecto de investigación, por su tiempo y el apoyo al compartir sus conocimientos.

A mi Co-director de Tesis, Dr. Oleg Sergiyenko por trabajar en conjunto con mi comité de tesis para brindar sugerencias de mejora para el desarrollo de mi investigación.

A mi Comité de Tesis, conformado por el Dr. Julio Cesar Rodríguez Quiñonez, Dr. Jesús Elías Miranda Vega y el Dr. Daniel Hernández Balbuena, por su apoyo y retroalimentación de cada semestre en las presentaciones de avance de tesis.

Índice general

Declaración de Autoría	I
Resumen	II
Reconocimientos	III
Índice general	IV
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XI
Siglas	XII
1. Introducción	1
2. Propósito de la Investigación	7
2.1. Antecedentes	7
2.1.1. Primera Generación	7
2.1.2. Segunda Generación	9
2.1.3. Tercera Generación	10
2.1.4. Cuarta Generación	11
2.2. Planteamiento del Problema	12
2.3. Justificación y Uso de los Resultados	13

2.4.	Hipótesis	14
2.5.	Objetivos de la Investigación	15
2.5.1.	Objetivo General	15
2.5.2.	Objetivo específico	15
2.6.	Trabajos Relacionados	16
3.	Marco Teórico	17
3.1.	Configuraciones del <i>AGV</i>	17
3.1.1.	Configuración Estructural	17
3.1.1.1.	<i>AGV</i> de Remolque	18
3.1.1.2.	<i>AGV</i> de Carga Unitaria	18
3.1.1.3.	<i>AGV</i> de Transpaleta	19
3.1.1.4.	<i>AGV</i> de Montacargas	20
3.1.2.	Métodos de Desplazamiento	20
3.1.2.1.	Diferencial	20
3.1.2.2.	Independiente u Omnidireccional	21
3.1.2.3.	Ackerman	23
3.1.2.4.	Triciclo	23
3.2.	Tipos de Control	24
3.2.1.	Control Deliberativo	24
3.2.2.	Control Reactivo	26
3.2.3.	Control Híbrido	27
3.2.3.1.	Nivel Funcional.	28
3.2.3.2.	Nivel Decisivo.	28
3.2.3.3.	Nivel Ejecutivo.	28
3.2.4.	Control Basado en Comportamiento	29
3.3.	Sensores para Posicionamiento y Navegación	30
3.3.1.	Interruptor	32

3.3.2.	Sensor de Luz	33
3.3.3.	Potenciómetros	33
3.3.4.	Sensor Ultrasónico	34
3.3.5.	Sensores Ópticos	36
3.3.5.1.	Optosensor Reflectivo	37
3.3.5.2.	Optosensor de Barrera	38
3.3.6.	Codificador de Eje	38
3.3.6.1.	Codificadores Incrementales	39
3.3.6.2.	Codificadores Absolutos	41
3.3.7.	Sensores Magnéticos	41
3.3.7.1.	Cinta Magnética	43
3.3.7.2.	Clavos Magnéticos	45
3.3.8.	Escáner LÁSER	45
3.3.8.1.	Sistema de Visión Técnica	51
3.3.9.	Sensores de Visión	52
3.3.10.	Sensores Inerciales y <i>MEMS</i>	53
3.3.10.1.	Sensores Inerciales	53
3.3.10.2.	MEMS	54
3.3.11.	RFID	54
3.3.12.	<i>GPS</i>	56
3.4.	Centros de Gravedad de un <i>AGV</i>	57
3.5.	Transformaciones Geométricas	59
3.5.1.	Escalamiento	61
3.5.2.	Traslación	61
3.5.3.	Rotación	62
3.5.3.1.	Rotaciones Principales	63
3.5.3.2.	Rotaciones Generales	64

4. Metodología y Experimentación	67
4.1. Metodología	67
4.2. Experimentación	68
5. Resultados	85
6. Conclusión	90
A. Códigos de Matlab	92
B. Gráficos de Rutas de Matlab	101
C. Resultado de Errores por Pasos	105
Bibliografía	134

Índice de Figuras

1.1. <i>AGV</i> de tipo remolque	2
1.2. "Guide-o-Matic". El primer <i>AGV</i>	3
3.1. Un <i>AGV</i> de remolque transportando carros hacia una línea de producción	18
3.2. Dos <i>AGV</i> de carga unitaria, a la <i>izquierda</i> uno cargado y a la <i>derecha</i> uno sin carga	19
3.3. <i>AGVs</i> de tipo transpaleta en un almacén	19
3.4. Tres <i>AGV</i> tipo montacargas de la flotilla de Deutz	20
3.5. Configuraciones de un <i>AGV</i> diferencial: (a) Dos motores y 4 llantas libres (b) 4 motores (c) 6 motores (d) Llantas de pista continua. . .	21
3.6. Configuraciones independientes de (a) Tres motores, (b) Cuatro motores y (c) Seis motores.	21
3.7. Robot móvil omindireccional Uranus	22
3.8. Una rueda típica con giro para dirección integrada	22
3.9. Configuraciones de un <i>AGV</i> tipo Ackerman. (a) 1 motor giratorio, 2 motores fijos (b) 2 motores giratorios, 2 motores fijos (c) 2 motores giratorios, 2 ruedas de pista continua.	23
3.10. Niveles de procesamiento sensorial	31
3.11. Sensor interruptor de límite.	32

3.12. (a) Potenciómetro rotativo (b) Circuito del potenciómetro (c) Esquema externo	34
3.13. Sensor Ultrasónico HC-SR04	35
3.14. Reflexión especular ultrasónica	36
3.15. Sensor Óptico (a) De barrera (b) Reflectivo.	37
3.16. Tipos de discos ranurados para codificadores ópticos.	40
3.17. Señal de cuadratura codificada para el codificador óptico de dos pistas sin índice.	41
3.18. <i>IZQ</i> : Sensor magnético para navegación. <i>DER</i> : Composición básica de un sensor de efecto Hall.	42
3.19. Intersecciones o entronques realizados con la cinta magnética y las mediciones del sensor.	44
3.20. Marcadores magnéticos para continuar en la intersección hacia la izquierda, a la derecha o detenerse.	44
3.21. Mapa cartesiano de los marcadores magnéticos en un área.	45
3.22. Desplazamiento de fase de la longitud de onda de luz reflejada	46
3.23. Sensor KEYENCE SV-Z	47
3.24. Zonas de detección de sensor láser de seguridad Keyence SV-Z (1) Zona lenta (2) Zona de parada (3) Zona de parada de emergencia . .	48
3.25. Navegación láser	49
3.26. Barrido láser de múltiples canales.	50
3.27. Modelo 3D del mecanismo de inclinación del TVS	52
3.28. Ejemplo de escalamiento en 3D	61
3.29. Ejemplo de traslación en 3D	62
3.30. Rotaciones principales 3D: a) Eje Y en el plano ZX , b) Eje Z en el plano XY , c) Eje X en el plano YZ	64
3.31. Proceso para llevar un segmento arbitrario $\overline{ab}$ sobre el eje X y regresarlo	66

4.1. Nube de puntos que conforman al AGV.	69
4.2. Centro de gravedad de AGV: a) Centro de gravedad en el centroide geométrico, b) Centro de gravedad en un punto arbitrario.	70
4.3. Vistas de AGV: a) Vista lateral, b) Vista trasera.	71
4.4. Nube de puntos con un parámetro de resolución de 1.	71
4.5. Nube de puntos con un parámetro de resolución de 2.	72
4.6. Numeración de puntos de centros de gravedad.	77
4.7. Ruta número 1.	79
4.8. Ruta número 2.	81
4.9. Ruta número 3.	82
4.10. Multi-arreglo para la detección de objetos.	83
5.1. Representación gráfica del error de posicionamiento en los distintos centros de gravedad arbitrarios.	87
B.1. Ruta número 1, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.	101
B.2. Ruta número 1, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.	102
B.3. Ruta número 2, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.	103
B.4. Ruta número 2, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.	103
B.5. Ruta número 3, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.	104
B.6. Ruta número 3, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.	104

Índice de Tablas

4.1. Numeración de puntos que se incluyen en cada zona.	78
5.1. Tabla de Errores Promedio	88
5.2. Error promedio en decímetros	89

Siglas

AGV	A utomated G uided V ehicle
AIV	A utonomous I ntelligent V ehicle
CBC	C ontrol B asado en C omportamiento
CCD	C harge- C oupled D evice
CDG	C entro D e G ravidad
GPS	G lobal P ositioning S ystem
GUI	G raphical U ser I nterface
HF	H igh F requency
IMU	I netial M easurement U nit
LASER	L ight A mplification by S timulated E mission of R adiation
LED	L ight- E mitting D iode
LF	L ow F requency
MEMS	M icro E lectro M echanical S ystem
PID	P roporcional I ntegral D erivativo
PL	P ositioning L aser
PLC	P rogrammable L ogic C ontroller
PyMES	P equeñas y M edianas E mpresas
RF	R adio F recuencia
RFID	R adio F requency I Dentification
RSS	R eceived S trength S ignal
SA	S canning A perture

SPA	S ensar - P lanificar - A ctuar
SLAM	S imultaneous L ocalization A nd M apping
SONAR	S OUND N AVIGATION AND R ANGING
TTL	T ransistor - T ransistor L ogic
TVS	T echnical V ision S ystem
UHF	U ltra H igh F requency
WLAN	W ireless L ocal A rea N etwork

Capítulo 1

Introducción

El proceso de manufactura engloba un sistema que transforma entradas de cierto valor, como materiales y mano de obra, en salidas con un mayor valor, como los son los productos o servicios. Uno de los elementos básicos de dicho proceso de manufactura es la identificación y creación de tareas que agreguen valor al producto, el cuál se entiende como una etapa del proceso que es *esencial* para la transformación de dicho producto o servicio. La manera más eficiente de llevar a cabo este desarrollo es alcanzado mediante la cantidad mínima requerida de etapas que agreguen valor al producto final, sin tener operaciones residuales o parásitas [1]. Debido a que el flujo y transporte de material es un servicio de la planta, cuál no crea ningún valor, pero asegura que los procesos que si agregan valor al producto se encuentren corriendo de manera óptima, la automatización del transporte en los sectores de producción, comercio y servicio, es un factor clave en la optimización de la intralogística. A pesar de los altos rendimientos que pueden generar las tecnologías de manejo continuo de material, como lo son las bandas transportadoras, la gran mayoría de las aplicaciones industriales aún emplean los métodos comunes de carga y acarreo por medio de vehículos de carga, cuales dependen fuertemente del compromiso de los operadores, ya que son operaciones basadas en personal. Las razones para la automatización de dicho flujo de material son múltiples, además

de los aspectos relacionados con costos, la flexibilidad incomparable con la que se cuenta para la integración en ambientes existentes, nuevos o cambiantes. Poder extender estas ventajas de los vehículos para carga y acarreo industrial por medio de la automatización resulta en una mejora en la confiabilidad del transporte y en la reducción de costos de operación [2][3].

Los vehículos guiados automáticamente, *AGV* por sus siglas en inglés, comúnmente referidos como robots móviles, son sistemas automatizados definidos como vehículos de transporte operados por un sistema computacional con diferentes configuraciones mecánicas, extensamente utilizados en la industria, principalmente, para el manejo, transportación y almacenamiento de bienes materiales en cortas, medianas o largas distancias a toda la cadena de producción, desde un punto *A* a un punto *B*, de una manera eficiente [3][4][5][6]. Estos sistemas comenzaron como dispositivos desarrollados para asistir a los sistemas de manufactura. Sus configuraciones mecánicas principales, que se exponen con mayor detalle en la sección 3.1.1, son de carga unitaria, de montacarga o de remolque, como el que se muestra en la Figura 1.1.

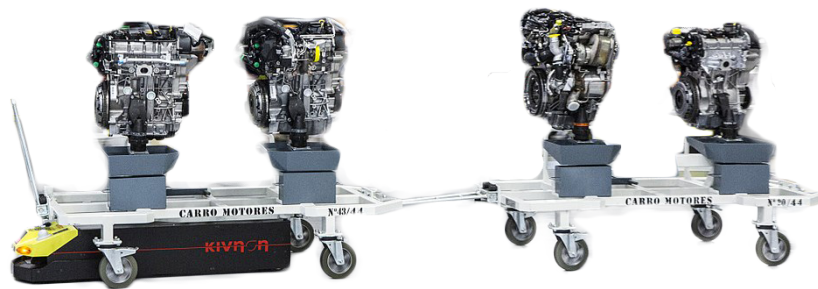


Figura 1.1: **AGV de tipo remolque** transportando motores en un ámbito automotriz [7].

Son tan extraordinariamente flexibles que sus aplicaciones van desde el manejo de correspondencia hasta grandes volúmenes de carga, por lo que son encontrados en prácticamente cualquier ámbito industrial y de servicios. Sus múltiples aplica-

ciones incluyen industrias aeroespaciales, automotrices, hospitalarias, metalúrgicas, papeleras, agrícolas, alimentarias, bodegas y, en general, cualquier industria o sistema de transporte y almacenamiento.

Desde la fabricación del primer vehículo guiado automáticamente, llamado "Guide - o - Matic" mostrado en la Figura 1.2, elaborado por Barret Electronics Engineering en el año de 1954, que fue diseñado para reducir los kilómetros recorridos por el personal en los trabajos repetitivos de empujar remolques para la distribución de productos a una planta de manufactura [6], se han llevado a cabo incontables estudios sobre los *AGV*, y a través de los años se han desarrollado e innovado en gran número de sensores, métodos de detección, técnicas de control, actuadores, sistemas de energía y en métodos de navegación, entre otros.

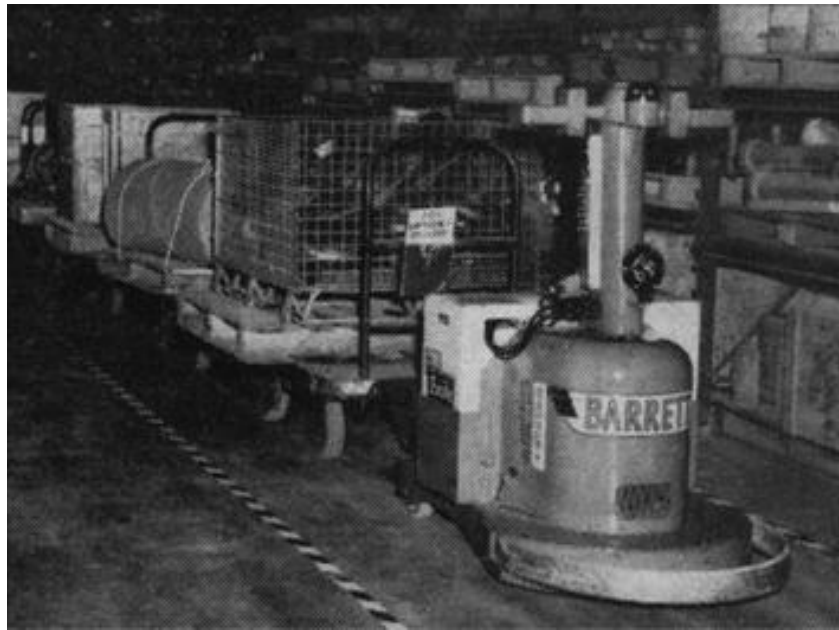


Figura 1.2: **Guide-o-Matic**. El primer *AGV* creado por Barrett Electronics en 1953 [8].

Los primeros métodos de navegación en los *AGV* de la primera generación era por medio de un cable que se encontraba enterrado en el piso; a este se le

inducía una frecuencia que el *AGV* detectaba y seguía, y de esta manera se hacía la trayectoria; por lo que la inteligencia se encontraba en el piso, no en el robot, cuál solo trabajaba como esclavo [9].

La principal desventaja era la poca o nula flexibilidad de modificación de las rutas, ya que era necesario hacer modificaciones físicas en las instalaciones dónde se encontrara. Las siguientes generaciones de *AGVs*, impulsadas por la reducción de los costos en microelectrónica y micro computadoras, hicieron a los *AGVs* más inteligentes, en dónde estos eran capaces de guardar instrucciones sobre sus rutas, tomar decisiones y formar parte del control de tráfico del sistema global. De igual manera, el inicio de la implementación de sistemas de guianza inalámbrica, como los sensores magnéticos o ultrasónicos, permitían al *AGV* operar sin la necesidad de instalar guías físicas, lo que hizo que estos sistemas se tornaran más fáciles de instalar y facilitaban modificaciones en las trayectorias cuando nuevas estaciones o flujos eran añadidos. Hoy, los *AGVs* son sistemas ampliamente elegidos por la industria manufacturera para poder implementar sistemas de manejo y transporte de material verdaderamente flexibles, cuáles permiten rutas alternativas que pueden compensar fallas del sistema o cambios de producto, lo que los hace especiales para las variaciones cíclicas o de temporada [9].

A pesar de todos los grandes avances que se han llevado a cabo en las áreas de sensores, actuadores, técnicas y métodos de navegación, y todos los estudios realizados a los sistemas *AGVs*, han sido pocos los estudios cuáles toman en cuenta la variación inherente de la carga del vehículo o su posible cambio de velocidad, cuál introduce al sistema incertidumbres, cuáles son en el modelo detectadas por el sistema a causa de dinámicas no modeladas. Estas incertidumbres afectan los parámetros de desempeño del sistema, como puede ser un cambio en su centro de gravedad, cuáles llegan a afectar el seguimiento de su trayectoria, presentando errores en su posicionamiento [10] o lecturas erróneas en sus sensores. Basándose en el estudio de los esfuerzos de control que utiliza un robot, es importante diseñar

esquemas de control robusto, considerando la mayor cantidad de parámetros para el modelado del sistema, esto para que existan una menor cantidad posible de errores de modelado y evitar consumo extra de energía y/o tiempo del sistema.

Partiendo del trabajo de [11], dónde se demuestra la eficacia de un modelo cinemático utilizando matrices homogéneas de transformación para el posicionamiento del robot y la correcta integración del sistema de visión técnico, *TVS* por sus siglas en inglés, analizado el sistema únicamente en su centro de gravedad principal, es decir, de manera ideal, sin tomar en cuenta incertidumbres en el, se pretende en este trabajo establecer un antecedente de estudio del análisis del modelo cinemático a partir de transformadas geométricas del *AGV* en una plataforma experimental donde se considere el cambio inherente en la dinámica del sistema que ocurre al aplicarse una variación en la carga, cuál es el cambio en su centro de gravedad, en busca de la optimización en la navegación de los *AGVs* en ambientes industriales. A través de la simulación, se compararon un conjunto de trayectorias establecidas, realizadas por un cuerpo rígido, cuál representa a un *AGV* con el sistema de *TVS* integrado para la navegación, con el propósito de analizar los diferentes puntos de operación de este mismo, simulando los cambios de centro de gravedad, consiguiendo así los datos de la ubicación de cada coordenada de las partes que conforman al *AGV*, en cada instante de tiempo de cada una de las trayectorias, para posteriormente analizar el porcentaje de error que existe entre cada punto de operación y la posición ideal después de realizar una trayectoria. De igual manera, con la integración de las mediciones del *TVS*, se corroboró la existencia de obstáculos en la trayectoria y el porcentaje de error en la medición, debido a los cambios de centro de gravedad del sistema.

El objetivo del estudio presentado en este trabajo, se analizan detalladamente en el capítulo 2, dónde se descompone en múltiples objetivos, con mayor especificación el camino a seguir para poder lograr el objetivo principal de este trabajo. Posteriormente, se presenta el marco teórico en el capítulo 3, en el cual se describen

los diferentes tipos de configuraciones existentes de los *AGVs*, se da un repaso a la historia de estos mismos y como han evolucionado sus diferentes componentes y necesidades de trabajo, se detallan los diferentes tipos de sensores que existen en la actualidad y son utilizados en los *AGVs* y las diferentes técnicas de aplicación de estos sensores para la navegación autónoma de estos. De igual manera, en la sección 3.4 se profundiza en la importancia de tomar en cuenta los cambios producidos en la dinámica del móvil por la variación de carga aplicada y se presenta el modelo matemático de transformaciones matriciales homogéneas para la ubicación de la posición y orientación del *AGV* modelado en todo momento. En el capítulo 4 se describe la metodología del proceso que se lleva a cabo para la obtención de los resultados finales de la simulación y se denota la estructura que se seguirá, referente a las trayectorias y variaciones de carga en la experimentación, para el correcto análisis de los diferentes puntos de operación del *AGV* y la correcta caracterización del error en la medición de la posición. Finalmente, dichos resultados y gráficos se muestran en el capítulo 5 y, para terminar este trabajo, se presentan las conclusiones obtenidas en el capítulo 6.

Capítulo 2

Propósito de la Investigación

2.1. Antecedentes

Hoy en día, los *AGVs* se han convertido en un componente clave en la intralogística. Los estándares tecnológicos que se tienen en la actualidad y el nivel de experiencia y competencia con el que se cuenta en el presente, han llevado a los *AGVs* a ser utilizados en prácticamente en cualquier lugar, se pueden encontrar a través de todas las ramas industriales y áreas de producción: desde la industria automotriz y la farmacéutica, hasta las industrias alimentarias, metalúrgicas, aeroespaciales y portuarias [3][8]. Para poder alcanzar este gran logro, los *AGVs* a través de los años, han pasado por diferentes eras o generaciones, conforme se iban desarrollando mejoras en las tecnologías ya existentes, nuevas tecnologías y se iba mejorando la ideología y actitud emocional hacia los robots [8]. Estas generaciones de *AGVs* se dividen en cuatro, y se presentan a continuación.

2.1.1. Primera Generación

Esta primera generación es la etapa de la idea e implementación de los *AGVs*; iniciando en 1953 con el desarrollo del *Guide-o-Matic* en los Estados Unidos, se-

guidos por Inglaterra 1956 y Alemania al principio de los 1960s, se extiende aproximadamente hasta el inicio de los 1970s. Los lugares donde fueron empleados por primera vez consistían en fábricas y almacenes regulares, ambientes en cuales los trabajadores transportaban bienes materiales con vehículos y/o tráileres a través de sus plantas; los entornos fueron adaptados paso a paso hasta cumplir con la demanda requerida cual no dependiera del acompañamiento humano. La navegación de esta primera generación era simple: seguían una trayectoria predeterminada de una estación de trabajo a la siguiente, iniciaban su trayectoria al recibir una orden y se detenían al reconocer un marcador de parada. Estos sistemas utilizaban sensores eléctricos y magnéticos simples, su operación no permitía ningún tipo de flexibilidad en la ruta, la transportación cubría distancias mayores y las estaciones se encontraban en serie, una tras la otra, por lo que solamente era requerido el movimiento en una sola dirección, cual era hacía enfrente.

Esta generación de *AGVs*, al inicio, aún basaba su tecnología en la utilización de tubos de vacío, después implementaron relevadores y posteriormente, con la introducción de la tecnología semiconductora al mercado, se implementaron los circuitos lógicos transistor-transistor, *TTL* por sus siglas en inglés. Estos tenían dos métodos para su navegación:

- Seguían una línea eléctricamente conductiva, cuál se encontraba enterrada en el piso. Este método de navegación es lo que se le conoce ahora como navegación inductiva, significando que los primeros *AGVs* navegaban a lo largo de un campo magnético inducido.
- Utilizaban, ya hacia finales de los 1960s, guías ópticas colocadas en el piso en combinación con los sensores ópticos para su navegación.

Las estaciones de carga y descarga de material se encontraban codificados con imanes, que también se encontraban enterrados en el piso; está codificación magnética se basaba en una alineación específica de los polos positivo y negativo de los ima-

nes. De igual manera, hacia finales de los 1960s, se diseñaron los primeros *AGVs* de remolque que permitían maniobras de reversa para la descarga de su remolque, según fuera requerido. Esta primera generación de *AGVs* lucía desprotegida, ya que solo contaba con un sensor táctil, proporcionado por un parachoques o barra de seguridad.

2.1.2. Segunda Generación

Esta era se ubica entre los 1970s hacia principios de los 1990s. Fue impulsada por la introducción de computadoras simples que podían ser transportadas a bordo del móvil, así como gabinetes enormes para su control [8]. La navegación por inducción, con el cable enterrado en el piso, se volvió un estándar en la instalación; la transferencia de información se realizaba ya fuera a través del mismo cable enterrado, señales y sensores infrarrojos o incluso por medio de señales de radio.

La demanda del mercado, cual era impulsada por la expectativa del usuario, solo se podía satisfacer con la constante mejora de la tecnología. Durante esta generación, una cantidad creciente de fabricantes y desarrolladores de componentes aumentaron la flexibilidad, el rango de utilidad y las capacidades de los sistemas, aprovechando el rápido desarrollo tecnológico del momento, liberando a dichos fabricantes de previas restricciones.

Esta segunda generación fue impulsada por una serie de desarrollos:

- Electrónicos y microprocesadores de alto rendimiento permitieron computaciones de mayor velocidad y, por consiguiente, el diseño y uso de escenarios y equipos más complejos. Se comenzó la utilización de los controladores lógicos programables, *PLC* por sus siglas en inglés, y se mejoró la precisión de la tecnología de los métodos de detección y medición, para el reconocimiento de su posición y orientación durante su manejo y navegación.
- Hubo mejora en la capacidad de las baterías, así en los centros de carga con

la introducción de la carga automática de estas.

- El proceso de navegación se estandarizó: Una guía conductiva enterrada generaba un campo magnético induciendo dos bobinas acopladas al *AGV* y gabinetes de gran tamaño equipados con relés necesarios para el proceso de control, cual aseguraba que los *AGVs* no chocaran o se bloquearan entre sí.
- El manejo de la carga se tornó más inteligente y automatizado. La capacidad de movimiento de los vehículos incrementó, siendo capaz de ir hacia enfrente, atrás, cargar y descargar.
- Los *AGVs* se integraron por completo al proceso de producción, haciendo posible el uso de estos mismos como mesas de trabajo móviles en la línea de producción.
- Se empezó a utilizar señales infrarrojas y de radio para la transferencia de datos.

La demanda del mercado fue primordialmente fomentada por la industria automotriz, ya que esta industria utiliza un gran volumen de material para la fabricación de principio a fin de los autos, empleando a veces cientos de vehículos.

2.1.3. Tercera Generación

La tercera generación fue de mediados de los 1990s hasta al rededor del 2010 [8]. En estos años se establecieron nuevas estándares de tecnología, los *AGV* eran controlados por una computadora central y cada uno de los sistemas independientes contaba con un *PLC* o un microprocesador a bordo para su manipulación. Navegaban de manera "libre", sin contacto, el cable inductivo ya quedó en desuso, fue reemplazado por navegación magnética y navegación láser, y la red de área local inalámbrica, *WLAN* por sus siglas en inglés, es y continúa siendo el método principal para la transferencia de datos.

Una fuerte influencia de esta época fue el comienzo de la utilización de los *AGVs* por una gran cantidad de usuarios con una amplia gama de aplicaciones. Habiendo existido en el mercado por más de un cuarto de siglo y con los avances tecnológicos que se habían dado hasta el momento, estaba comprobado que los *AGVs* ya eran sistemas confiables para la intralogística.

Las mejoras en computación y tecnología de los métodos de medición y detección provocaron un impulso clave en el desarrollo de los *AGVs*:

- Mayores velocidades al manejar y maniobrar.
- Mejor manejo de carga gracias a la mejora de la tecnología de los métodos de detección y medición.
- Vehículos de menor costo con mejor y más simples soluciones.
- Nuevas técnicas de navegación, como cuadrículas magnéticas o triangulación láser, cuáles se ven a detalle en la sección 3.3.
- Introducción de los *AGVs* en nuevas áreas funcionales, como almacenes y hospitales.

En esta generación, prácticamente cualquier carga que venga en paletas industriales, contenedores, pacas o paquetes podía ser transportada con los *AGVs*, con la capacidad de entregar o interactuar con casi todo el almacén o fábrica dónde se encontraba.

2.1.4. Cuarta Generación

Esta generación, a partir del 2010 hasta la actualidad, está diferenciada por el gran impacto que ha hecho la implementación cada vez mayor de la digitalización, cuál conlleva a una producción más inteligente, conectada y descentralizada. A esta nueva era de fábricas y manufactura se le denominó *Industrialización 4.0*, término

introducido por Kagermann en el 2011, se basa en la implementación de las fábricas inteligentes, productos inteligentes y servicios inteligentes, embebidos en el internet de las cosas y de servicios, también llamado internet industrial, cediendo paso a la utilización de las tecnologías emergentes para operar de una manera flexible, eficiente y sustentable, produciendo artículos de alta calidad a bajo costo [12][13].

Debido al aprovechamiento de estas nuevas tecnologías de comunicación inalámbrica, con altas velocidades de transmisión de datos y de procesamiento computacional, la industria 4.0 introdujo el uso de sistemas descentralizados, donde cada *AGV* cuenta con la capacidad de procesamiento para realizar decisiones en base a la información de su entorno recolectada por la integración de los diferentes tipos de sensores, aumentando su utilidad, autonomía, flexibilidad y habilidad de interacción con humanos y otros robots.

2.2. Planteamiento del Problema

La optimización en la navegación de vehículos guiados automáticamente es altamente deseable en el sector industrial, ya que la automatización del transporte intralogístico en los sectores de producción, comercio y servicio es un factor clave para la reducción de costos de operación [3], sin embargo, aun existen varias limitaciones en el trabajo práctico que deben de ser consideradas. Una de ellas es que en la mayoría de los trabajos de investigación relacionados con el modelo cinemático de móviles, se les consideran como cuerpos rígidos y se asume que su carga es uniforme, lo cual les lleva a considerar que el centro geométrico corresponde al centro de gravedad, significando que no toman en cuenta las variaciones inherentes de la carga en los vehículos [14], es decir, los experimentos no son realizados en todos los puntos de operación del *AGV*, tomando en cuenta la variación del centro de gravedad que produce un cambio en la carga, el cual influenciaría su movimiento durante la trayectoria, causando errores en su posición y su orientación final,

debido a sesgos presentados en el sistema, a causa de cambios por la dinámica no modelada del vehículo.

A su vez, estas variaciones en la trayectoria afectan directamente a las lecturas de los sensores que se encuentren integrados en el *AGV*, lo que producirá errores en la detección y medición del entorno, cual puede perjudicar al sistema en su toma de decisiones y evasión de obstáculos.

2.3. Justificación y Uso de los Resultados

El transporte material en la industria, ya sea materia prima, componentes o producto final es esencial para que esta pueda funcionar. El manejo de material puede llegar a ser el problema de la producción, debido a que agrega poco valor al producto y consume una parte del presupuesto de manufactura, y se debe asegurar que las partes, materia prima, material en proceso, productos terminados y suministros se desplacen periódicamente de un lugar a otro. Debido a esta periodicidad, los empleados tienden a estar involucrados en accidentes. Las causas más frecuentes del manejo de material, son el transportar objetos muy pesados y recorrer largas distancias transportando materiales pesados, no usar elementos de protección personal, así como empleados siendo golpeados por materiales siendo transportados. Por ello, en las industrias manufactureras y de almacenaje se empieza a popularizar la necesidad de implementación de los *AGVs*, ya que es deseable que puedan trabajar continuamente trasladando cargas variables por largos períodos de tiempo sin estar propensos a accidente alguno, ya que también se espera cuenten con elementos de seguridad para detección de objetos de alta precisión, cómo lo es el sistema *TVS*.

Por estas razones se propone el desarrollo de una plataforma experimental (simulador) a partir del modelo cinemático de un *AGV* con carga variable. A través del simulador se compara la trayectoria de un *AGV* al darle comandos de posicio-

namiento para llegar a un destino final, utilizando el modelo cinemático que solo considera el centro de gravedad principal contra el modelo cinemático que considera cambios en su centro de gravedad (*CDG*), para verificar el error que existe entre las trayectorias ideales y aquellas que se producen al aplicarse una variación en la carga. El simulador permitirá obtener los resultados cuantitativos y gráficos del comportamiento del *AGV*, para permitirnos analizar y visualizar la manera en como afecta la variación del centro de gravedad en el sistema, debido al aumento de la carga que se le aplica. Esto con el fin de optimizar el sistema de control del *AGV*, su procesamiento y su trayectoria en el entorno que se encuentre.

2.4. Hipótesis

Es posible formular el modelo cinemático de un *AGV* con carga variable basándose en transformaciones geométricas de traslación y rotación, para implementarse en un código de cómputo los modelos cinemáticos de un *AGV* con centro de gravedad principal y con centros de gravedad arbitrarios dinámicos, tomando en cuenta todos los puntos de operación del *AGV*, para comprobar la hipótesis principal de esta investigación, cual predice que al variar el centro de gravedad en el modelo cinemático, simulando una carga variable (centro de gravedad dinámico), el *AGV* presentara desviaciones en la posición y orientación durante su trayectoria y, al compararse con la trayectoria recorrida sin variación en su centro de gravedad, se manifestarán errores ocasionados en dichos parámetros de posición y orientación al alcanzar su objetivo, así como se presentarán desfases en el tiempo requerido para conseguir su objetivo, en comparación del modelo cinemático basado en el centro de gravedad principal, dónde se logra el objetivo de la trayectoria del *AGV* de manera ideal, en tiempo, con exactitud y precisión.

2.5. Objetivos de la Investigación

2.5.1. Objetivo General

Desarrollar una plataforma experimental (simulador) a partir del modelo matemático de un *AGV* con carga variable para el transporte de material en ámbitos industriales, capaz de identificar objetos y tomar decisiones sobre su trayectoria de manera autónoma.

2.5.2. Objetivo específico

- Investigar propiedades, tecnologías y principios de funcionamiento del *AGV*.
- Analizar el modelo cinemático del *AGV* basado en el centro de gravedad principal.
- Analizar el modelo cinemático del *AGV* basado en centros de gravedad arbitrarios.
- Realizar la codificación computacional para ambos modelos cinemáticos.
- Diseñar una interfaz gráfica, *GUI* por sus siglas en inglés, para alimentación de datos y obtención de resultados.
- Validar el código computacional.
- Diseñar las trayectorias para la experimentación.
- Experimentar con el código computacional las trayectorias diseñadas con el modelo cinemático basado en el *CDG* principal.
- Experimentar con el código computacional las trayectorias diseñadas con el modelo cinemático basado en diferentes *CDG* arbitrarios.

- Agregar mediciones del *TVS* para la experimentación con ambos modelos cinemáticos con detección de obstáculos.
- Analizar y obtener conclusiones de los resultados de las experimentaciones.
- Publicar los resultados en un formato de tesis.

2.6. Trabajos Relacionados

De acuerdo con [14], el control de la posición y el movimiento del *AGV* es clave para su operación. Este control significa que el *AGV* seguirá una trayectoria con errores mínimos de distancia y orientación en comparación con la trayectoria de referencia. El control adecuado de la posición y movimiento lleva a una mayor estabilidad y precisión en la trayectoria, otorgando beneficios como el trabajar en espacios mas pequeños y usar dispositivos de carga y descarga más relajados, transportar cargas delicadas de maneras más seguras, entre otros. Un elemento clave para el control requerido es el sistema de sensores que se utiliza.

En [11] se propone un sistema de navegación utilizando un esquema de localización de alta precisión mediante el método de triangulación dinámica, con la integración del sistema de visión técnica *TVS* en dicho sistema de navegación *AGV*. Este sistema de navegación se beneficia de las ventajas de la detección precisa de obstáculos con la triangulación dinámica. De igual manera, presenta un modelo cinemático que considera la adquisición de los datos del *TVS* en tiempo real, necesarios para el correcto funcionamiento de dicho modelo cinemático. El modelo cinemático utilizado se basa solamente en el centro geométrico del *AGV*, sin considerar cambios en su centro de gravedad y los efectos que esto produce.

Continuando el trabajo de [11], se propone utilizar un modelo cinemático que considere cambios en el centro de gravedad del *AGV*, que se alimente de los datos obtenidos del *TVS* en tiempo real para un control de movimiento más adecuados.

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1. Configuraciones del *AGV*

Como se menciona con anterioridad en la sección 2.1, las aplicaciones de los *AGVs* son innumerables, la adopción de sistemas automáticos por el crecimiento de las *PyMES* ha hecho que los *AGVs* se vuelvan altamente personalizado. Por ello, el proceso para seleccionar un *AGV* empieza con la identificación de la o las tareas a realizar [15]. Estas personalizaciones van desde diferentes configuraciones de estructuras mecánicas, diferentes configuraciones de desplazamiento, hasta la personalización de los sensores utilizados y de su método de navegar por el entorno, cuales se describen a continuación.

3.1.1. Configuración Estructural

La configuración estructural mecánica del *AGV* hace referencia al tamaño y a los aditamentos mecánicos con los que cuenta para interactuar con la carga, como se presentan a continuación.

3.1.1.1. *AGV* de Remolque

Este tipo de *AGV*, mostrado en la Figura 3.1 lleva, por lo general un jalón para remolque o algún aditamento para sujetar la plataforma a remolcar, dónde se enganchan uno o más plataformas que son acarreadas hacia el destino requerido del entorno. Por lo general, estos son los *AGVs* que más se usan en los procesos de manufactura [15].



Figura 3.1: Un *AGV* de remolque transportando carros hacia una línea de producción [8].

3.1.1.2. *AGV* de Carga Unitaria

Esta configuración de *AGVs* se encuentran equipados con una plataforma de carga, cual le permite la carga y descarga de bienes materiales, y los transporta sobre dicha plataforma, como se muestra en la Figura 3.2. Este tipo de *AGV* es adecuada para cargas pequeñas a medianas y es usualmente utilizado en líneas de producciones de manufactura flexible



Figura 3.2: Dos *AGV* de carga unitaria, a la *izquierda* uno cargado y a la *derecha* uno sin carga [8].

3.1.1.3. *AGV* de Transpaleta

Tal como lo implica el nombre, es un patín de transpaleta, con un sistema automatizado, mostrado en la Figura 3.3. Reemplaza la labor humana del dicho mecanismo de transpaleta. Es utilizado para mover paletas industriales al nivel del piso dentro de su entorno.



Figura 3.3: *AGVs* de tipo transpaleta en un almacén [8].

3.1.1.4. AGV de Montacargas

Similar a los sistemas de transpaleta, el AGV de tipo montacargas, mostrado en la Figura 3.4 reemplaza la labor humana en el transporte de paletas dentro de su entorno, solo que este tiene la capacidad de elevar la carga una mayor altura y es capaz de interactuar con estantería.



Figura 3.4: Tres AGV tipo montacargas de la flotilla de Deutz [8].

3.1.2. Métodos de Desplazamiento

El método de desplazamiento de los AGVs hace alusión a la forma en que este accionará sus diferentes actuadores para desplazarse por su entorno. Según su método de desplazamiento por el que se registrá, se implementan los diferentes tipos de motores que comúnmente se emplean en los AGVs.

3.1.2.1. Diferencial

Este tipo de AGV emplea pares de ruedas fijas para su desplazamiento. La cantidad de motores utilizados en este tipo de sistemas por lo general son de 2 a 6, como se muestra en la Figura 3.5. En este tipo de sistemas los motores de la izquierda funcionan independiente de los motores de la derecha, pero todos los motores de cada lado se encuentran sincronizados entre sí.

Su método de desplazamiento es girar los motores laterales independientes a velocidades iguales para trasladarse de manera recta y a velocidades diferentes para dar giros y navegar de manera curvilínea. Este tipo de navegación es caracterizado por la capacidad de rotar sobre su propio centro de masa.

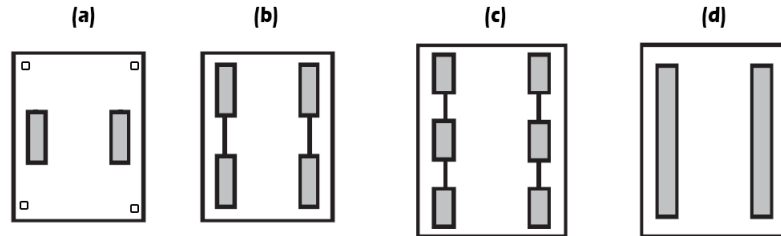


Figura 3.5: Configuraciones de un *AGV* diferencial: (a) Dos motores y 4 llantas libres (b) 4 motores (c) 6 motores (d) Llantas de pista continua.

3.1.2.2. Independiente u Omnidireccional

Este método de desplazamiento, emplea las ventajas del método diferencial, pero en este método cada motor funciona de manera independiente. Aquí se pueden utilizar dos tipos de motores, fijos o giratorios, en las configuraciones mostradas en la Figura 3.6.

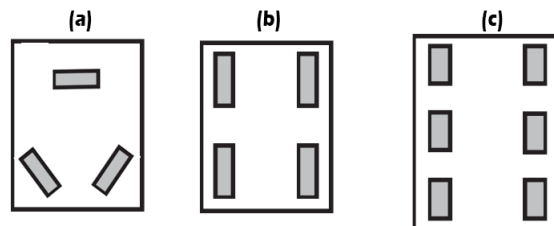


Figura 3.6: Configuraciones independientes de (a) Tres motores, (b) Cuatro motores y (c) Seis motores.

Los motores fijos en este tipo de *AGVs* se utilizan con ruedas de tipo rodillo, como se muestran en la Figura 3.7, comúnmente conocidas como ruedas omnidi-

reccionales; con este tipo de configuración, los motores giran independientemente a diferentes velocidades para lograr el desplazamiento deseado, hacia enfrente, atrás y las laterales.



Figura 3.7: Robot móvil omidireccional Uranus [16].

Los motores giratorios, como el que se muestra en la Figura 3.8, son capaz de girar sobre su eje de funcionamiento, otorgándole diferentes ángulos de operación a la rueda de dicho motor.

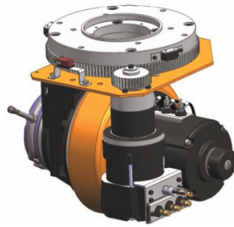


Figura 3.8: Una rueda típica con giro para dirección integrada [8].

Este método de desplazamiento de los *AGVs* se caracteriza por la capacidad de realizar movimientos en diagonal: los motores giratorios se colocan independientemente a diferentes ángulos para su desplazamiento, las ruedas fijas de tipo rodillo giran independientemente en velocidades y sentidos diferentes, para lograr su amplio rango de movimientos.

3.1.2.3. Ackerman

El desplazamiento con direccionamiento tipo Ackerman fue desarrollado para que todas las ruedas giren sin que se derrapen o deslicen [17], a diferencia de los métodos mencionados anteriormente. Este tipo de movimiento se logra mediante dos motores fijos en la parte posterior y una o dos motores giratorias en la parte delantera, como se muestra en la Figura 3.9. Comúnmente las ruedas fijas traseras son a las que se les aplica velocidad para trasladar el móvil, dándole dirección con las ruedas giratorias frontales.

Este tipo de *AGV* no es capaz de girar sobre su propio centro de masa y **todas** sus ruedas giran en diferentes velocidades al desplazarse en una trayectoria curvilínea.

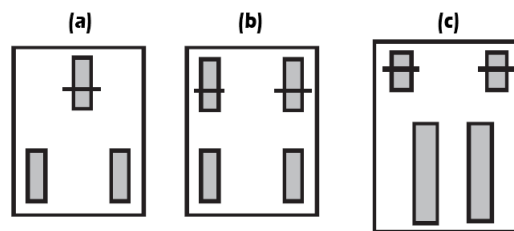


Figura 3.9: Configuraciones de un *AGV* tipo Ackerman. (a) 1 motor giratorio, 2 motores fijos (b) 2 motores giratorios, 2 motores fijos (c) 2 motores giratorios, 2 ruedas de pista continua.

3.1.2.4. Triciclo

Este tipo de configuración de *AGV* tiene similitudes al método independiente y al método tipo Ackerman, según sea su requerimiento.

Los *AGV* triciclos tipo independiente, puede desplazarse omnidireccionalmente y de igual manera utilizan motores fijos con ruedas de tipo rodillo para lograr dichos movimientos, o pueden utilizar motores giratorios de igual manera, como se muestra en la Figura 3.6 (a).

Los *AGV* triciclos tipo Ackerman cuentan solamente con un motor giratorio en la parte frontal y dos ruedas fijas en la parte trasera, cuales pueden ser motorizadas o solamente de soporte, como se muestra en la Figura 3.9 (a).

3.2. Tipos de Control

Una arquitectura de control provee un conjunto de principios para la organización de los sistemas de control, que determina su capacidad para realizar tareas y reaccionar a circunstancias [18][19]. Además, y de igual manera, imponen fuertes reglas y restricciones en como se estructura el programa del robot, para la manera en que los problemas de control son resueltos .

Una arquitectura íntegra es aquella que permite al robot móvil planear sus tareas y trayectorias, tomando en cuenta restricciones temporales del entorno, para realizar las acciones correspondientes y controlar su ejecución en tiempo real, siendo capaz de reaccionar a posibles eventos [19].

Los tipos de arquitecturas de control que existen son las siguientes:

- a) Deliberativo
- b) Reactivo
- c) Híbrido
- d) Basado en Comportamiento

cuales se describirán a continuación.

3.2.1. Control Deliberativo

El control deliberativo, también denominado como arquitectura basada en detectar, planificar y actuar, *SPA* por sus siglas en inglés, tiene la capacidad de *ver* hacia el futuro, por lo que requiere de una gran cantidad de tiempo para trabajar.

El tiempo que tardará en procesar la información es linealmente dependiente de que tanto al futuro se quiere que se vea. Dado como uno de sus nombres lo indica, *SPA*, primero realiza mediciones de todo su entorno, para después procesar esos datos y planificar. Planificar significa ver hacia adelante a los posibles resultados de las acciones o movimientos, y buscar la secuencia de acciones que satisface la tarea deseada. Una vez que vio todos los posibles resultados y eligió su trayectoria o plan, entonces actúa. Debido a este proceso, algunas de las desventajas que representa son las siguientes:

Tiempo de ejecución. Debido al tiempo que le lleva realizar los cálculos necesarios para trazar todas las posibles rutas y hacer la elección de cuál escoger, ya que generar un plan en un entorno real llega a ser un proceso muy lento.

Espacio de Almacenamiento. Representar y manipular el estado espacial del robot puede llegar a consumir un gran espacio de memoria, ya que dicha representación debe llevar toda la información requerida para planear y optimizar su ruta, tales como distancias, ángulos, referencias de puntos de referencia, entre otras.

Información Espacial. El control deliberativo asume que la representación que tiene del espacio es certera y se encuentra actualizada, debido a que si esta información no se encuentra debidamente actualizada, el plan resultante puede tornarse inútil. Por lo que los mapas de información que tiene el robot deben estar actualizados, y eso consume tiempo.

Realización del Plan. Además de lo anteriormente mencionado, el plan solo es útil y certero si:

- El entorno no cambia durante la ejecución del plan.
- El robot sabe en que paso o estado va en su trayectoria y dónde se ubica en todo momento.

- Los sensores y actuadores del robot son lo suficientemente precisos para ejecutar cada estado del plan.

Este tipo de control generalmente se utiliza en sistemas centralizados, ya que una sola computadora *maestro* ejecuta el *SPA*: reúne los datos sensoriales de los robots *esclavo* y la utiliza para hacer un plan para todos los robots, para posteriormente enviar la parte correspondiente a cada robot y estos la ejecuten.

El control puramente deliberativo por lo general no es utilizado, debido a los tiempos que requiere la ejecución de sus tareas, aunque hay excepciones de aplicaciones que si demandan una planificación extraordinaria, sin tener presión del tiempo. Un ejemplo de ello es la cirugía robótica, donde se hace la planificación exacta de los movimientos y trayectorias del robot, sin importar el tiempo que este requiera, y su entorno no cambia ni se mueve, debido a que a los pacientes los sujetan fuertemente, dejándolos inmóviles.

3.2.2. Control Reactivo

El control reactivo es uno de los métodos más comúnmente utilizados para el control de robots. Se basa en una conexión estrecha entre los sensores y actuadores. Sistemas puramente reactivos no necesitan una representación del entorno que los rodea, ni anticipar posibles resultados de sus acciones; estos operan en una cantidad de tiempo pequeña y reaccionan a la información sensorial del momento. Los sistemas reactivos consisten en una serie de reglas o condiciones que acoplan situaciones para acciones o respuestas específicas, dependiendo de la lectura de los sensores o de interrupciones internas, siendo estos una manera de *reflejos*, es decir, acciones innatas que no involucran ningún tipo de procesamiento o planificación.

Estos sistemas se basan en la remoción de sistemas de computación complejos con el objetivo de tener respuestas predefinidas rápidas. Sin embargo, las condiciones en sistemas reactivos llegan a ser muy complejas, involucrando las combinacio-

nes arbitrarias de entradas externas con dichas respuestas o acciones internas. La mejor práctica para mantener un sistema reactivo sencillo, es haciendo condiciones mutuamente exclusivas, es decir, que cada situación o estado que sea detectado por el espacio sensorial del robot active solo una única acción. Para asegurar la exclusividad mutua, el controlador debe contener reglas para todas las combinaciones posibles de las entradas de sus sensores.

Un requerimiento de este tipo de control es que necesita monitorear las reglas en paralelo y de una manera continua, para poder responder a cualquier situación que pueda detectar y pueda ejecutar múltiples situaciones de manera simultánea. Si el sistema no es capaz de monitorear sus sensores en paralelo y en cambio, los revisa en secuencia, este puede no detectar un evento y fallar en reaccionar a tiempo.

Este tipo de control por lo general se ejecuta con un control distribuido o descentralizado. Cada robot ejecuta su propio controlador y se comunica y coopera con otros robots según sea requerido. El comportamiento grupal emerge de la interacción de sus individuales, cual es un tipo de control popularmente utilizado, el control reactivo distribuido.

Las limitantes de dicho tipo de control son que estos no cuentan con estados, memoria, aprendizaje o modelos internos de su representación del entorno.

3.2.3. Control Híbrido

La principal idea del tipo de control híbrido es combinar las mejores características de los controles deliberativo y reactivo en un solo sistema: los diferentes tipos de controladores que requieren; los diferentes rangos de tiempo de ejecución, pequeño tiempo para el reactivo y gran tiempo para el deliberativo; y las representaciones de su entorno, cuál es inexistente para el control reactivo y son modelos *mundiales* (mapas detallados en la computadora central) para el control deliberativo. Para lograr esta fusión, el sistema híbrido se estructura típicamente con tres niveles: un nivel funcional, un nivel de ejecución o ejecutivo y un nivel de toma de

decisiones o decisivo.

3.2.3.1. Nivel Funcional.

Este nivel es la parte reactiva del sistema. Contiene las acciones elementales del robot, monitoreando su estado sensorial e implementando los procesos *condición - acción* en tiempo real.

3.2.3.2. Nivel Decisivo.

Este es el nivel deliberativo del sistema. Esta a cargo de todo el proceso de anticipación de estados del sistema y debe permanecer reactivo a situaciones nuevas para poder volver a planificar en caso de ser necesario. Debido a que este proceso conlleva más tiempo que la tarea de moverse, es que existe el nivel ejecutivo.

3.2.3.3. Nivel Ejecutivo.

Este nivel es el encargado de fusionar los datos de los niveles anteriores. Es un nivel puramente reactivo, sin capacidad de planeación [19]. Este nivel recibe la información de las acciones a ejecutar del nivel decisivo, selecciona, parametriza y sincroniza adecuadamente las acciones del nivel funcional. La selección de la información recibida y el redireccionamiento de información previa producida por otras actividades de los niveles funcional y decisivo dependen del estado actual del sistema, cuál es monitoreado por el nivel ejecutivo, conforme a las actividades en curso y las respuestas de los módulos cuando una actividad termina. Este nivel es responsable de generar un reporte periódico al nivel decisivo, para habilitar la supervisión de planes y la elección de acciones a seguir. Este nivel administra los conflictos entre los niveles funcional y reactivo; sabe de prioridades y es capaz de interrumpir alguna ejecución o dejar una solicitud pendiente.

3.2.4. Control Basado en Comportamiento

El control basado en comportamiento, *CBC* por sus siglas en inglés, proviene de las mejores prácticas del control de tipo reactivo, inspirado en los sistemas biológicos que se encuentran en la naturaleza. Este tipo de control integra el uso de “*comportamientos*” como módulos de control. Este *CBC* permite una respuesta rápida, así como el uso de representación y aprendizaje, utilizando esta representación y el cálculo de trayectorias.

Los comportamientos son acciones regidas por reglas con ciertas restricciones, en como diseñarlas y que evitar al implementarlas. Los comportamientos:

- **Logran y/o mantienen metas particulares.** Un comportamiento de *base* realiza la tarea de llevar el robot a una designada base, o el comportamiento de *sigue muros* puede iniciar y mantener un seguimiento de pared.
- **Son de períodos prolongados, no instantáneos.** Significando que los comportamientos toman tiempo en completarse, es decir, le toma algún cierto tiempo al robot regresar a base cuando se ejecute ese comportamiento.
- **Toman entradas de un espacio sensorial y otros comportamientos, para poder mandar señales a los actuadores y a otros comportamientos.** Eso quiere decir que se puede crear una red de comportamientos que se comunican entre sí.
- **Son más complejos que las acciones.** Mientras el control reactivo se basa en acciones simples, como *gira a la derecha* o *para*, los comportamientos como *sigue un objetivo*, *ve a base a recargar* o *encuentra un objeto*, tienden a ser más complejos.

Este tipo de control se utiliza con el método de control descentralizado. Cada robot se comporta de acuerdo a su propio controlador y tiene la habilidad de

aprender con el tiempo y mostrar comportamientos adaptativos como resultado, por lo que el comportamiento grupal puede ser mejorado.

3.3. Sensores para Posicionamiento y Navegación

Conocer lo que sucede es necesario para que el *AGV* pueda funcionar de una manera inteligente. Los sensores son dispositivos físicos que miden cantidades físicas [20] como la distancia, el nivel de la luz, nivel del sonido, la aceleración, el olor, la temperatura, etc., y en el *AGV*, son los elementos periféricos que conllevan a este a ser un sistema verdaderamente autónomo, y como se menciona en [3], solo la integración impecable de todos los componentes asegura un trabajo eficiente del sistema.

Estos conforman un sistema perceptual dividido entre sensores propioceptivos o exteroceptivos; Los sensores propioceptivos son aquellos que son capaces de detectar los elementos y condiciones propias del *AGV*, como el ángulo respecto a su origen en el que se encuentra, o la dirección y la velocidad con la que giran las ruedas. Los sensores exteroceptivos son los dispositivos capaces de percibir el entorno donde se encuentra, como la distancia de las cosas o el color o nivel de luz.

Cabe resaltar que la medición que proveen los sensores puede no ser el valor real del parámetro o variable necesitada, debido a que en algunos sensores la medición podría no ser la cantidad exacta requerida o puede ser incierta, por lo que debe de hacerse un procesamiento computacional a partir de dicha señal medida y tanto los sensores como dicho proceso computacional pueden introducir errores en la medición [21]. Por ende, las técnicas de detección y medición son vistas como problemas de estimación, donde el valor real del parámetro medido es estimado utilizando la información medida.

La cantidad de procesamiento requerido por cada sensor para poder realizar la estimación depende de la cantidad de información que manda dicho sensor. En

la Figura 3.10 se muestran algunos ejemplos de sensores y su nivel requerido de procesamiento para que la información detectada sea útil; los sensores más simples, como los son los sensores de contacto, interrupción o presencia, requieren bajo nivel de procesamiento, debido a que solo cuentan con dos estados, es decir, es poca información la que maneja. Los sensores medianamente complejos, como lo son los micrófonos y sensores de sonido de navegación y alcance, *SONAR* por sus siglas en inglés, requieren de mayor procesamiento ya que estos mandan una mayor cantidad de información y comparación con una base de datos existente; por lo que los sensores de mayor complejidad, como las cámaras, requieren de altos niveles de procesamiento debido a la cantidad de información que estos transmiten. La información que ofrecen los sensores puede ser análoga o digital.

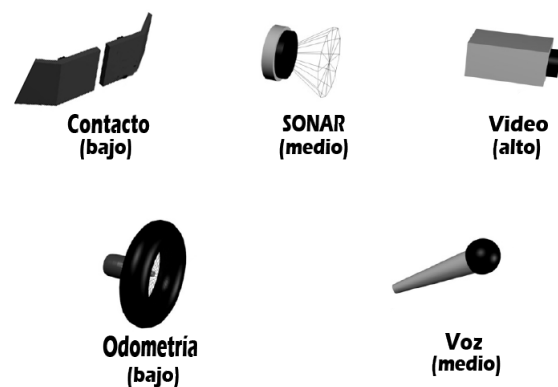


Figura 3.10: Niveles de procesamiento sensorial [20].

A su vez, los sensores pueden ser pasivos o activos; los sensores pasivos consisten en solo un detector, el cual percibe o detecta del entorno la propiedad que se mide. Por otro lado los sensores activos, además de contar con su detector, proveen su propia señal o estímulo a través de un emisor, requiriendo una mayor cantidad de energía, para usar la interacción con el entorno de dicha señal producida como la propiedad que se mide.

Estos sensores, cuales permiten al *AGV* navegar de manera autónoma a través

de un entorno conocido y desconocido, se presentan a continuación.

3.3.1. Interruptor

Como se menciona anteriormente, los sensores simples son aquellos que no requieren de mucho procesamiento computacional, debido a que, o transmiten poca cantidad de información, o la información ya es útil al medirse. El sensor más simple de todos ellos es el interruptor.

El sensor interruptor, como el que se muestra en la Figura 3.11, es uno tipo pasivo que provee información útil al instante, basándose en el principio de abrir y cerrar un circuito. Si un interruptor se encuentra abierto, no fluye corriente a través del circuito. Por el otro lado, si el interruptor se encuentra cerrado, se permite el flujo de corriente hacia el circuito. Este principio se aplica a una gran cantidad de maneras diferentes de crear un interruptor, y estos pueden ser normalmente abiertos o normalmente cerrados, dependiendo de su conexión.



Figura 3.11: Sensor interruptor de límite.

En los *AGVs*, este tipo de sensores se utilizan como sensores de contacto y de límite. Los de contacto detectan cuando el *AGV* ha chocado contra un obstáculo o pared, usualmente como sistema de emergencia al fallar los demás sensores; también puede ser utilizado para detectar la presencia de una carga conectada o sobre él. Los interruptores de límite se utilizan para indicar que estos han llegado al fin de

algún recorrido, como lo es para detectar los extremos al abrir y cerrar la tenaza de la transpaleta.

3.3.2. Sensor de Luz

Los sensores de luz miden la cantidad de luz que impacta en una foto-celda, la cual es sensible a la luz, y dicha sensibilidad se ve reflejada de manera de resistencia en el circuito; la resistencia de la foto-celda es baja cuando es iluminada y es alta cuando se encuentra oscuro. Los sensores de luz son simples, pero estos pueden detectar un amplio rango de longitudes de onda, por lo que son utilizados para detectar luz infrarroja y luz ultravioleta, y tienen la capacidad de ser sintonizados a ciertas longitudes de onda en particular, lo cual es muy útil para el diseño de sensores especializados.

Estos sensores pueden ser activos y pasivos, dependiendo de su aplicación. Algunas aplicaciones más comunes que se les da es para medir la intensidad de la luz, es decir, que tan alumbrado u oscuro está el entorno, para medir la intensidad diferencial o la diferencia de intensidades entre dos o más sensores, para medir los cambios o cortes en la continuidad y para medir modulaciones de luz.

3.3.3. Potenciómetros

Los potenciómetros son comúnmente utilizados para el ajuste manual de los dispositivos. Son sensores resistivos que alteran el valor de la resistencia dentro de ellos con el giro de una perilla. El diseño básico de un potenciómetro, como se muestra en la Figura 3.12 es un filamento que se mueve por el medio de dos extremos fijos; conforme se mueve dicho filamento (terminal 2 de Figura 3.12 (c)), la resistencia entre este y los extremos se modifica, mientras que la resistencia entre ambos extremos (terminales 1 y 3 de la Figura 3.12 (c)) permanece fija.

También existen potenciómetros rotativos de tipo helicoidal, para poder medir

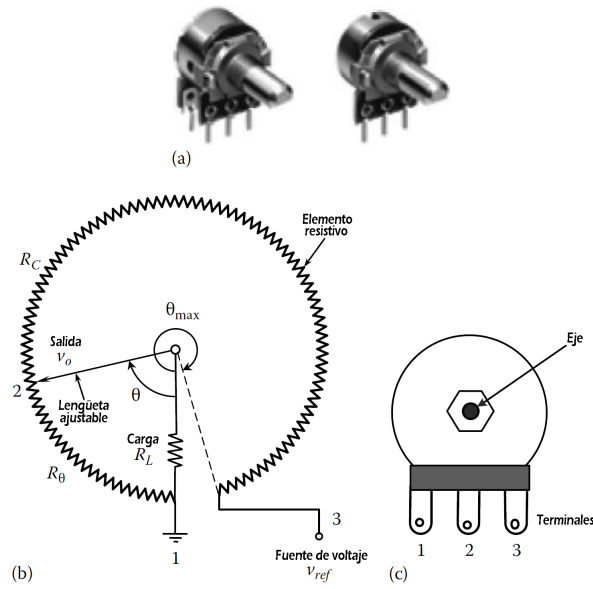


Figura 3.12: (a) Potenciómetro rotativo (b) Circuito del potenciómetro (c) Esquema externo [21].

ángulos absolutos que exceden los 360° . En los *AGVs* los potenciómetros son utilizados para ajustar la sensibilidad de diferentes propiedades o mecanismos, como la velocidad de traslado o la distancia a detectar de algún otro sensor infrarrojo o ultrasónico, por ejemplo.

3.3.4. Sensor Ultrasónico

En los *AGVs*, los sensores ultrasónicos son utilizados para detectar obstáculos cercanos [22]. También llamados sistema de navegación y telemetría por ecos sonoros, *SONAR* por sus siglas en inglés, son sensores de tipo activo, cuál emite un sonido en el rango de frecuencia muy superior (*ultra*) a las frecuencias del sonido audible que son de $20Hz$ a $20KHz$. Las frecuencias ultrasónicas mayormente utilizadas son las de $40KHz$, $75KHz$, $7.5MHz$ y $10MHz$ [23]. Existen diferentes métodos para generar sonido de alta frecuencia: un cristal piezoeléctrico sujeta a un potencial eléctrico o aplicando voltaje de alta frecuencia a un condensador de

película metálica. Para poder detectar los ultrasonidos se suele utilizar un micrófono como receptor.

El proceso de encontrar la ubicación de un *AGV* por medio de *SONAR* se denomina ecolocalización. El proceso de la ecolocalización se basa en la medición del tiempo que tarda en ser detectado un ultrasonido producido al reflejarse en un objeto. Si no existe objeto frente, el sonido no regresa y las ondas sonoras se van atenuando con la distancia hasta que se descomponen. El rango del sensor ultrasónico se determina por la intensidad de señal del emisor. En la Figura 3.13 se muestra un sensor ultrasónico popularmente utilizado HC-SR04. El rango común para estos sensores es una emisión de onda de 30° en forma de cono a todas las direcciones y comienza a atenuarse en los 2.4 metros aproximadamente. Son capaces de medir distancias cortas desde unos centímetros hasta un par de metros con precisión. Hay que tener en cuenta que las condiciones ambientales como la temperatura y la humedad, entre otras cosas, afectan la propagación del sonido, por lo que se deben de tomar en cuenta para una mejor precisión del sensor.

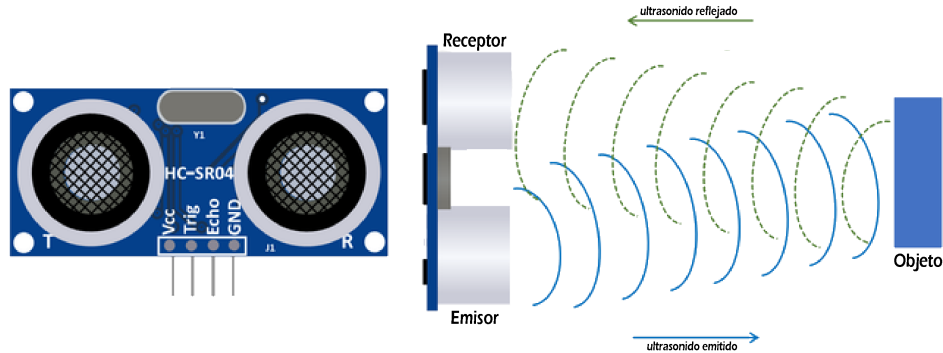


Figura 3.13: Sensor Ultrasónico HC-SR04 [24].

Una gran desventaja de este método de detección es que es susceptible a la reflexión especular, mostrada en la Figura 3.14, cual es la reflexión que ocurre en la superficie del objeto que se intenta ser detectado hacia otros objetos en el entorno, siendo el sonido reflejado en varios objetos antes de regresar al sensor, si es

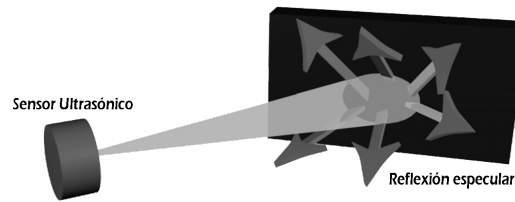


Figura 3.14: Reflexión especular ultrasónica [20].

que regresa alguna señal reflejada. Esto es propenso a suceder cuando la superficie es muy lisa o uniforme, y el ángulo entre el objeto y el haz de sonido emitido es pequeño [20]. Este tipo de reflexión genera falsas lecturas de objetos lejanos. En el peor de los casos de reflexión especular, el sonido se refleja del objeto al entorno y no regresa al detector, por lo que engañaría al *AGV* a no detectar nada o detectar algo lejano en vez de cercano, por lo que podría colisionar. Una manera de evitar este fenómeno es mediante el uso de más de un sensor ultrasónico, activado en desfase sobre el área de interés y comparar las lecturas de medición.

3.3.5. Sensores Ópticos

Estos sensores operan bajo el principio de la luz detectada como se menciona anteriormente en la sección 3.3.2, más no utilizan la misma tecnología de fotoceldas debido a que su propiedad resistiva los vuelve muy lentos [20], en cambio utilizan fotodiodos o fototransistores ya que son muy sensibles y extremadamente rápidos, pudiendo detectar pulsos de luz que llegan hasta centenas de megahertz [25]. Son sensores activos que consisten de un emisor, generalmente un diodo emisor de luz o *LED* por sus siglas en inglés, y el receptor se compone de un fotodiodo o un fototransistor, que detecta la luz emitida por el *LED* y reflejada en un objeto. Existen dos tipos de configuraciones para este tipo de sensor, basados en la posición relativa del emisor y receptor, cuales pueden ser optosensores ópticos de barrera y reflectivos, mostrados en la Figura 3.15 (a) y (b), respectivamente.

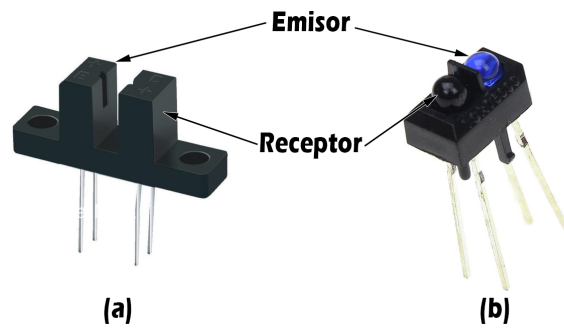


Figura 3.15: Sensor Óptico (a) De barrera (b) Reflectivo.

3.3.5.1. Optosensor Reflectivo

El Optosensor Reflectivo coloca el emisor y el receptor uno al lado del otro, separado por una barrera, y cuando se detecta la presencia de un objeto, la luz se refleja de vuelta al receptor para ser detectada. Las principales aplicaciones que se realizan con estos sensores es la detección y medición de presencia y distancia de un objeto, mediante de si regresa o no la luz emitida al receptor y el tiempo que tarda la luz en ser detectada; la detección de alguna característica en la superficie del entorno, como lo es un seguidor de línea, teniendo como desventaja que la superficie siempre debe de estar limpia para que el sensor pueda trabajar apropiadamente; y la detección de códigos de barras, para reconocer diferentes habitaciones, objetos o ubicaciones codificadas.

Aunque la idea general de emitir y detectar la luz es simple, el proceso para realizarlo es todo lo contrario: la reflectividad de la luz se ve afectada por el color, la textura, la temperatura, entre otras propiedades; una superficie de color claro refleja mejor que una de color oscuro, así como un color mate refleja menos que uno metálico. De igual manera hay que tomar en cuenta que los sensores deben operar con la luz ambiente del entorno donde se encuentre, que el detector debe ignorar para poder tener sensibilidad solo para su propia luz emitida. Esto se logra con dos acciones: por calibración y por la utilización de ondas infrarrojas no visible al ojo

humano. La calibración es el proceso de ajustar el mecanismo para maximizar su desempeño, ya sea su precisión, rango, etc. La calibración de este tipo de sensores se hace mediante la lectura del detector sin el *LED* emisor encendido un par de veces y otro par con el emisor encendido. Entre más lecturas mayor precisión suele tener una calibración. La luz infrarroja es luz en una frecuencia de la banda en el espectro electromagnético que el ojo humano no puede percibir, por lo que en el ambiente es una luz débil, cuál puede ser fácilmente modulada, lo que la hace menos propensa a interferencias.

3.3.5.2. Optosensor de Barrera

El Optosensor de Barrera coloca el emisor y el receptor uno frente al otro; el receptor siempre percibe la luz del *LED* y cuando se detecta la presencia de un objeto, este funciona como una barrera para la luz, por lo que el receptor deja de detectarla. En general, cualquier par compatible de dispositivos emisor-receptor se pueden utilizar para hacer este tipo de sensor óptico: luz incandescente con una fotocelda, *LEDs* de luz visible y fototransistores sensibles a dicha luz o un *LED* emisor infrarrojo con su respectivo detector infrarrojo. El uso más común de este tipo de sensores, descrito en la sección 3.3.6 a continuación, se encuentra dentro del mecanismo de los motores y se utiliza para medir la rotación de dicho motor.

3.3.6. Codificador de Eje

Estos sensores codificadores de rotación, o *encoders* como comúnmente son conocidos, miden la rotación angular del eje de un motor. Estos proveen la información de la posición, la velocidad y la dirección de giro del eje en el cual se encuentren montados, dependiendo de su configuración. Para poder detectar un giro del eje, ya sea completo o parcial, generalmente se utiliza un disco dentado o ranurado adherido a dicho eje. Si el codificador utiliza un interruptor, este hace clic cada vez que hace su giro completo, si utiliza un emisor y receptor infrarrojo, cada

vez que detecte la luz indicaría la vuelta completa del eje. Existen diferentes tipos de tecnologías para los codificadores de eje con diferentes métodos de medición: interruptor de contacto, sensor magnéticos, sensor de proximidad, pero los que comúnmente se utilizan son los ópticos, en la configuración de barrera mencionado anteriormente. Estos codificadores se clasifican en dos categorías: incrementales y absolutos. La diferencia entre sí es que los codificadores incrementales inician su conteo y medición de la velocidad y desplazamiento angular desde cero, en una posición arbitraria; el codificador absoluto cuenta con una sola configuración de ranuras para cada ángulo detectado posible, por lo que sabe siempre en que posición se encuentra el eje con respecto a su origen.

3.3.6.1. Codificadores Incrementales

Los codificadores incrementales son capaces de determinar el desplazamiento y la velocidad angular del eje mediante la codificación de un tren de pulsos, el cual se genera cuando el disco ranurado permite o no pasar la luz infrarroja al receptor, como resultado del movimiento del eje del motor. Los codificadores incrementales pueden ser sencillos de una sola pista (un par emisor/receptor) o de hasta 3 pistas, como se muestra en las Figuras 3.16 (a),(b),(d) y (e). La Figura 3.16 (a) muestra el disco ranurado para un codificador con salida no codificada de 1 pista, la (b) muestra el mismo disco que (a) pero con índice, es decir, una segunda pista para indicar la rotación completa del eje. Las Figuras 3.16 (d) y (e) muestran los discos ranurados para producir una señal codificada sin índice de rotación y con índice de rotación, con dos y tres pistas, respectivamente.

La diferencia entre las señales no codificadas y codificadas es la capacidad de medir la dirección de giro del eje. Con una sola pista se es capaz medir el desplazamiento y velocidad angular mediante la resolución del disco (que tantas ranuras tiene igualmente espaciadas), contando las ranuras que se desplaza y el tiempo

en el que lo hace, teniendo en algunos casos la segunda pista para indicar el giro completo; esta aplicación tiene como limitante el giro del motor, utilizado para motores que giran siempre en una sola dirección.

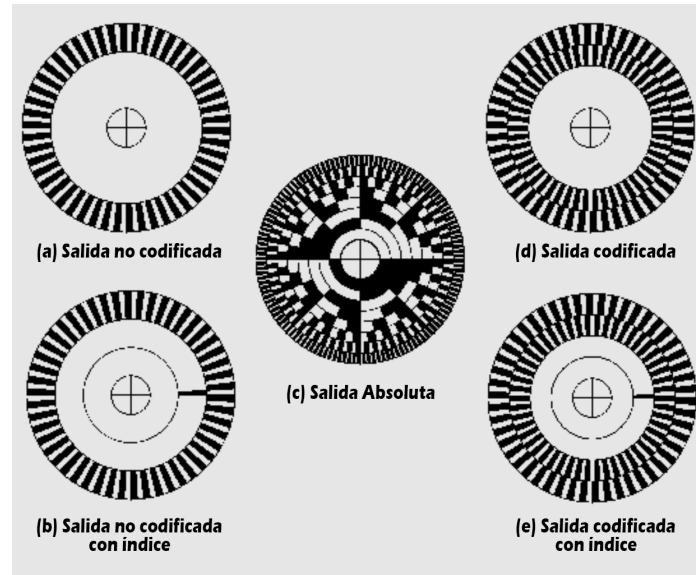


Figura 3.16: Tipos de discos ranurados para codificadores ópticos.

La señal codificada se produce añadiendo una segunda pista debajo de la primera, con la misma resolución y con un desfase de 90° . Esta configuración de codificador además de proveer la información de la velocidad y el desplazamiento angular, nos da la información del sentido de dirección de giro del eje, mediante la comparación de los pulsos de ambas pistas: si el motor gira en sentido horario la pista superior genera los pulsos antes que la pista de abajo; si el motor gira en sentido antihorario la pista de abajo genera pulsos primero, como se muestra en la Figura 3.17.

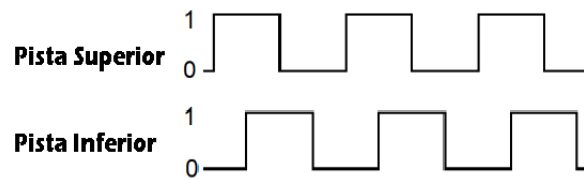


Figura 3.17: Señal de cuadratura códecada para el códecador óptico de dos pistas sin índice.

3.3.6.2. Codificadores Absolutos

Los codificadores absolutos utilizan algún diseño único en su disco ranurado, como el que se muestra en la Figura 3.16 (c). Este tipo de codificadores cuentan con múltiples pistas, por lo que produce un varios trenes de pulso al mismo tiempo al rotar. Las ranuras en este codificador no se encuentran igualmente espaciadas en el disco, sino estas se encuentran organizadas en un patrón o diseño específico, por lo que el código generado por el codificador corresponde a una posición angular específica.

La principal ventaja de este tipo de codificadores es su habilidad para proveer la lectura absoluta de su ángulo dentro de los 360°, por lo que si se pierde una lectura del codificador, no afectará las lecturas posteriores, ya que son independientes, a diferencia de los codificadores incrementales, cual acarrearía el error a las siguientes lecturas, hasta que fuera restablecido el contador.

3.3.7. Sensores Magnéticos

Hoy en día los sensores más comúnmente usados para detectar campos magnéticos son los de efecto Hall, esto parcialmente debido a que son casi perfectamente compatibles con la tecnología microelectrónica; sus procesos de fabricación y características materiales son similares a los ya disponibles en la industria semiconductora, por lo que la fabricación de este tipo de sensor magnético no requieren de

una gran inversión [26].

Estos sensores magnéticos, como el mostrado en la parte izquierda de la Figura 3.18, está compuesto por varios elementos semiconductores que, al detectar un campo magnético, generan voltaje perpendicular al sentido que le fluye la corriente, como se muestra en la parte derecha de la Figura 3.18. La cantidad de circuitos semiconductores tipo Hall que componen el sensor magnético varía según su tamaño, usualmente con unos cuantos milímetros de resolución [27][28][29].

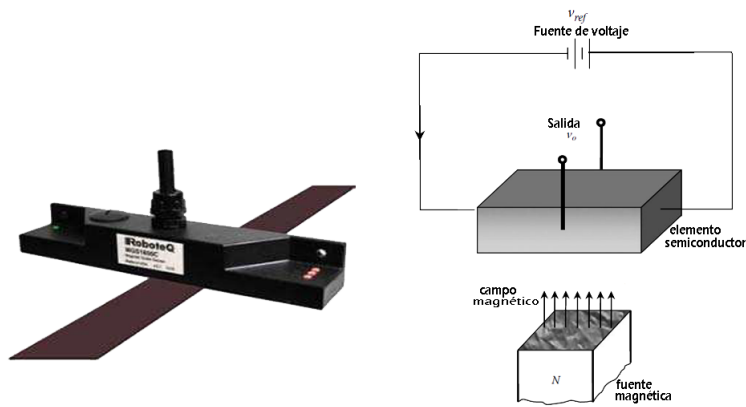


Figura 3.18: IZQ: Sensor magnético para navegación [30]. DER: Composición básica de un sensor de efecto Hall.

El sensor magnético en el *AGV* va colocado en la parte inferior, centrado al vehículo, para que este pueda detectar ya sea la cinta magnética 3.3.7.1 o los clavos magnéticos 3.3.7.2 que se colocan en el piso para trasladarse en un entorno. Este sensor tiene la capacidad de determinar la posición del vehículo referente a los dispositivos magnéticos detectados y utiliza dicha información sensorial para proveer voltaje a los motores apropiados para poder alinearse y permanecer dentro del rango de tolerancia predeterminado, conforme se vaya detectando los imanes [15].

Existen principalmente dos métodos populares para la navegación de los *AGVs*

en los entornos industriales: por medio de una cinta magnética o por medio de clavos magnéticos, cuales se describen a continuación.

3.3.7.1. Cinta Magnética

Este método es similar a los métodos de inductancia que se utilizaba en los inicios de los *AGV* en las industrias y al óptico, cual siguen rutas preestablecidas, solo que comparado con estas tecnologías, este método de la cinta magnética utiliza un sensor completamente pasivo, por lo que resulta en un ahorro de energía del *AGV*. De igual manera, las guías magnéticas son fáciles de colocar, instalar y modificar, es inmune a la tierra y suciedad y no se ve afectada por las condiciones de luz del entorno donde se encuentre. La cinta con propiedades magnéticas utilizada para trazar las trayectorias del *AGV* por lo general son de $25mm$ a $50mm$ de grosor y, además de ser fácil de instalar y modificar la trayectoria y puede ser doblado para crear virtualmente cualquier camino [27], proveyendo excelente durabilidad y confiabilidad en la instalación [31].

El sensor seguirá dicha trayectoria marcada por la cinta magnética, midiendo que tan lejos del centro del sensor se encuentre la cinta, para de esta manera proveer la información al controlador del motor para que pueda ajustar las velocidades y/o el direccionamiento de las llantas, para que el *AGV* se mantenga al centro de la pista marcada por la cinta. Para proporcionarle información para toma de decisiones como vueltas a izquierda, derecha o alto total en las intersecciones o entronques de la trayectoria, mostrados en la Figura 3.19, se utilizan marcadores colocados a los laterales de la cinta magnética, como se muestra en la Figura 3.20, que marca la trayectoria principal, antes de dichas intersecciones. Las intersecciones se denotan por mediciones continuas en las partes laterales del sensor magnético, como se ve en la Figura 3.19, al arribar y al partir la parte derecha del sensor da mediciones del campo detectado, entre mayor sea la separación, mayor será la medición. Para mantener el curso a la derecha o a la izquierda en los entronques,

se coloca un trozo de cinta hacia el lado donde se pretenda dar vuelta, al detectar el pulso del lado donde esté colocada la cinta, el *AGV* lo interpretara como vuelta hacia ese lado. El alto total es codificado con dos marcas a los lados de la cinta magnética de la trayectoria principal, como se muestra en la Figura 3.20. De igual manera se pueden programar mayor número de configuraciones con los marcadores para efectuar cambios de velocidades o precisión en los movimientos.

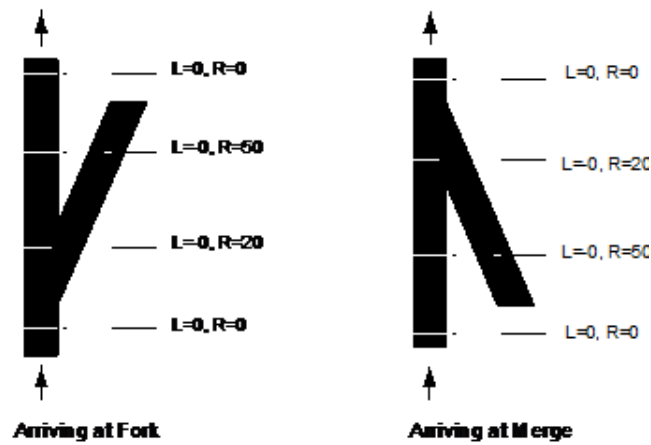


Figura 3.19: Intersecciones o entronques realizados con la cinta magnética y las mediciones del sensor [31].

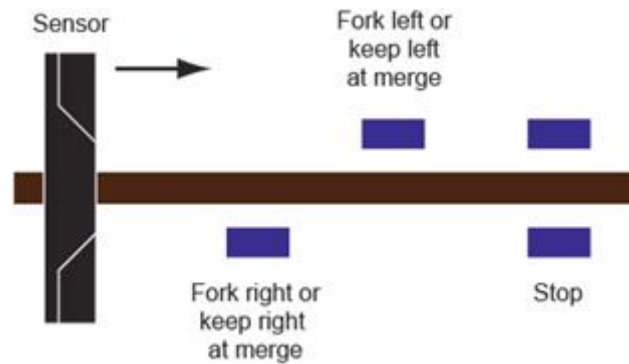


Figura 3.20: Marcadores magnéticos para continuar en la intersección hacia la izquierda, a la derecha o detenerse [31].

3.3.7.2. Clavos Magnéticos

Para este método se colocan marcadores, puntos o *clavos* magnéticos, enterrados en el suelo, usualmente pequeños [32] y de forma cilíndrica con un par de centímetros de diámetro, por otro par de centímetros de largo. Unos imanes permanentes muy populares para estas aplicaciones son los imanes de neodimio. La distancia en la que se colocan estos marcadores no debe de ser muy grande, ya que el *AGV* puede desviarse del camino entre un marcador y otro. La colocación de estos marcadores puede ser lineal o cuadriculada: la lineal asimila al método de la cinta magnética, pudiendo así realizar las diferentes trayectorias rectas, curvas y vueltas hacia los laterales; La forma cuadriculada, como se muestra en la Figura 3.21, permite una navegación un poco más flexible, sin limitarse a las trayectorias preestablecidas, a comparación de la cinta magnética. De esta manera, el *AGV* navega por un área cubierta con los clavos magnéticos mediante puntos de referencia guardados en la memoria de la computadora [15].

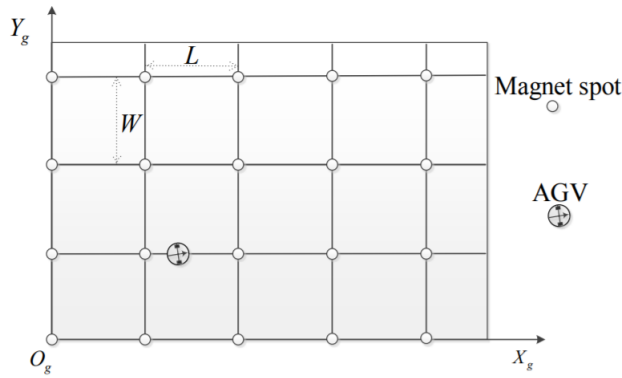


Figura 3.21: Mapa cartesiano de los marcadores magnéticos en un área [33].

3.3.8. Escáner LÁSER

La luz amplificada por estímulo de emisión de radiación, *LÁSER* por sus siglas en inglés, es un tipo de luz altamente amplificada y coherente, significando que la

luz que emite tiene una misma frecuencia y un mismo ángulo de fase constante, la cual puede ser configurada para ser emitida en diferentes frecuencias, dependiendo de su aplicación, para que esta se encuentre en el espectro electromagnético visible o no. Aunque la reflexión especular que se menciona en la Sección 3.3.4 también es susceptible en las ondas de luz, así como en cualquier tipo de onda, los equipos láser son capaces de, a gran escala, evitar dicho problema, aunque con ciertos intercambios y compensaciones en costos y tamaños, aunque se han vuelto, y seguirán volviéndose, utilizados más frecuentemente y más accesibles y pequeños, debido a la alta demanda en aplicaciones automotriz y robótica industrial y al desarrollo de tecnología. Los sensores láser, en la robótica, han sido extensamente utilizados para una gran variedad de aplicaciones como navegación, evasión de obstáculos y mapeo de entornos. Este tipo de sensores son útiles para la medición precisa de pequeños cambios o desplazamientos de las superficies [20][21][34].

Los láser de alto alcance son utilizados mediante la medición del tiempo de vuelo de la luz, de la misma manera que los ultrasónicos. Debido a que la velocidad de la luz ($299792500 \frac{m}{s}$ en el vacío [35]) es mucho mayor a la velocidad del sonido, el método del tiempo de vuelo resulta inconveniente para las mediciones de distancias cortas, ya que la luz se traslada más rápido de lo que la tecnología actual puede medir [20]. Los robot que usualmente operan en ambientes interiores, como los *AGVs*, típicamente no utilizan el tiempo de vuelo de la luz, sino que utilizan el método de desplazamiento de fase, como se muestra en la Figura 3.22.

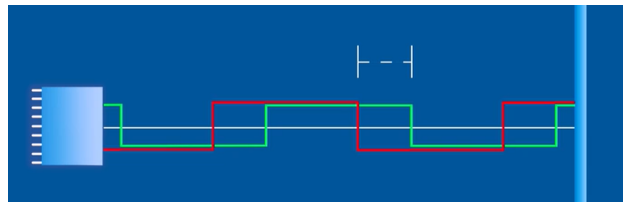


Figura 3.22: Desplazamiento de fase de la longitud de onda de luz reflejada [36].

Los sensores de barrido láser, como el que se muestra en la Figura 3.23, son capaces de hacer detecciones en un campo visual de 190° en un rango de 8 metros con una precisión de $\pm 5mm$ y una precisión angular de 0.25° [37], lo que significa que hace 760 lecturas en su campo de visual. También se pueden hacer detecciones de largo alcance, hasta 49 metros el sensor mostrado en la Figura 3.23, lo cual reduce la precisión de detección en el rededor de unos centímetros. Por lo general, los sensores comerciales ya hacen todo el procesamiento de los datos para entregar un conjunto de datos preciso y listo para utilizarse.

Para la navegación con láser, este se utiliza de dos maneras principales: para seguridad y para traslado. Para aplicaciones de seguridad, se utilizan sensores en configuraciones como el mostrado en la Figura 3.23, con rangos angulares de detección de 190° en general. Aquí se crean zonas de cercanía, como se muestra en la Figura 3.24 las zonas 1, 2 y 3, siendo estas las zonas de detección más importantes del sensor escáner láser de seguridad, correspondiendo a la zona lenta (1), la zona de parada (2) y la zona de parada de emergencia (3). Esta zona se vuelve proporcional a la velocidad con la que se traslada el *AGV* y se amplía y/o disminuye para que pueda ser una detección segura y a tiempo.



Figura 3.23: Sensor SICK S30A-4011DA [37].

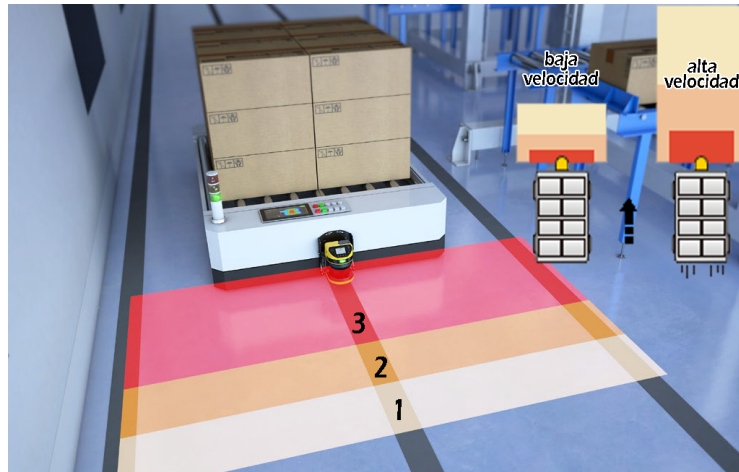


Figura 3.24: Zonas de detección de sensor láser de seguridad Keynce SV-Z (1) Zona lenta (2) Zona de parada (3) Zona de parada de emergencia [37].

Para el traslado del *AGV* mediante un escáner de barrido láser, se utilizan nubes de puntos fácilmente creados a partir de las mediciones del barrido. Esto se realiza mediante la recolección de tiempos de vuelo y desplazamientos de fase de un recorrido manual, que genera un mapa y lo guarda en la memoria del sistema, cual se utilizará como base de comparación en recorridos posteriores para ubicarse en el entorno. Para este tipo de aplicaciones se pueden utilizar diferentes tipos de escáneres láser: los escáner láser como el que se menciona anteriormente con 190° de campo de visión se utiliza simultáneamente su función de seguridad con el método de comparación de tiempos de vuelo de lo escaneado con la referencia guardada en memoria, a este tipo de navegación se le conoce como navegación libre, natural o navegación y ubicación simultánea, *SLAM* por sus siglas en inglés; también se utilizan escáneres láser capacidad angular de detección, que llega desde los 270° hasta los 360° , generalmente montados en una parte superior del *AGV*, como se muestra en la Figura 3.25, para poder realizar una triangulación láser con reflectores estratégicamente colocadas en el entorno, los cuales le ayudan a reflejar la señal láser emitida con alta eficiencia, para poder calcular su posición mediante

la comparación con la información dentro de su sistema.

El método *SLAM* también se puede aplicar con escáneres láser en *3D*, los cuales pueden constituirse de dos maneras: mediante el uso de una mayor cantidad de emisores y receptores láser o mediante el uso de un solo par emisor/receptor, en una configuración como la del *TVS*, la cuál se verá en la Sección 3.3.8.1 a continuación.

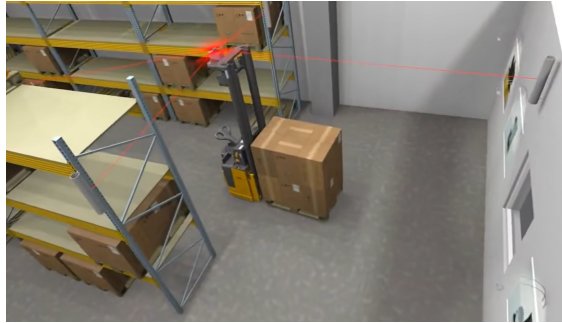


Figura 3.25: Navegación láser [38].

Con la adición de más pares de sensores láser, en configuración como se muestra en la Figura 3.26, se logra crear un barrido en $3D$. La cantidad de canales (pares láser) que se utilizan en el sensor, cuales son de 8 a 128 canales, dependen de la aplicación y la resolución que se requiera. Los *AGVs* por lo general usan un sensor de 16 o 32 canales, debido a la baja velocidad que manejan, esta cantidad de canales suele ser suficiente para una correcta navegación y mapeo del entorno [39].

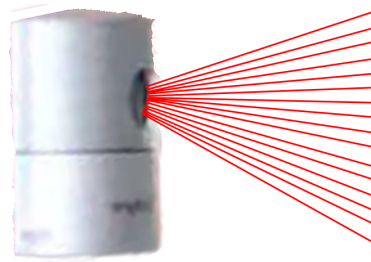


Figura 3.26: Barrido láser de múltiples canales.

3.3.8.1. Sistema de Visión Técnica

El *TVS* es un escáner láser de un solo par emisor/receptor, que se basa en el método de *triangulación dinámica* [11], llamado así por la habilidad rotativa del láser de posicionamiento (emisor), *PL* por sus siglas en inglés, y la apertura de escaneo (receptor), *SA* por sus siglas en inglés, que permiten tener ángulos cambiantes formando triángulos de diferentes formas y tamaños al reflejarse en el objeto detectado. De esta manera, se obtiene la información necesaria para calcular las coordenadas *3D*, según la luz del emisor sea detectada en las diferentes coordenadas del objeto, como se muestra en la Figura 3.27.

El *PL* está compuesto por un láser que emite su haz hacia un espejo fijo, con una inclinación de 45° , que a su vez redirige el haz hacia un espejo colocado a 45° sobre un motor a pasos, el cuál gira para crear de esta manera el barrido láser. La *SA*, es encargada de recibir los rayos reflejados del objeto a través de una apertura, hacia un motor DC girando a una velocidad constante, con un espejo a 45° que a su vez, redirige el rayo hacia un arreglo de lentes con un foto-transistor de alta velocidad. Este motor DC cuenta con un codificador óptico, cual manda un pulso cada vez que este hace un giro completo, para de esta manera y con la información del tiempo proporcionada al detectar un haz reflejado, poder calcular los ángulos necesarios para determinar la distancia al objeto.

Para llevar la detección del barrido láser cual crea un plano *2D* de las distancias detectadas a un mapa *3D*, el *TVS* cuenta con un mecanismo para la inclinación de dicho barrido de detección, lo que permite tener un ángulo en *Z* en el cuál se creará el barrido láser a una nueva altura.

La posición angular del motor a pasos del *PL*, el tiempo transcurrido entre el pulso marcador de giro de la *SA* y el haz detectado y la distancia fija entre el *PL* y la *SA*, son los requerimientos necesarios para poder hacer los cálculos de triangulación y determinar las distancias hacia los objetos.

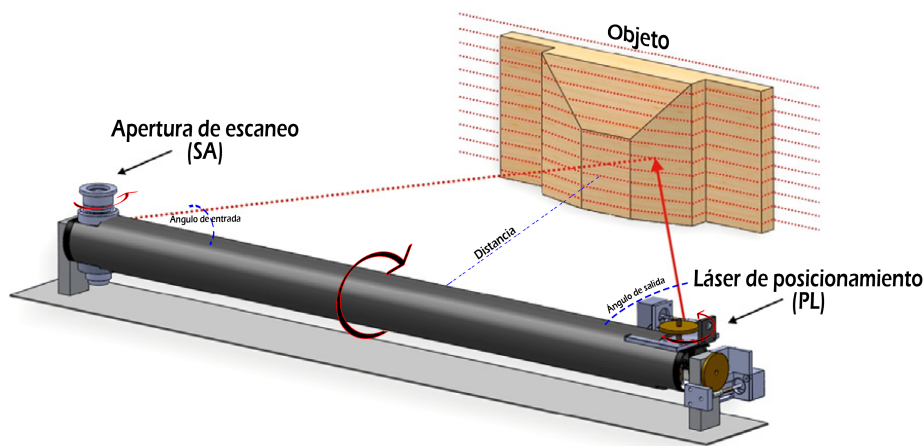


Figura 3.27: Modelo 3D del mecanismo de inclinación del TVS [11].

3.3.9. Sensores de Visión

Las cámaras son sensores biomiméticos, es decir, imitan un modelo biológico, en este caso el ojo, en su diseño y en su proceso para la resolución de problemas. Estos sensores captan la luz disponible en el entorno a través de un lente que dirige dicha luz captada al *plano de imagen*, cuál está compuesta por elementos fotosensibles, como circuitos de silicón o dispositivos de carga eléctrica interconectados, *charge-coupled device* o *CCD* por sus siglas en inglés, cuales transmiten la información de luz recaudada a una computadora para ser capturada [20]. La imagen captada por el plano de imagen está dividida usualmente en partes iguales en un arreglo rectangular, llamados píxeles.

Las cámaras digitales son los sensores más utilizados para los sistemas de visión. Son sensores extremadamente complejos que requieren de un gran nivel de procesamiento de datos, debido a que estos proveen una gran cantidad de información mediante la luz capturada en los píxeles del *CCD*, que permite, una vez procesada, la reconstrucción del entorno, siendo capaces de identificar bordes, formas, colores, tamaños, texturas, entre muchos otros tipos de información [21].

Esta información es capturada continuamente, es decir, es capturada como vídeo,

una serie de imágenes en el tiempo. Para poder procesar la información de los píxeles, es necesario obtener fotogramas individuales de la señal analógica de vídeo proveniente, mediante un hardware especializado de adquisición de datos llamado *frame grabber*. Esta fotograma es la que continúa al procesamiento de la imagen. El objetivo del procesamiento de imágenes es remover elementos no deseados y ruidos de la imagen, así como de resaltar características importantes, para poder extraer la información requerida de los datos procesados. En visión por computadora, más allá de un procesamiento de imagen clásico, se pueden realizar operaciones de reconocimiento de objetos, reconocimiento y clasificación de patrones, así como toma de decisiones basadas en conocimientos extraídos del procesamiento de la imagen. Las aplicaciones que se les da a los sensores de visión son numerosas [21], pero las aplicaciones más comunes son para medir, ubicar un objeto para su manipulación (cortar, agarrar, mover, etc) y obtener sus características, como color, textura y tamaño, entre otras, para evaluar su calidad.

3.3.10. Sensores Inerciales y *MEMS*

3.3.10.1. Sensores Inerciales

Los sensores de medición inercial, *IMU* por sus siglas en inglés, son dispositivos utilizados para medir velocidad, orientación y fuerza gravitacional [40]. Al inicio, estos sensores *IMU* eran dispositivos tenían varias limitaciones en tamaño, costo y consumo de energía, las cuales restringían su uso para aplicaciones grandes y no eran populares en dispositivos pequeños y aplicaciones de consumo, hasta más recientemente, con la introducción de los sistemas micro-electromecánicos o *MEMS*, por sus siglas en inglés, cuales se explicarán a mayor detalle en la sección 3.3.10.2. Los *IMU* están compuestos generalmente por dos tipos de sensores: un acelerómetro, cuál mide la aceleración inercial, y un giroscopio, que mide la rotación angular; aunque los *IMUs* más modernos también cuentan con un tercer tipo de sensor: un

magnetómetro, cuál mide el comportamiento de la dirección magnética y ayuda a mejorar la lectura del giroscopio. Cada sensor del *IMU* proveen dos o tres grados de libertad, definidos en los ejes x, y y z , dándole así a los dispositivos de 2 a 9 grados de libertad, según su configuración.

3.3.10.2. MEMS

Los *MEMS* son dispositivos que consisten en componentes micro-miniatura como sensores, actuadores y procesadores de señal, integrados en un solo micro chip. Los dispositivos se encuentran en la escala sub-milimétrica ($0.01 - 1.0mm$), y los componentes pueden ser tan pequeños como un micrómetro, encontrándose en un rango de los ($0.001 - 0.1mm$). Debido a que los *MEMS* aprovechan la tecnología de fabricación de los circuitos integrados, muchos componentes pueden ser integrados en un solo dispositivo, desde unos cuantos a varios miles. Las principales ventajas de estos sistemas son su tamaño y peso miniatura, su alta velocidad, su bajo consumo de energía y su facilidad y bajo costo de producción masiva [21]. Existen diferentes tipos de sensores *MEMS* disponibles, algunos de ellos son: acelerómetros, sensores de flujo, giroscopios, sensores de humedad, sensores de luz, magnetómetros, micrófonos, sensores de presión y sensores de temperatura.

3.3.11. RFID

La identificación por radio frecuencia, *RFID* por sus siglas en inglés de radio frequency identification, ha estado presente por décadas y se ha descrito como "*la tecnología vieja más nueva del mundo*" [41]. Sus inicios datan desde 1940 en la segunda guerra mundial, con un sistema de identificación de aviones *Amigo-Enemigo*. Las primeras aplicaciones comerciales fueron de vigilancia electrónica para prevenir el robo de mercancía. A pesar que la tecnología *RFID* tiene muchos años de conocerse, hasta reciente no se había utilizado con tanta frecuencia en la industria manufacturera, debido a que era una tecnología costosa y carecía de estandariza-

ción [42].

La identificación por radio frecuencia no siempre se basa en la comunicación mediante radio frecuencia, y la identificación es solo una de las muchas funciones está tecnología ofrece; más bien, y en su forma más simple, la *RFID* permite la recolección y/o intercambio de datos mediante etiquetas electrónicas sin contacto y un transmisor o lector inalámbrico, para la identificación y/o lectura de dichas etiquetas [41][43]. Esta tecnología tiene algunas ventajas en la velocidad de lectura y escritura de datos, las largas distancias de lectura y escritura, así como el reconocimiento de objetivos o etiquetas múltiples, incluso si estás se encuentran en movimiento [44]. La localización por *RFID* se puede realizar con dos procesos diferentes: por un lado, el mapeo de las etiquetas reconocidas a través de lectores con posiciones predeterminadas darán la posición de una etiqueta en movimiento; por otro lado, se puede estimar la posición precisa mediante la distancia entre la etiqueta y el lector, utilizando la información de la intensidad de la señal recibida, received signal strength o *RSS* por sus siglas en inglés [45].

Las etiquetas pueden ser tanto activas como pasivas; sistemas operando en las bajas (*LF*) y altas frecuencias (*HF*) son sistemas pasivos, los que operan en las frecuencias ultra altas (*UHF*) y microondas pueden ser sistemas pasivos o activos. Las etiquetas pasivas no cuentan con una fuente de poder propia, por lo que este no pueden transmitir datos sin recibir poder de un lector; utilizan una señal de radiofrecuencia emitida por el lector para encender el circuito integrado y transmitir una respuesta. La antena debe de ser capaz de pode recibir una señal entrante y transmitir una señal de respuesta. Su tiempo de vida es prácticamente ilimitado y estás pueden ser reactivadas muchos años después de haberse manufacturado. Su tamaño puede ir desde los $0.15mm$ hasta el tamaño de una tarjeta postal, dependiendo del tamaño de su antena. Al contrario de las etiquetas pasivas, las etiquetas activas cuentan con su propia fuente de poder para energizar el circuito integrado, el cual provee una señal continua. El contar con su propia fuente de poder le da

a estos sistemas algunas ventajas y consecuencias: para comunicarse no necesitan una señal fuerte del lector, a comparación de la pasiva que requiere una señal muy fuerte; las etiquetas pasivas requieren de un lector que mande una señal para poder comunicarse, las etiquetas activas pueden iniciar la comunicación, por lo que pueden ser programadas para enviar una señal con información continuamente o a tiempos específicos; la distancia de lectura de una etiqueta pasiva es desde unos centímetros hasta unos cuantos metros según su antena, a comparación las etiquetas activas pueden ser leídas desde unos cuantos metros hasta cientos de metros, dependiendo de su antena [41].

Los lectores, frecuentemente llamados *interrogadores*, complementan a las etiquetas y pueden ser tan diversos como estas. En su funcionamiento más básico, un lector manda un pulso de energía a la etiqueta y espera a *escuchar* la respuesta de esta. En sistemas simples, la energía del lector funciona como un interruptor de encendido, en sistemas más complejos la señal del lector puede contener comandos para la etiqueta, instrucciones de lectura o escritura de la etiqueta o incluso contraseñas. Las lectoras pueden emitir señal de manera permanente para siempre estar buscando etiquetas presentes, o puede ser activada por una fuente externa, como un operador encendiéndola y apagándola para el ahorro de energía y la minimización de interferencias. Los tamaños de los lectores varían, según sus parámetros, desde el tamaño de una moneda hasta el tamaño de una computadora personal [41].

3.3.12. *GPS*

El Sistema de Posicionamiento Global o *GPS* por sus siglas en inglés de Global Positioning System, es un sistema de posicionamiento espacial, de navegación y de sincronización desarrollado por la Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América. El *GPS* es comúnmente caracterizado como navegación o posicionamiento por satélite, proveyendo señales e información de geolocalización, así como

para seguimiento y medición efectiva de personas, vehículos y demás objetos en cualquier lugar del globo terráqueo [46].

Los componentes orbitales del *GPS* consisten en 24 satélites divididos en seis planos inclinados 55° del plano ecuatorial de la Tierra. Estos están posicionados para que, desde prácticamente cualquier punto de la Tierra, se observen al menos cuatro satélites sobre el horizonte en cualquier momento. La navegación precisa es posible ya que cada satélite lleva consigo por lo menos un reloj atómico estable, cual transmite información del tiempo y de la posición del satélite. Si el error de posicionamiento se requiere que sea de menos de un metro, el reloj atómico del satélite debe de encontrarse en un rango menor a 4 nanosegundos de la sincronización perfecta con los relojes atómicos de los demás satélites [47].

Simplistamente, el *GPS* implementa un concepto de la medición de la diferencia de arribo de tiempo, utilizando los satélites sincronizados por su reloj atómico para generar mensajes que son emitidos continuamente de dichos satélites. Estos mensajes emitidos pueden ser recibidos y procesados por usuarios en cualquier lugar del mundo para determinar la posición y el tiempo con una precisión de unos cuantos metros y unos nanosegundos de error, respectivamente. El *GPS* opera con una referencia centrada Tierra-Tierra, por lo que la determinación de la posición es independiente de la topografía local, cual debe ser acomodada por modelos geodésicos en los receptores *GPS* [46].

3.4. Centros de Gravedad de un *AGV*

Se dice que un sistema es sensible si la aceleración de dicho sistema cambia repentinamente al cambio de una fuerza externa aplicada. Si se quiere conocer dicho cambio en la aceleración del sistema con precisión, entonces las fuerzas aplicadas se deben conocer con mayor precisión. Dichos parámetros de fuerzas y aceleraciones se deben considerar en el modelo matemático del sistema. Una de las desventajas

de utilizar los algoritmos basados en modelos matemáticos, es que se toma en cuenta como si fuera un caso general y, como tal, realizan muchos cálculos que son para casos generales, pero frecuentemente, no representan un modelo particular del sistema.

Los errores de modelado son aquellos que causan el comportamiento del modelo matemático difiera del comportamiento del sistema físico. Uno de las principales causas de errores en el modelado son la suposición de un sistema de cuerpo rígido, dinámicas no modeladas e inexactitudes de los parámetros del modelo. La dinámica no modelada hace referencia a los aspectos físicos del sistema que se ignoran en la formulación del modelo. Los parámetros geométricos del sistema son usualmente conocidos con precisión, pero los parámetros de inercia son menos precisos, o incluso desconocidos [48].

Las estrategias de control robusto se desarrollan con la finalidad de estabilizar sistemas que presentan errores en el modelo y dinámicas no modeladas. Las incertidumbres se presentan, con frecuencia, en los cambios de la carga del robot, simplificación del modelo matemático, fuerzas de fricción, entre otras. Estas incertidumbres afectan a los parámetros de desempeño del sistema y al error de seguimiento, por tal razón, es importante diseñar esquemas de control robusto, teniendo en cuenta la no linealidad del sistema. En muchos de los trabajos de estudio, no se toma en cuenta los esfuerzos de control, un parámetro muy importante para implementar en el controlador [10].

Determinar el centro de gravedad de objetos irregulares es algo muy importante en términos de ingeniería. Es el punto dónde el peso del vehículo se encuentra balanceado en sus tres sentidos: de frente hacia atrás, de lado a lado y de arriba a abajo. Es importante considerar este parámetro para una correcta prevención de accidentes [49], ya que impide la habilidad de manejo del vehículo. Hacer dicha determinación de una manera correcta, por ejemplo en un vehículo de carga, podría

asegurar su funcionamiento seguro, fluido e integro [50] [51].

Los *AGVs* son sistemas dinámicos no triviales y no lineales; y a pesar de los más de 50 años que estos se han encontrado en la industria y de los grandes avances tecnológicos que se han desarrollado, pocos estudios usan una estrategia de control adaptativo o no-lineal, cuales toman en cuenta la variación inherente de la carga del vehículo o su posible cambio de velocidad. Esta variación de la carga es importante tomarla en cuenta debido a que el sistema puede presentar sensibilidad a dichos cambios e incertidumbres, es decir, el centro de gravedad *AGV* puede cambiar en respuesta al cambio de la carga aplicada [14].

Los métodos actuales para estimar el centro de gravedad incluyen pruebas manuales de carga, cuales no toman en cuenta los cambios dinámicos del vehículo, o utilizan modelos complejos, cuales consumen grandes cantidades de tiempo y recursos, además usualmente no son precisos. En [51], se propone un arreglo de cuatro acelerómetros y giroscopios tri-axiales, como los descritos en (3.3.10), donde estima el centro de gravedad con un alto grado de precisión y en tiempo real.

3.5. Transformaciones Geométricas

Un modelo geométrico contiene toda la información necesaria para representar el diseño de un objeto, para poder ejecutar las diferentes operaciones de modelado a dicho modelo: editarlo, visualizarlo, realizar cálculos y simulaciones. El modelo geométrico estaría formado por un lado por la definición de los objetos, y por otro, por la información de donde se colocan estos en un diseño concreto, posibilitando que se haga un único objeto y se utilicen múltiples instancias del mismo [52].

Para poder realizar las diferentes operaciones de modelado a los objetos en el diseño, es necesario conocer la ubicación, orientación y tamaño que tendrá en cada instancia. Esta información es representada por transformaciones geométricas que escalan, rotan y trasladan al objeto a su posición en diseño. Por lo general, se rea-

liza primero el escalado, seguido de la rotación y por último la traslación. De esta manera, se permite calcular de forma simple los parámetros de las transformaciones a partir de la posición, orientación y tamaño final dónde se quiera colocar el objeto en coordenadas maestras, cuales son el sistema de coordenadas en el que se definen las geometrías de los objetos [52]. Las coordenadas de un punto son las distancias de las proyecciones del resultado de la secuencia ordenada de transformaciones geométricas aplicadas al objeto sobre los ejes con respecto al origen. En un espacio tridimensional, los puntos se suelen representar mediante la terna (x, y, z) .

Esta información, propia de la transformación geométrica, se expresan las ecuaciones de transformación por medio de matrices, dónde, en este caso, se presenta el punto p como un vector y una matriz de transformación M en 3D, multiplicando al punto de la derecha para obtener el nuevo punto p' , como se muestra en (3.1),

$$p = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}, p' = \begin{bmatrix} x' & y' & z' \end{bmatrix} = p \cdot M \quad (3.1)$$

Debido a que no todas las transformaciones se aplican a un punto como multiplicación de factores, se utilizan coordenadas homogéneas para la representación matricial, de esta manera se asegura que todas las transformaciones realizadas puedan ser tratadas como multiplicaciones [53]. En coordenadas homogéneas, a cada punto en 3D se le agrega una cuarta coordenada, de tal manera quedarían representadas como se muestra en (3.2),

$$p = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix}, p' = \begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} = p \cdot M \quad (3.2)$$

dónde M es alguna de las matrices de escalamiento (3.5.1), traslación (3.5.2) o rotación (3.5.3), que se verán más adelante. Trabajar de esta manera permite concatenar las transformaciones geométricas. Esto, para en el caso de que a un conjunto de puntos se les deba aplicar una secuencia de transformaciones, se puedan multiplicar previamente las matrices, aplicando una única transformación resultante a cada uno de los puntos.

3.5.1. Escalamiento

La transformación de escalamiento, que se muestra en la ecuación 3.3, permite cambiar el tamaño del objeto mediante la siguiente matriz, donde E es un factor de escalamiento. La Figura 3.28 muestra el efecto de escalamiento de una figura con $E_x = 2$, $E_y = 1.5$ y $E_z = 2.5$.

$$M_{escala} = \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

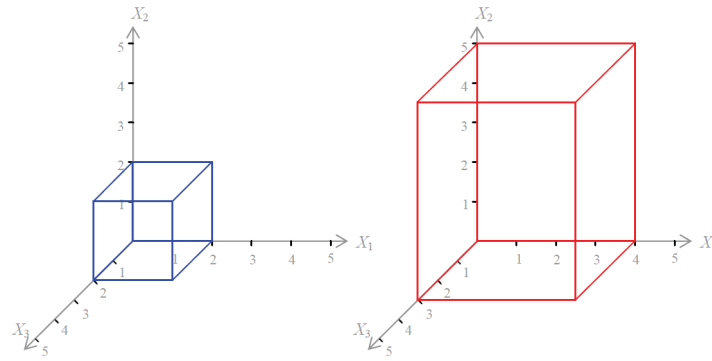


Figura 3.28: Ejemplo de escalamiento en 3D [53].

3.5.2. Traslación

La traslación, cuya transformación se representa en la ecuación permite desplazar el objeto a lo largo de sus dimensiones y, como resultado, se obtiene un cambio en su posición, trasladándose D unidades en los diferentes ejes. La Figura 3.29 muestra el efecto de la traslación de un objeto con $D_x = 2$, $D_y = 2$ y $D_z = 0$ unidades.

$$M_{traslacion} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ D_x & D_y & D_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

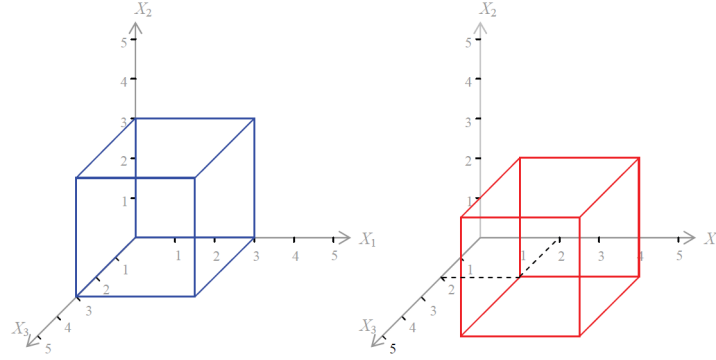


Figura 3.29: Ejemplo de traslación en 3D [53].

3.5.3. Rotación

La rotación permite girar el objeto sobre un eje de rotación, dado un valor de ángulo de rotación θ y su dirección. Para poder hacer rotar un objeto en 3D, se necesitan dos puntos no coincidentes que determinen un segmento de una recta, cuya línea de soporte defina un eje lineal uni-dimensional de rotación. Existen dos tipos de rotaciones, las rotaciones principales, cuales se verán en 3.5.3.1, son aquellas cuando el eje de rotación se encuentra sobre alguno de los tres ejes principales, X , Y , o Z ; las rotaciones sobre cualquier otro eje arbitrario son llamadas rotaciones generales, cuales se verán en la sección 3.5.3.2 más adelante.

Por convención, los ángulos de rotación positivos producen rotaciones en contra de las manecillas del reloj sobre el eje de rotación, mientras sea observado el giro desde la parte positiva del eje hacia el origen [53]. Otra forma de determinar la dirección de un giro positivo es mediante la regla de la mano derecha, cual dice que:

"Si se coloca el dedo pulgar de la mano derecha sobre el eje de rotación apuntando hacia arriba la parte positiva de dicho eje, el giro natural del resto de los dedos de la mano indican la dirección positiva del giro".

3.5.3.1. Rotaciones Principales

Las rotaciones principales son aquellas que se producen cuando el eje de rotación se encuentra sobre alguno de los tres ejes principales: X , Y y Z . El objeto rota, desde el origen, sobre algún eje de rotación principal, de una manera paralela al plano que resulta de los dos ejes restantes, por lo que los valores de la coordenada del eje que se está rotando no se ven afectados por la rotación. Por lo tanto, basándonos en la ecuación 3.2, utilizamos las ecuaciones 3.5, 3.6 y 3.7 como la matriz M para obtener los puntos p' rotados en los ejes X , Y y Z , respectivamente, como se muestra en la Figura 3.30.

$$M_{rot_x} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$M_{rot_y} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$M_{rot_z} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

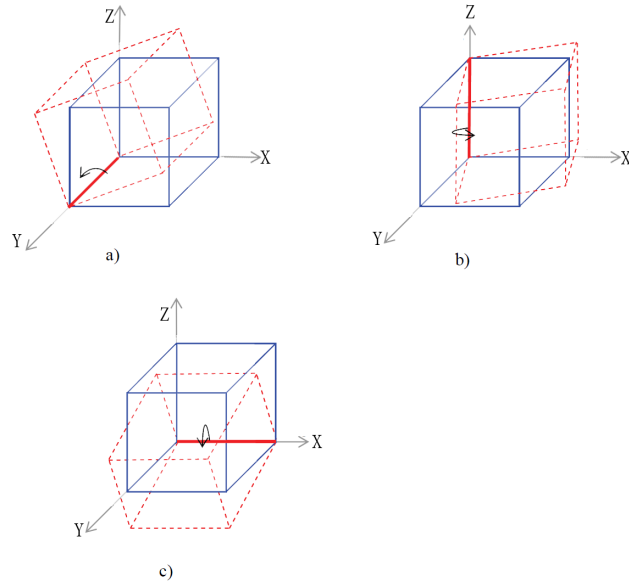


Figura 3.30: Rotaciones principales 3D: a) Eje Y en el plano ZX , b) Eje Z en el plano XY , c) Eje X en el plano YZ [53].

3.5.3.2. Rotaciones Generales

Las rotaciones generales son aquellas cuando el eje de rotación no se encuentra sobre alguno de los tres ejes principales, es decir, el segmento de línea pivote de dónde rota el objeto se encuentra definido por puntos arbitrarios. Para esta situación, se requiere de transformaciones adicionales que permitan llevar el eje de rotación arbitrario hacia alguno de los ejes principales del espacio, y de esta manera, poder aplicar las matrices de rotaciones principales, anteriormente descritas. Las rotaciones generales de un punto p , dado un ángulo θ , se da mediante un segmento arbitrario $\overline{ab}$ formado por dos puntos no coincidentes $a = (a_x^{(0)}, a_y^{(0)}, a_z^{(0)})$ y $b = (b_x^{(0)}, b_y^{(0)}, b_z^{(0)})$. Para poder realizar estas rotaciones, se requiere de tres pasos, que se describen a continuación y se muestran en la Figura 3.31:

1. Se traslada el segmento $\overline{ab}$ a uno de los ejes de rotación principal X , Y o Z , mediante una secuencia de traslaciones y rotaciones denominados el proceso

de *IDA*.

2. Se aplica la rotación alrededor del eje principal a donde fue llevado el segmento $\overline{ab}$.
3. Se regresa el segmento $\overline{ab}$ a su posición original mediante el proceso de *REGRESO*.

La matriz de *IDA*, cual muestra la ecuación 3.8, traslada el segmento $\overline{ab}$ de su posición original de tal manera que el punto a quede en el origen; esto se logra con la matriz de traslación $T(-a)$. Después, se lleva el segmento al plano XZ mediante una rotación de un ángulo α_1 sobre el eje Z y finalmente se hace una rotación de un ángulo α_2 al plano XY sobre el eje Y .

$$M_{ida} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -A_x & -A_y & -A_z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & -\sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & -\sin \alpha_2 & 0 & 0 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

La matriz de *REGRESO* (abreviado *REG*), cual muestra la ecuación 3.9, devuelve al segmento $\overline{ab}$ a su posición original. Para obtener esta matriz, se tienen que hacer las transformaciones del proceso de *IDA* en un orden inverso, por lo que la matriz $M_{REG} = (M_{IDA})^{-1}$.

$$M_{reg} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ A_x & A_y & A_z & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

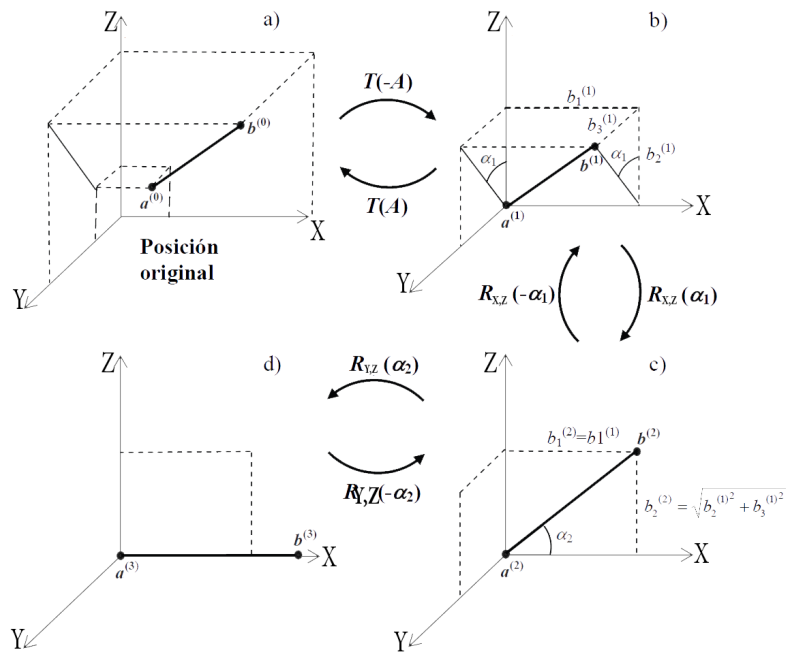


Figura 3.31: Proceso para llevar un segmento arbitrario $\overline{ab}$ sobre el eje X y regresarlo [53].

Capítulo 4

Metodología y Experimentación

4.1. Metodología

- Se investigó el estado del arte sobre temas relacionados con los *AGVs*
- Se evaluaron las opciones de plataformas móviles comerciales disponibles, para seleccionar la más adecuada para aplicaciones industriales de carga y transporte de materia prima, componentes y producto final, en el que se pueda adaptar el TVS
- Se analizó el modelo cinemático de un AGV basado en el centro de gravedad principal del AGV y se implementará dicho modelo en código computacional
- Se diseñó el modelo cinemático de un AGV con carga variable, es decir, con centros de gravedad arbitrarios dinámicos, basado en transformaciones geométricas de traslación y rotación de ejes arbitrarios, e implementara dicho modelo en código computacional
- Se creó una interfaz gráfica de usuario amigable para alimentar valores de parámetros, simular y obtener resultados visualmente a través de gráficas y descarga de archivos de datos

- Se diseñaron experimentos y se analizaron los resultados de simulación de trayectorias con ambos modelos cinemáticos a fin de comparar el error en la trayectoria para alcanzar el objetivo del AGV
- Se diseñaron experimentos y análisis de resultados de simulación de mediciones de coordenadas de objetos cerca del AGV para definir si obstruyen o no a trayectoria con ambos modelos cinemáticos
- Se integraron mediciones reales del TVS para el cálculo de coordenadas reales y simulación de objetos para considerar el efecto de los errores de medición del TVS en las trayectorias de ambos modelos cinemáticos

4.2. Experimentación

La experimentación se basa en la simulación de un *AGV* tradicional con cuatro ruedas y cuatro motores con un método de desplazamiento diferencial, cuál navegará en un entorno cerrado con condiciones de piso ideales, es decir, este entorno no contará con irregularidades en el piso. Este *AGV* contará también con un sistema que le proveerá la información del centro de gravedad, con codificadores en sus ruedas para poder monitorear el movimiento de estas mismas, con un acelerómetro de 3 ejes para monitorear sus rotaciones en los diferentes ejes, con sensores infrarrojos para la detección rápida de obstáculos que se encuentren en el entorno y contará con un *TVS* para la detección y caracterización de la ubicación en el espacio de dicho objeto detectado.

Para basarse en el *AGV* anteriormente mencionado para la simulación, se modeló el *AGV* como un cuerpo rígido creando una nube de puntos, como se muestra en la Figura 4.1 y se describe con la Ecuación 4.1

$$AGV_{Cloud} = R_x \times R_y \times R_z \quad (4.1)$$

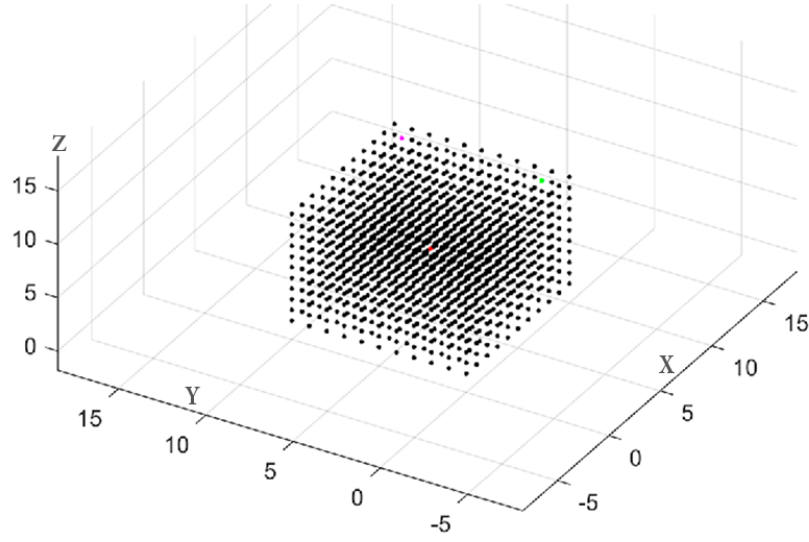


Figura 4.1: Nube de puntos que conforman al AGV.

Dicho modelo sirvió para visualizar las diferentes características del *AGV*: su centro de gravedad y la posición del emisor y receptor del *TVS*.

Debido a que el piso del entorno dónde navegará el *AGV* se encuentra en condiciones ideales, las transformaciones que se analizaron en esta experimentación son las traslaciones en los ejes X y Y , y la rotación de viraje φ (mejor conocido como Yaw en inglés) en el pivote paralelo al eje Z en el centro de gravedad (X_{Cg}, Y_{Cg}) del *AGV*, que son las transformaciones necesarias para seguir una trayectoria en un suelo ideal. Descartando las rotaciones de cabeceo θ (mejor conocido como Pitch en inglés), y de inclinación ϕ (mejor conocido como Roll en inglés).

En la Figura 4.2 a) se muestra el *AGV* con centro de gravedad (X_{Cg}, Y_{Cg}) en el centroide geométrico (X_{Gc}, Y_{Gc}) , mientras que en Figura 4.2 b) se muestra el *AGV* con centro de gravedad (X_{Cg}, Y_{Cg}) en un punto arbitrario (X, Y) .

En la Figura 4.3 a) se muestra la vista lateral del *AGV*, en la Figura 4.3 b) se muestra la vista trasera del *AGV*.

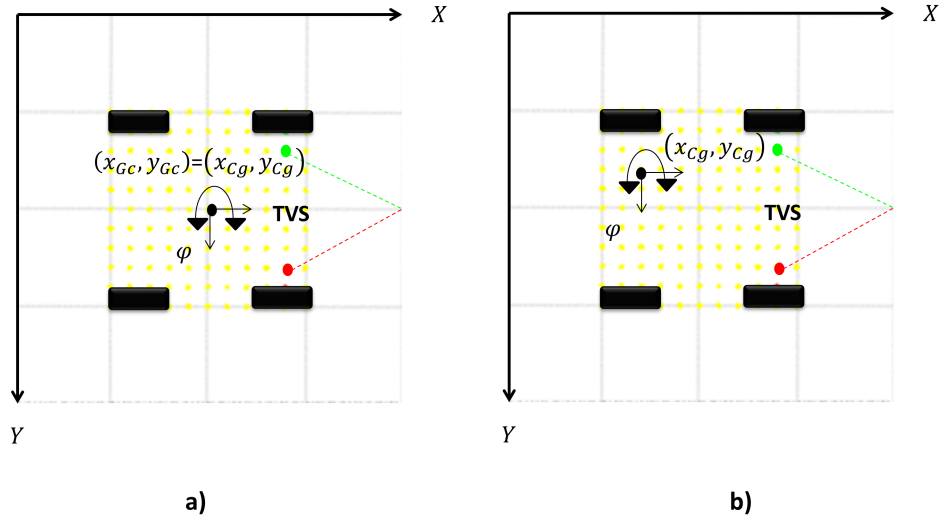


Figura 4.2: Centro de gravedad de AGV: a) Centro de gravedad en el centroide geométrico, b) Centro de gravedad en un punto arbitrario.

Para evaluar la influencia del cambio de centro de gravedad debido a variación de la carga en la trayectoria del *AGV*, se deben definir primero el tamaño y resolución del cuerpo rígido que se modeló y posteriormente definir un conjunto de trayectorias que este debe seguir, tomando en cuenta el tamaño del *AGV* en las trayectorias, para que estas sean lo más exactas posibles con distancias que cuenten con margen de seguridad mínimo en su traslado dentro del entorno. El tamaño del *AGV* se define mediante su longitud L , su anchura W y su altura H . La resolución R del *AGV* hace referencia a la cantidad de partículas que se encontrarán dentro del cuerpo rígido modelado, es decir, las partículas a las que se les monitoreará la influencia de los cambios de centro de gravedad a lo largo de las trayectorias que estás seguirán.

Para la experimentación, el tamaño del *AGV* definido por $L = W = H = 10\text{decimetros} = 1\text{metro}$ y un parámetro de resolución de 1, dándonos como resultado un total de 1331 puntos de resolución que se monitorearon durante las diferentes trayectorias que realizó el *AGV*, en dónde se incluyen los puntos de refe-

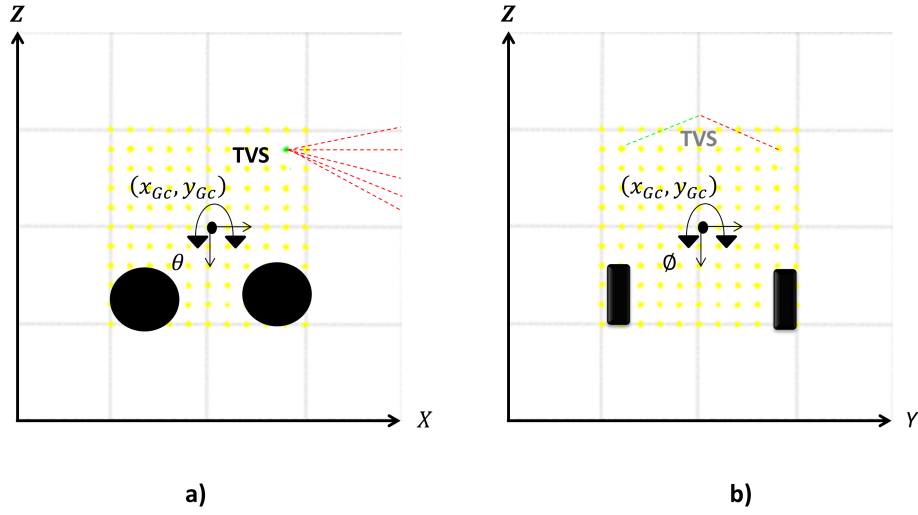


Figura 4.3: Vistas de AGV: a) Vista lateral, b) Vista trasera.

rencia del emisor y receptor del *TVS*. La diferencia entre parámetros de resolución se muestra en las Figuras 4.4 y 4.5 con parámetros de resolución de 1 y 2, respectivamente. Este parámetro de resolución aumenta la cantidad de puntos que se monitorean, brindando una mayor sensibilidad al sistema, es decir, existen más puntos con una menor distancia entre punto y punto que se evalúa, haciendo de esta manera más o menos sensible el sistema.

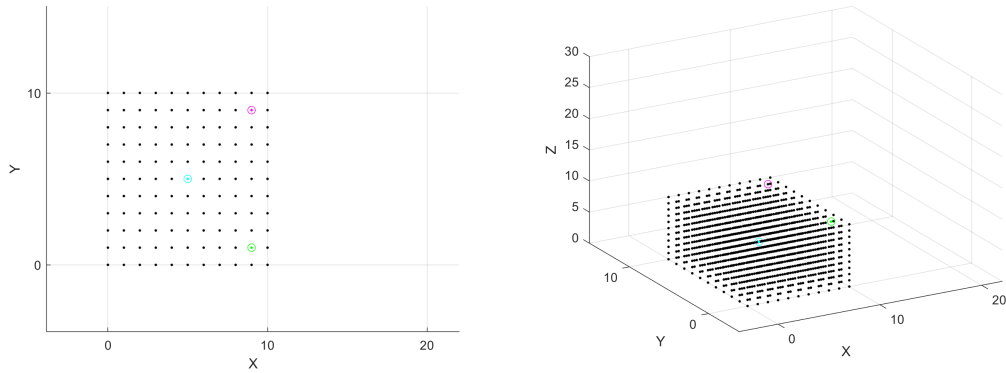


Figura 4.4: Nube de puntos con un parámetro de resolución de 1.

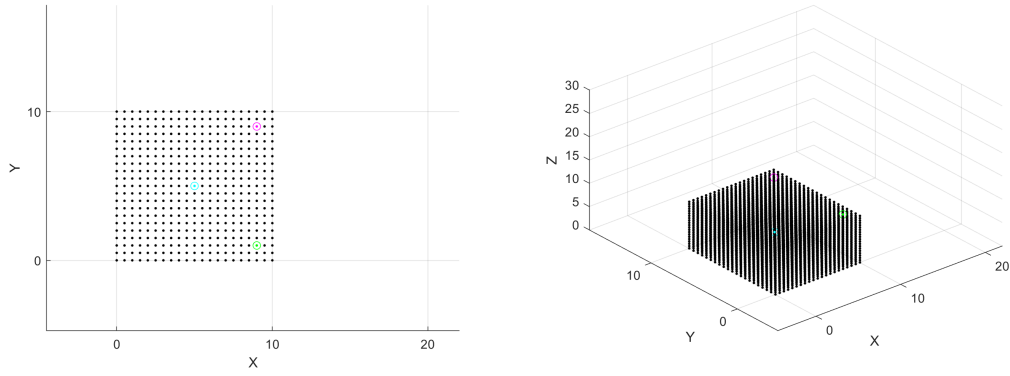


Figura 4.5: Nube de puntos con un parámetro de resolución de 2.

Las trayectorias se definen mediante instrucciones de movimientos de traslación d_x y d_y en los ejes X y Y , y ángulos de rotación φ con pivote paralelo a el eje Z , cuales se efectuaran en el centro de gravedad.

En la posición de inicio (mejor conocida como home en inglés) la nube de puntos del AGV se encuentra en el Marco O, después de cada paso de navegación cada una de sus particulas son trasladadas y rotadas de acuerdo a la posición y orientación requerida, expresada como el Marco M, como se muestra en la Ecuación 4.2, solo se realizaran rotaciones en φ .

$${}^O T_M = Trans(x, y, z) \times RPY(\phi, \theta, \varphi) \quad (4.2)$$

La experimentación se conformó de 6 trayectorias que siguió la nube de puntos del AGV. Cada una de las trayectorias se diseño para que el AGV las recorra de manera idónea con movimientos de traslación y rotación en base a su centro de gravedad principal o centro geométrico. Estos recorridos basados en el CDG principal se consideran recorridos perfectos y se utilizarán como base para comparar las trayectorias recorridas con los centros de gravedad arbitrarios, y de esta manera, poder realizar el cálculo de un error en las trayectorias con los diferentes centros de gravedad. De igual manera, y con los diferentes recorridos de las trayectorias

con los *CDG* arbitrarios, se puede saber con exactitud cuanto puede variar dicho *CDG* para que cumpla con el recorrido de manera correcta.

Tomando en cuenta las restricciones mencionadas anteriormente, que se trasladará sobre una superficie plana perfecta, por lo que no se moverá hacia arriba o abajo en el eje Z solo tendrá movimientos de traslación en los ejes X y Y y solo contará con rotaciones alrededor de ejes paralelos al eje Z , es decir, en el ángulo φ , ya que no rotará sobre ejes paralelos a los ejes X y Y , de acuerdo a la Sección 3.5 y a los requerimientos de esta experimentación, se obtuvo el modelo cinemático descrito a continuación.

La matriz de traslación sin movimientos en el eje Z se muestra en la ecuación 4.3 y para los movimientos de rotación se utilizó únicamente la rotación en ejes paralelos al eje Z , tomada de la ecuación 3.7 y mostrada de nuevo en la ecuación 4.4, cual produce rotaciones paralelas al plano XY .

$$M_{traslacion} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ D_x & D_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$M_{rot_\varphi} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Debido a que las matrices de ida y vuelta, que se muestran en las ecuaciones 3.8 y 3.9 respectivamente, toman en cuenta un objeto arbitrario en el aire, rotado en los 3 ejes, necesita establecer un segmento base para poder ejecutar sus rotaciones y traslaciones al origen para posteriormente hacer el movimiento de rotación, como se muestra en la Figura 3.31. Para esta experimentación, debido a las restricciones establecidas, no se requiere hacer las rotaciones en ϕ y en θ , por lo tanto, no se

requiere hacer las traslaciones de los ejes paralelos a X y Y para trasladar el *AGV* al origen, y el segmento base se vuelve un punto de la nube de puntos, que es punto variable que funge como centro de gravedad, a partir de dónde se producen las rotaciones. Por esto, las ecuaciones de ida y regreso se reducen de gran manera, resultando en las matrices mostradas en las ecuaciones 4.5 y 4.6, siendo las matrices de ida al origen y regreso al centro de gravedad, respectivamente, que se utilizan en la transformación de las coordenadas del *AGV* para trasladarlo y rotarlo en su centro de gravedad. Donde V_x y V_y corresponden a las coordenadas del centro de gravedad del *AGV* en el Marco de navegación.

$$M_{ida} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -V_x & -V_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$M_{regreso} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ V_x & V_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A partir de las matrices presentadas anteriormente, es posible crear una matriz única para trasladar y rotar el *AGV* en el entorno cualquiera que sea su centro de gravedad. La manera que se produce esta matriz única, es mediante la multiplicación ordenada de las diferentes matrices que conforman los movimientos de ida, rotación, regreso y traslación. La transformación que resulta de la multiplicación ordenada se muestra en las ecuaciones 4.7 a 4.9 a continuación.

$$TRF = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot M_{ida} \cdot M_{rot,\varphi} \cdot M_{regreso} \cdot M_{traslacion}, \quad (4.7)$$

dónde TRF es la posición final resultante después de haber aplicado la multiplicación ordenada, M_{ida} es la matriz de ida, de la posición dónde se encuentra

el *AGV* al origen basándose en el centro de gravedad, $M_{rot\varphi}$ es la matriz de rotación en el eje paralelo al eje Z , $M_{regreso}$ es la matriz de regreso a la posición original dónde se encontraba antes de aplicar la rotación y $M_{traslacion}$ es la matriz de traslación que moverá el *AGV* en el plano XY . Sustituyendo las matrices de las ecuaciones 4.5, 4.4, 4.6 y 4.3 en 4.7, obtenemos la siguiente ecuación:

$$TRF = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -V_x & -V_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ V_x & V_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ D_x & D_y & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Efectuando la multiplicación de las matrices homogéneas de la ecuación 4.8, obtenemos la ecuación 4.9, cuál es la ecuación modelo que describe los movimientos del *AGV* en cualquier instancia de tiempo, basando dichos movimientos en cualquier centro de gravedad.

$$TRF = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right) & \sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) & 0 & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) & \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ dx + vx - vx \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right) + vy \sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) & dy + vy - vy \cos\left(\frac{\pi t}{180}\right) - vx \sin\left(\frac{\pi t}{180}\right) & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Así, la posición, la orientación y el espacio que ocupa el *AGV* pueden conocerse en cualquier momento a través de las Ecuaciones 4.10, 4.11, 4.12.

$$x' = [(x - V_x)(\cos\varphi)) - ((y - V_y)(\sin\varphi))] + V_x + D_x \quad (4.10)$$

$$y' = [(x - V_x)(\sin\varphi)) + ((y - V_y)(\cos\varphi))] + V_y + D_y \quad (4.11)$$

$$z' = z \quad (4.12)$$

Los diferentes centros de gravedad que se utilizaron, son todos los puntos que conforman el plano (X, Y) del *AGV* con $Z = 0$, cuales se muestran en la Figura 4.6. Se toma el nivel base de $Z = 0$ para la referencia, pero el nivel de Z no es importante debido a las restricciones que se impusieron anteriormente, por lo que el resultado de la experimentación sería el mismo para $Z = 1, Z = 2 \dots Z = 10$. Los centros de gravedad se enumeran para facilitar la referencia a dichos puntos, dónde las coordenadas (X, Y) del primer punto son $(0, 0)$, del segundo son $(0, 1)$, del décimo son $(0, 9)$ y así sucesivamente. La numeración completa de todos los puntos que conforman el plano (X, Y) del *AGV* que se utilizarán como centros de gravedad para la experimentación se muestran en la Tabla 5.1 en la sección 5, dónde también se muestran los errores promedio que se obtuvieron al realizar las rutas 1, 2 y 3, mostradas en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9 respectivamente, con cada uno de los centros de gravedad.

Dichos puntos se dividieron en 3 zonas para la experimentación, excluyendo el *CDG* principal de estas mismas, como se muestran en la Figura 4.6 . Se considera al punto 61 como el *CDG* principal, correspondiente al centro geométrico del *AGV* y se muestra en color azul celeste. La Zona 1, que se muestra en rojo, se encuentra conformada por los puntos más próximos que rodean al *CDG* principal hacia todos los lados, incluyendo las diagonales. La Zona 2, mostrada en color negro, se

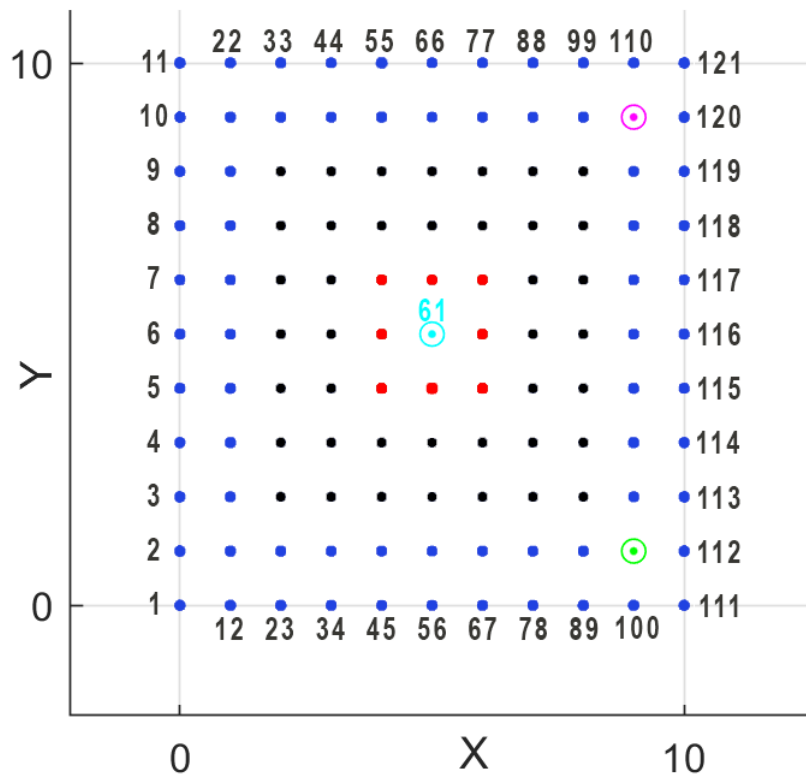


Figura 4.6: Numeración de puntos de centros de gravedad.

conforma de los siguientes dos conjuntos de puntos alrededor del *CDG* principal hacia las orillas del *AGV*, incluyendo las diagonales. La Zona 3, que se muestra en azul rey, se conforma de los últimos dos conjuntos de puntos que conforman la orilla del *AGV* y son los más alejados del *CDG* principal. Todos los puntos que conforman cada una de las zonas se muestran a continuación en la Tabla 4.1.

Las rutas que se utilizan para la experimentación, mostradas a continuación en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9, fueron diseñadas para que sean recorridos a la perfección por el punto 61, es decir su centro geométrico y de gravedad principal. Haciendo el recorrido de dichas rutas bajo la referencia de este punto, el *AGV* se mueve lo más cercano posible a los diferentes obstáculos que se encuentran en el entorno, cuales serían las 11 mesas que se muestran como cuadros blancos en las Figuras 4.7, 4.8 y 4.9. Las mesas se encuentran enumeradas de abajo hacia arriba y de

Zona	Puntos que la conforman
CDG Principal	61
Zona 1	49, 50, 51, 60, 62, 71, 72, 73
Zona 2	25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 47, 48, 52, 53, 58, 59, 63, 64, 69, 70, 74, 75, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97
Zona 3	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 32, 33, 34, 35, 43, 44, 45, 46, 54, 55, 56, 57, 65, 66, 67, 68, 76, 77, 78, 79, 87, 88, 89, 90, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121

Tabla 4.1: Numeración de puntos que se incluyen en cada zona.

izquierda a derecha, siendo la mesa 1 la mesa larga que se encuentra hasta abajo, continuando con la mesa 2 la que le continúa arriba a la derecha, la mesa 3 la de al lado derecha de la mesa 2 y así sucesivamente, hasta llegar a la mesa 11, que se encuentra en la esquina superior derecha. El entorno está diseñado para que las mesas 1 a 7, que se encuentran ubicadas en el medio del entorno, sean mesas de trabajo, dónde se encuentran los materiales a recoger, y las mesas 8 a 11 son estantes donde se descargaría el material recogido de las primeras mesas, por lo que todas las rutas mostradas pasan por una o más de las mesas de trabajo, simulando la recolección de material, y terminan pasando igualmente por una o más de los estantes, simulando la descarga del mismo antes de continuar a su lugar de origen.

La posición inicial dónde se crea la nube de puntos que conforman al *AGV* es en el punto número 1, de la Tabla 5.1, en el origen $(X, Y) = (0, 0)$, y con orientación como se muestra en la Figura 4.6, con el frente del mismo hacia el eje X . Esto es importante tomarlo en cuenta, debido a que para la experimentación, y como se muestra en las Figuras de las diferentes rutas, el *AGV* se toma en cuenta el frente

se traslada hacia arriba en el eje Y , hasta llegar a una altura pasando la mesa 1 donde, al girar -90° , queda con una separación de 1 unidad de esta mesa. Después de hacer el recorrido a lo largo de toda la mesa 1, procede a dar un giro de 90° y posteriormente trasladarse hacia arriba hacia la mesa 9. Una vez en la mesa 9, rota 90° lo más cercano a esta mesa para que se produzca la rotación sin chocar con esta misma. Una vez rotado, continua su trayectoria hacia la izquierda, dirigiéndose a la mesa 8, donde una vez que alcanza la altura de donde se encontraba inicialmente, procede a rotar otros 90° , para poder trasladarse hacia abajo. Una vez que baja hasta donde se encontraba inicialmente, el *AGV* gira 180° para poder terminar el recorrido en la posición inicial de $(X, Y) = (10, 5)$.

La ruta 2, mostrada en la Figura 4.8, es muy parecido al recorrido descrito anteriormente de la ruta 1, solo que este cuenta con un par de giros más hacia la mesa 3. Igualmente empieza en su posición inicial forzada de $(X, Y) = (10, 5)$ y se traslada hacia arriba para posteriormente girar -90° hacia la mesa 1. Continúa trasladándose al lado de la mesa 1 hasta la mitad de esta misma, y aquí se rota 90° para subir hacia el corredor de arriba y, una vez que alcanza a pasar la altura de las mesas 1 y 3, procede a girar -90° y continuar trasladándose hacia la derecha. Una vez que recorre lo largo de la mesa 3, se produce una rotación de 90° para continuar hacia arriba a la mesa 9, donde una vez que llegué, rota 90° lo más cercano a esta mesa para que se produzca la rotación sin chocar con esta misma. Una vez rotado, continua su trayectoria hacia la izquierda, dirigiéndose a la mesa 8, donde una vez que alcanza la altura de donde se encontraba inicialmente, procede a rotar otros 90° , para poder trasladarse hacia abajo. Una vez que baja hasta donde se encontraba inicialmente, el *AGV* gira 180° para poder terminar el recorrido en la posición inicial forzada.

La ruta 3, mostrada en la Figura 4.9, es la ruta más compleja que se realizó en la experimentación. Al igual que las rutas 1 y 2, esta inicia en la posición forzada de $(X, Y) = (10, 5)$ y se traslada hacia arriba hasta alcanzar la mesa 4, donde

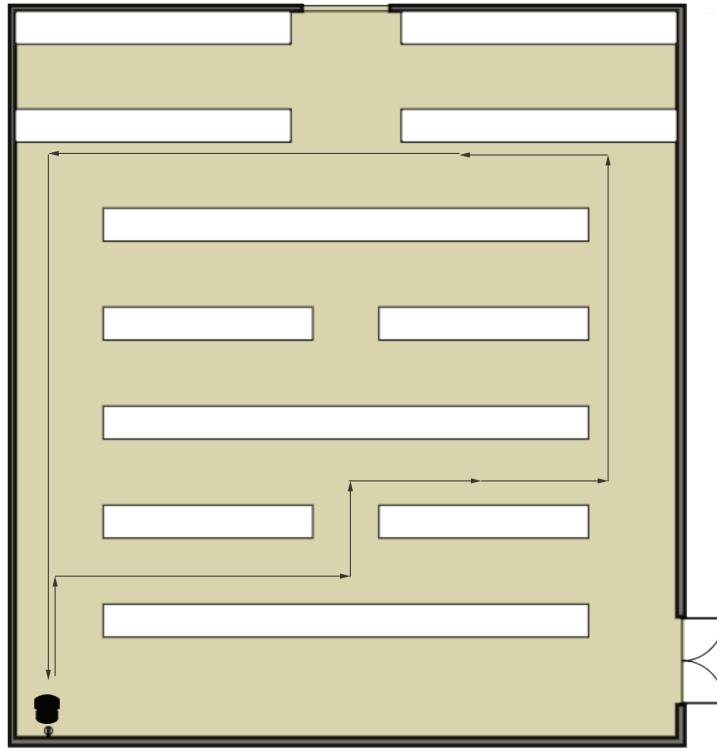


Figura 4.8: Ruta número 2.

rota -90° hacia la misma. El *AGV* continua hacia la derecha por un cuarto de la mesa 4, para posteriormente dar un leve giro de 45° y continuar hacia en medio de las mesas 5 y 6. Una vez alcanzada esta ubicación, gira otros 45° y continua una pequeña distancia para arriba, para luego girar 90° para recorrer la mesa 5 hacia la izquierda. A la mitad de esta mesa, se produce un giro de -45° hacia la mesa 7, dónde una vez que alcanza a librar esta mesa, se produce otro giro de -45° , para poder trasladarse hacia arriba otra pequeña distancia para librar la mesa 7 y después girar -90° y recorrer lo largo de la mesa 7 hasta la mitad. Una vez llegado el *AGV* al centro, se produce una rotación de 90° y sube hasta alcanzar una posición dónde quede con una mínima distancia de separación de la mesa 10, dónde gira 90° para recorrer lo largo de dicha mesa. Una vez que recorre la mesa 10, se produce otro giro de 90° y baja una pequeña distancia para después girar

con información fiable sobre el entorno que lo rodea y capaz de trabajar en colaboración con otros sistemas de *TVS* para permitir que el sistema de navegación *AGV* tome decisiones sobre la trayectoria que debe seguir.

Con una frecuencia de barrido de $20Hz$, cada $50ms$ un paquete de datos es arreglado en la matriz multidimensional $i \times j \times D_m$ que se muestra en la Figura 4.10 para retroalimentar al *AGV*. Donde el plano coordenado ij es el campo de visión que el *TVS* está observando y cada celda D_m corresponde a la detección de objetos $\{0,1\}$, al ángulo del posicionando láser C_{ij} , al ángulo de la apertura de escaneo B_{ij} , al plano Z que se está escaneando β_j , y las coordenadas X, Y, Z del objeto detectado en el campo de visión del *TVS* expresadas en el Marco de referencia de navegación en su posición inicial, y posteriormente transformado al igual que todas las coordenadas de las partículas del *AGV* por medio de la Ecuación 4.9.

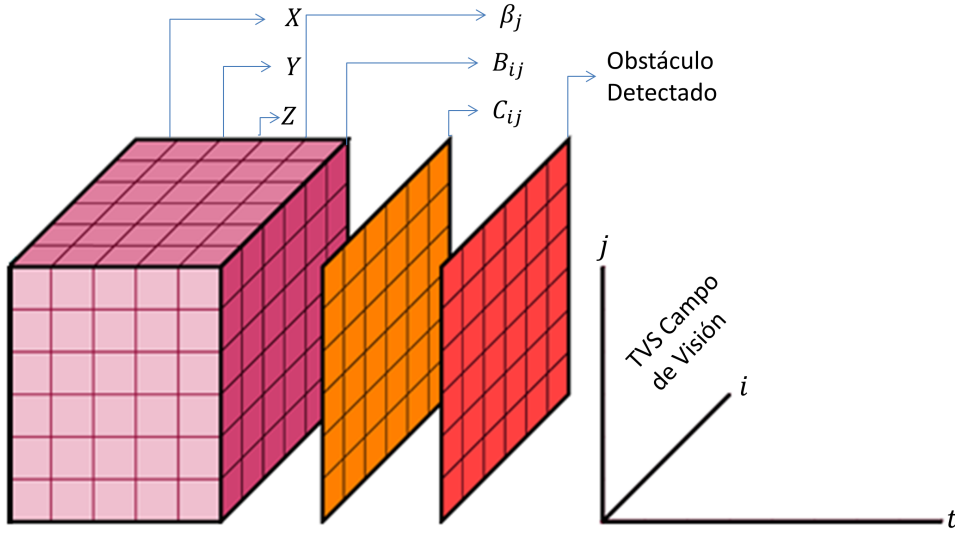


Figura 4.10: Multi-arreglo para la detección de objetos.

Conociendo la posición actual del *AGV*, la posición y orientación de los objetos y el espacio ocupado en cada instante, se puede utilizar las ecuaciones del modelo

cinemático inverso para calcular los parámetros dx, dy, φ requeridos para la trayectoria del *AGV* para evitar obstáculos, por medio de las Ecuaciones 4.13, 4.14, 4.15, definiendo la posición actual y la posición deseada del *AGV*.

$$d_x = x' - x \quad (4.13)$$

$$d_y = y' - y \quad (4.14)$$

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{x - v_x + \left(\frac{y-v_y}{x-v_x}\right) + y - v_y}{x - v_x + \frac{(y-v_y)^2}{(x-v_x)}}\right) \quad (4.15)$$

Las coordenadas de los objetos detectados por el *TVS* en el Marco de referencia del cuerpo del *AGV* se expresan con las Ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18, donde a es la distancia entre la apertura de escaneo y el emisor láser del *TVS*, mientras que la transformación de esas ecuaciones en el Marco de referencia de navegación se expresan con las Ecuaciones 4.19, 4.20, 4.21.

$$x_{ij} = a \frac{\text{seno}(B_{ij})\text{seno}(C_{ij})}{\text{seno}(B_{ij} + C_{ij})} \quad (4.16)$$

$$y_{ij} = a\left(\frac{1}{2} - \frac{\cos(B_{ij})\text{seno}(C_{ij})}{\text{seno}(B_{ij} + C_{ij})}\right) \quad (4.17)$$

$$z_{ij} = a \frac{\text{seno}(B_{ij})\text{seno}(C_{ij})\tan(\beta)}{\text{seno}(B_{ij} + C_{ij})} \quad (4.18)$$

$$X_{Obs} = ER_x + XIJ_x \quad (4.19)$$

$$Y_{Obs} = y_{cg} + y_{ij} \quad (4.20)$$

$$Z_{Obs} = z_{ij} \quad (4.21)$$

Dónde (E_x, E_y, E_z) es la coordenada del emisor láser y (R_x, R_y, R_z) es la coordenada de la apertura de escaneo.

Capítulo 5

Resultados

En la presente sección se resumen los resultados obtenidos al simular 3 rutas distintas (Figura 4.7, Figura 4.8, y Figura 4.9), cada una de ellas con las rotaciones φ en el eje paralelo al eje de las Z en cada una de las 121 coordenadas (Figura 4.6), que integran las posibles posiciones del centro de gravedad en el plano XY del AGV .

En la Tabla 5.1, la primera columna “*NUMdePTO*” indica a cada una de las 121 coordenadas que integran las posibles posiciones del centro de gravedad en el plano XY del AGV en el que se encontraba el AGV durante la simulación. La segunda columna “*CDG (x,y)*” provee los valores X y Y de la coordenada del centro de gravedad. La cuarta columna contiene el error de posicionamiento que alcanzo él AGV al final del recorrido por la Ruta 1 (Figura 4.7) en decímetros (10 decímetros equivalen a 1 metro), calculado por medio de la Ecuación 5.1, es decir, la distancia entre la posición ideal del centroide geométrico y la posición real del centroide geométrico debido a las rotaciones durante la trayectoria de la ruta en centro de gravedad arbitrario. Columnas quinta y sexta corresponden al error de posicionamiento que alcanzo él AGV al final del recorrido por la Ruta 2 (Figura 4.8) y la Ruta 3 (Figura 4.9), respectivamente.

$$e = \sqrt{(x_{Gideal} - x_{Greal}^2) + (y_{Gideal} - y_{Greal}^2)} \quad (5.1)$$

Las condiciones ideales se presentan cuando el centro de gravedad del *AGV* se ubica en su centroide geométrico, mientras que el error de posicionamiento se incrementa conforme el centro de gravedad del *AGV* se aleja de su centroide geométrico, como se ilustra en las Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, en el Apéndice B.

En la Figura 5.1 se observa una tendencia simétrica del error de posicionamiento provocado por las rotaciones φ en centros de gravedad arbitrario, en las 3 rutas descritas se conservó el mismo centro de gravedad durante toda la trayectoria. Por lo que se puede concluir que no es relevante la trayectoria seguida por el *AGV*, sino la posición del centro de gravedad, entre más se acerque al centroide geométrico del *AGV* menor será el error de posicionamiento, mientras que entre más se aleje del centroide geométrico del *AGV* mayor será el error de posicionamiento final del *AGV*. En recorrido de trayectorias con centro de gravedad arbitrarios fijos durante la trayectoria, en el peor de los casos se observa un error de posicionamiento menor al 10 % de la longitud del *AGV* propuesto (con longitud y anchura igual). En el recorrido de trayectorias con centros de gravedad arbitrarios variantes durante la trayectoria se esperaría obtener un error de posicionamiento menor o mayor al 10 % de la longitud y anchura del *AGV*, pues este depende de la infinita posibilidad de dimensiones del *AGV*, rutas y cambios del centro de gravedad durante el recorrido de la trayectoria en el *AGV*.

En la Tabla 5.2 se muestra el error de posicionamiento promedio para las 3 zonas propuestas en la Tabla 4.1, donde se observa un error promedio de 1.40 decímetros para la zona 1, de 3.55 decímetros para la zona 2 y finalmente de 6.15 decímetros para la zona 3.

[H]

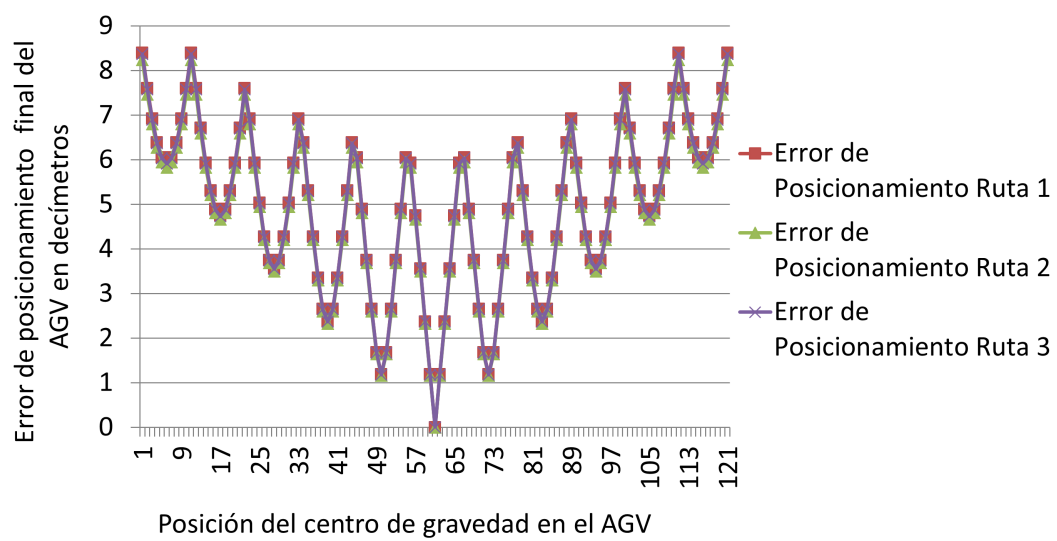


Figura 5.1: Representación gráfica del error de posicionamiento en los distintos centros de gravedad arbitrarios.

NUM de PTO	CDG (x,y)	PROM R1 (dm)	PROM R2 (dm)	PROM R3 (dm)	NUM de PTO	CDG (x,y)	PROM R1 (dm)	PROM R2 (dm)	PROM R3 (dm)	NUM de PTO	CDG (x,y)	PROM R1 (dm)	PROM R2 (dm)	PROM R3 (dm)
1	0,0	8.3938	8.2463	8.3696	45	4,0	6.0528	5.9465	6.0354	89	8,0	6.9217	6.8001	6.9018
2	0,1	7.6009	7.4673	7.5790	46	4,1	4.8944	4.8084	4.8803	90	8,1	5.9353	5.8310	5.9182
3	0,2	6.9217	6.8001	6.9018	47	4,2	3.7538	3.6879	3.7430	91	8,2	5.0363	4.9478	5.0218
4	0,3	6.3925	6.2802	6.3741	48	4,3	2.6543	2.6077	2.6467	92	8,3	4.2800	4.2048	4.2677
5	0,4	6.0528	5.9465	6.0354	49	4,4	1.6788	1.6493	1.6739	93	8,4	3.7538	3.6879	3.7430
6	0,5	5.9353	5.8310	5.9182	50	4,5	1.1871	1.1662	1.1836	94	8,5	3.5612	3.4986	3.5509
7	0,6	6.0528	5.9465	6.0354	51	4,6	1.6788	1.6493	1.6739	95	8,6	3.7538	3.6879	3.7430
8	0,7	6.3925	6.2802	6.3741	52	4,7	2.6543	2.6077	2.6467	96	8,7	4.2800	4.2048	4.2677
9	0,8	6.9217	6.8001	6.9018	53	4,8	3.7538	3.6879	3.7430	97	8,8	5.0363	4.9478	5.0218
10	0,9	7.6009	7.4673	7.5790	54	4,9	4.8944	4.8084	4.8803	98	8,9	5.9353	5.8310	5.9182
11	0,10	8.3938	8.2463	8.3696	55	4,10	6.0528	5.9465	6.0354	99	8,10	6.9217	6.8001	6.9018
12	1,0	7.6009	7.4673	7.5790	56	5,0	5.9353	5.8310	5.9182	100	9,0	7.6009	7.4673	7.5790
13	1,1	6.7150	6.5970	6.6957	57	5,1	4.7482	4.6648	4.7346	101	9,1	6.7150	6.5970	6.6957
14	1,2	5.9353	5.8310	5.9182	58	5,2	3.5612	3.4986	3.5509	102	9,2	5.9353	5.8310	5.9182
15	1,3	5.3087	5.2154	5.2934	59	5,3	2.3741	2.3324	2.3673	103	9,3	5.3087	5.2154	5.2934
16	1,4	4.8944	4.8084	4.8803	60	5,4	1.1871	1.1662	1.1836	104	9,4	4.8944	4.8084	4.8803
17	1,5	4.7482	4.6648	4.7346	61	5,5	0.0000	0.0000	0.0000	105	9,5	4.7482	4.6648	4.7346
18	1,6	4.8944	4.8084	4.8803	62	5,6	1.1871	1.1662	1.1836	106	9,6	4.8944	4.8084	4.8803
19	1,7	5.3087	5.2154	5.2934	63	5,7	2.3741	2.3324	2.3673	107	9,7	5.3087	5.2154	5.2934
20	1,8	5.9353	5.8310	5.9182	64	5,8	3.5612	3.4986	3.5509	108	9,8	5.9353	5.8310	5.9182
21	1,9	6.7150	6.5970	6.6957	65	5,9	4.7482	4.6648	4.7346	109	9,9	6.7150	6.5970	6.6957
22	1,10	7.6009	7.4673	7.5790	66	5,10	5.9353	5.8310	5.9182	110	9,10	7.6009	7.4673	7.5790
23	2,0	6.9217	6.8001	6.9018	67	6,0	6.0528	5.9465	6.0354	111	10,0	8.3938	8.2463	8.3696
24	2,1	5.9353	5.8310	5.9182	68	6,1	4.8944	4.8084	4.8803	112	10,1	7.6009	7.4673	7.5790
25	2,2	5.0363	4.9478	5.0218	69	6,2	3.7538	3.6879	3.7430	113	10,2	6.9217	6.8001	6.9018
26	2,3	4.2800	4.2048	4.2677	70	6,3	2.6543	2.6077	2.6467	114	10,3	6.3925	6.2802	6.3741
27	2,4	3.7538	3.6879	3.7430	71	6,4	1.6788	1.6493	1.6739	115	10,4	6.0528	5.9465	6.0354
28	2,5	3.5612	3.4986	3.5509	72	6,5	1.1871	1.1662	1.1836	116	10,5	5.9353	5.8310	5.9182
29	2,6	3.7538	3.6879	3.7430	73	6,6	1.6788	1.6493	1.6739	117	10,6	6.0528	5.9465	6.0354
30	2,7	4.2800	4.2048	4.2677	74	6,7	2.6543	2.6077	2.6467	118	10,7	6.3925	6.2802	6.3741
31	2,8	5.0363	4.9478	5.0218	75	6,8	3.7538	3.6879	3.7430	119	10,8	6.9217	6.8001	6.9018
32	2,9	5.9353	5.8310	5.9182	76	6,9	4.8944	4.8084	4.8803	120	10,9	7.6009	7.4673	7.5790
33	2,10	6.9217	6.8001	6.9018	77	6,10	6.0528	5.9465	6.0354	121	10,10	8.3938	8.2463	8.3696
34	3,0	6.3925	6.2802	6.3741	78	7,0	6.3925	6.2802	6.3741					
35	3,1	5.3087	5.2154	5.2934	79	7,1	5.3087	5.2154	5.2934					
36	3,2	4.2800	4.2048	4.2677	80	7,2	4.2800	4.2048	4.2677					
37	3,3	3.3575	3.2985	3.3478	81	7,3	3.3575	3.2985	3.3478					
38	3,4	2.6543	2.6077	2.6467	82	7,4	2.6543	2.6077	2.6467					
39	3,5	2.3741	2.3324	2.3673	83	7,5	2.3741	2.3324	2.3673					
40	3,6	2.6543	2.6077	2.6467	84	7,6	2.6543	2.6077	2.6467					
41	3,7	3.3575	3.2985	3.3478	85	7,7	3.3575	3.2985	3.3478					
42	3,8	4.2800	4.2048	4.2677	86	7,8	4.2800	4.2048	4.2677					
43	3,9	5.3087	5.2154	5.2934	87	7,9	5.3087	5.2154	5.2934					
44	3,10	6.3925	6.2802	6.3741	88	7,10	6.3925	6.2802	6.3741					

Tabla 5.1: Tabla de Errores Promedio

Zona	Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3
CDG Principal	0.0	0.0	0.0
Zona 1	1.4	1.4	1.4
Zona 2	3.6	3.5	3.6
Zona 3	6.2	6.1	6.2

Tabla 5.2: Error promedio en decímetros

Capítulo 6

Conclusión

La automatización del transporte en los sectores de producción, comercio y servicio, es un factor relevante en la optimización de la intralogística. Los *AGVs* son una pieza clave de estos sistemas logísticos en el entorno industrial, y la optimización de su navegación es crucial. De acuerdo con el alcance de la Industria 4.0, los *AGVs* pueden garantizar la reacción en tiempo real ante cambios inesperados en los planes de producción. Los *AGVs* pueden interconectarse con otros cbersistemas mediante su subsistema de entrada/salida. Además, los *AGVs* pueden adoptar el concepto de robots móviles colaborativos.

En esta tesis se presentan los principios de operación fundamentales de las tecnologías involucradas en los *AGVs*, se realiza una reseña de su evolución a través de sus generaciones tecnológicas y el impacto que ha tenido en ellos el desarrollo de la tecnología en las últimas décadas, en especial el de la electrónica a través del auge en los semiconductores, se muestra además el estado del arte en investigaciones y experimentaciones realizadas en busca de su optimización en los últimos años.

El análisis crítico de los diversos aspectos de investigación en el campo de los modelos teóricos de los *AGVs* realizado permitió identificar la clasificación de las diversas tecnologías de los *AGVs*, las ventajas de la navegación autónoma, así como los retos que aun se encuentran presentes por resolver.

Se analizó, estableció y experimento el modelo cinemático a través de una simulación de un *AGV* tradicional con cuatro ruedas y cuatro motores con un método de desplazamiento diferencial, para navegar en un entorno cerrado con condiciones de piso ideales, es decir, este entorno no considera irregularidades en el piso. Un *AGV* con un sistema que le provee la información del centro de gravedad, con codificadores en sus ruedas para monitorear el movimiento de estas mismas, con un acelerómetro de 3 ejes para monitorear sus rotaciones en los diferentes ejes, con sensores infrarrojos para la detección rápida de obstáculos que se encuentren en el entorno y con un *TVS* para la detección y caracterización de la ubicación en el espacio de objetos que pudieran ocluir el paso del *AGV*.

A fin de discutir y demostrar la influencia de la variación de carga de los *AGVs* en el comportamiento de navegación de los mismos para comprender la relación entre el modelo cinemático y el centro de gravedad arbitrario de los *AGVs*. Se presenta el modelo cinemático planteado, el diseño de los experimentos ejecutados en las simulaciones del modelo de cinemático para identificar y cuantificar su impacto, así como su relevancia en la aplicación de almacenes inteligentes en un entorno industrial para introducir un esquema novedoso de navegación de *AGVs* guiados por láser que consideren la variación de la carga durante su trayectoria para una navegación segura, autónoma y óptima.

Se proporciono un esquema de navegación para integrar el *TVS* en los *AGVs* industriales. Se ha evaluado cómo con el *TVS* es posible obtener una descripción del espacio de trabajo recopilando información sobre su entorno. Se simuló el entorno del almacén logístico y el rendimiento de navegación del *AGVs* planteado. Trabajos futuros podrían considerar evaluar otros aspectos originados por la variación de la carga, como la vibración del vehículo y su influencia en la lectura de los sensores, así como los efectos de la sobrecarga en la fricción rueda-piso, además de imperfecciones en el suelo que requerirán la inclusión de las rotaciones de cabeceo θ (Pitch), y de inclinación ϕ (Roll) en el modelo cinemático del *AGV*.

Apéndice A

Códigos de Matlab

Listing A.1: Código para creación de nube de puntos

```
1 function [xp,yp,zp,CGP,TVscan,TVemit]=agpts(dim,res)
2 lx=1:(1/res):dim+1;v=length(lx);ct=1;
3 xp=zeros(v+7,1);yp=zeros(v+7,1);zp=zeros(v+7,1);
4 for z=1:v
5     for y=1:v
6         for x=1:v
7             xp(ct)=(x-1)/res;yp(ct)=(y-1)/res;zp(ct)=(z-1)/res;
8             ct=ct+1;
9         end
10    end
11 end
12 % se agrega columna para valores de centro de gravedad principal[
13    xCGprpal,yCGprpal,zCGprpal]
14 CGP(1)=(dim/2);CGP(2)=(dim/2);CGP(3)=(dim/2); CGP(4)=1;
15 % se agrega columna para la posicion del TVScanner [xTVscan,
16    yTVscan,zTVscan,1]
17 TVscan(1)=(dim-1);TVscan(2)=(dim-1);TVscan(3)=dim;TVscan(4)=1;
18 % se agrega una columna para la posicion del TVSemitter [xTVemit,
19    yTVemit,zTVemit,1]
20 TVemit(1)=(dim-1);TVemit(2)=1;TVemit(3)=dim;TVemit(4)=1;
21 end
```

Listing A.2: Main del programa

```

1 clear all ;close all;clc
2 dim=10; %tama o de cubo
3 res=1; %resoluci n del cubo
4 [x(1,:),y(1,:),z(1,:),CGp(1,:),tvs(1,:),tve(1,:)]=agpts(dim,res);
5 ox=x;oy=y;oz=z;oCGp=CGp;otvs=tvs;otve=tve;
6 [dx,dy,dz,th]=readvars('xyzR2.xlsx');
7 for r=1:length(dx) %ruta CDG principal para calcular error
8     [ox(r+1,:),oy(r+1,:),oz(r+1,:),oCGp(r+1,:),otvs(r+1,:),otve(r
9         +1,:),]=rotar(ox(r,:),oy(r,:),oz(r,:),oCGp(r,:),otvs(r,:),otve(
10            r,:),th(r),dx(r),dy(r),dz(r));
11 end
12 for xcgp=0:10
13     for ycgp=0:10
14         figure()
15         CGp=[xcgp,ycgp,10,1];
16         ax=CGp(1);ay=CGp(2);
17         fprintf('CDG: [%d, %d]\n',ax,ay);
18         for k=1:length(dx)
19             grid on;hold on
20             xlim([-10 310]);ylim([-10 350]);zlim([-0.01 30]);
21             xticks(-10:10:310);yticks(-10:10:350);zticks(-10:5:50);
22             xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
23             title({'Ruta 1';['CDG: ',num2str(ax),' ',num2str(ay),']'}));
24             shopfloor2(x(k,:),y(k,:));
25             if k~=1 %para no graficar la posici n 0,0 y comenzar a graficar
26                 desde la posicion home forzada
27                 graff(x,y,z,CGp,tve,tvs,k);
28             end
29             pause(0.1);
30             [x(k+1,:),y(k+1,:),z(k+1,:),CGp(k+1,:),tvs(k+1,:),tve(k+1,:)]=
31                 rotar(x(k,:),y(k,:),z(k,:),CGp(k,:),tvs(k,:),tve(k,:),th(k),dx(
32                     k),dy(k),dz(k));
33             ertvs=sqrt((tvs(k,1)-otvs(k,1))^2+(tvs(k,2)-otvs(k,2))^2+(tvs(k,3)

```

```

        -otvs(k,3))^2);
29 fprintf('Error AGV con ruta origen: %2.2f\n',ertvs);
30 errTvs(k)=ertvs;
31 end
32 avgTvs=mean(errTvs)
33     end
34 end

```

Listing A.3: Graficación de mesas y evaluación de colisión

```

1 function shopfloor2(x,y)
2 grid on;hold on
3 xlim([-10 350]);ylim([-10 350]);zlim([-0.01 30]);
4 xticks(-10:10:350);yticks(-10:10:350);zticks(-10:10:100);
5 xlabel('X');ylabel('Y');zlabel('Z');
6 h=0; %altura Z del contorno
7 %mesas
8 [xm1,ym1,zm1]=mesa1();[xm2,ym2,zm2]=mesa2();
9 [xm3,ym3,zm3]=mesa3();[xm4,ym4,zm4]=mesa4();
10 [xm5,ym5,zm5]=mesa5();[xm6,ym6,zm6]=mesa6();
11 [xm7,ym7,zm7]=mesa7();[xm8,ym8,zm8]=mesa8();
12 [xm9,ym9,zm9]=mesa9();[xm10,ym10,zm10]=mesa10();
13 [xm11,ym11,zm11]=mesa11();[xc,yc,zc]=contorno(h);
14 %evaluacion de nube de puntos para ver colision
15 if any(x>=xm1(1) & x<=xm1(end)) && any(y>=ym1(1) & y<=ym1(end))
16     fprintf(2,'choca mesa 1\n');
17 end
18 if any(x>=xm2(1) & x<=xm2(end)) && any(y>=ym2(1) & y<=ym2(end))
19     fprintf(2,'choca mesa 2\n');
20 end
21 if any(x>=xm3(1) & x<=xm3(end)) && any(y>=ym3(1) & y<=ym3(end))
22     fprintf(2,'choca mesa 3\n');
23 end
24 if any(x>=xm4(1) & x<=xm4(end)) && any(y>=ym4(1) & y<=ym4(end))
25     fprintf(2,'choca mesa 4\n');

```



```

26 end
27 if any(x>=xm5(1) & x<=xm5(end)) && any(y>=ym5(1) & y<=ym5(end))
28     fprintf(2,'choca mesa 5\n');
29 end
30 if any(x>=xm6(1) & x<=xm6(end)) && any(y>=ym6(1) & y<=ym6(end))
31     fprintf(2,'choca mesa 6\n');
32 end
33 if any(x>=xm7(1) & x<=xm7(end)) && any(y>=ym7(1) & y<=ym7(end))
34     fprintf(2,'choca mesa 7\n');
35 end
36 if any(x>=xm8(1) & x<=xm8(end)) && any(y>=ym8(1) & y<=ym8(end))
37     fprintf(2,'choca mesa 8\n');
38 end
39 if any(x>=xm9(1) & x<=xm9(end)) && any(y>=ym9(1) & y<=ym9(end))
40     fprintf(2,'choca mesa 9\n');
41 end
42 if any(x>=xm10(1) & x<=xm10(end)) && any(y>=ym10(1) & y<=ym10(end)
43     )
44     fprintf(2,'choca mesa 10\n');
45 end
46 if any(x>=xm11(1) & x<=xm11(end)) && any(y>=ym11(1) & y<=ym11(end)
47     )
48     fprintf(2,'choca mesa 11\n');
49 end
50 %graficacion de mesas
51 plot3(xm1,ym1,zm1,'b. ');plot3(xm2,ym2,zm2,'r. ');
52 plot3(xm3,ym3,zm3,'m. ');plot3(xm4,ym4,zm4,'b. ');
53 plot3(xm5,ym5,zm5,'r. ');plot3(xm6,ym6,zm6,'m. ');
54 plot3(xm7,ym7,zm7,'b. ');plot3(xm8,ym8,zm8,'r. ');
55 plot3(xm9,ym9,zm9,'m. ');plot3(xm10,ym10,zm10,'b. ');
56 plot3(xm11,ym11,zm11,'r. ');plot3(xc,yc,zc,'k. ');
57 end

```

Listing A.4: Código para rotar y trasladar nube de puntos

```

1 function [xp,yp,zp,cgpp,tvsp,tvep]=rotar(x,y,z,cgp,tvs,tve,t,dx,dy
    ,dz)
2 vx=cgp(size(cgp,1),1);vy=cgp(size(cgp,1),2);vz=0;
3 ida=[1,0,0,0;0 1 0 0;0 0 1 0;-vx -vy -vz 1];
4 reg=[1,0,0,0;0 1 0 0;0 0 1 0;vx vy vz 1];
5 tr=[cosd(t),sind(t),0,0;-sind(t),cosd(t),0,0;0,0,1,0;0,0,0,1];
6 td=[1,0,0,0;0,1,0,0;0,0,1,0;dx,dy,dz,1];
7 for i=1:size(x,2)
8     rp=[x(i),y(i),z(i),1]*ida*tr*reg*td;
9     xp(i)=rp(1);
10    yp(i)=rp(2);
11    zp(i)=rp(3);
12 end
13    cgpp=[cgp(1),cgp(2),cgp(3),1]*ida*tr*reg*td;
14    tvsp=[tvs(1),tvs(2),tvs(3),1]*ida*tr*reg*td;
15    tvep=[tve(1),tve(2),tve(3),1]*ida*tr*reg*td;
16 end

```

Listing A.5: Códigos para generar nubes de puntos de las mesas

```

1 function [xm,ym,zm]=mesa1()
2 ct=1;
3 for x=40:260
4     for y=45:60
5         for z=1:9
6             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
7             ct=ct+1;
8         end
9     end
10 end
11 end
12 function [xm,ym,zm]=mesa2()
13 ct=1;

```

```

14 for x=40:135
15     for y=90:105
16         for z=1:9
17             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
18             ct=ct+1;
19         end
20     end
21 end
22 end
23 function [xm,ym,zm]=mesa3()
24 ct=1;
25 for x=165:260
26     for y=90:105
27         for z=1:9
28             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
29             ct=ct+1;
30         end
31     end
32 end
33 end
34 function [xm,ym,zm]=mesa4()
35 ct=1;
36 for x=40:260
37     for y=135:150
38         for z=1:9
39             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
40             ct=ct+1;
41         end
42     end
43 end
44 end
45 function [xm,ym,zm]=mesa5()
46 ct=1;
47 for x=40:135

```

```

48     for y=180:195
49         for z=1:9
50             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
51             ct=ct+1;
52         end
53     end
54 end
55 end
56 function [xm,ym,zm]=mesa6()
57 ct=1;
58 for x=165:260
59     for y=180:195
60         for z=1:9
61             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
62             ct=ct+1;
63         end
64     end
65 end
66 end
67 function [xm,ym,zm]=mesa7()
68 ct=1;
69 for x=40:260
70     for y=225:240
71         for z=1:9
72             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
73             ct=ct+1;
74         end
75     end
76 end
77 end
78 function [xm,ym,zm]=mesa8()
79 ct=1;
80 for x=0:125
81     for y=270:285

```

```

82         for z=1:9
83             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
84             ct=ct+1;
85         end
86     end
87 end
88 end
89 function [xm,ym,zm]=mesa9()
90 ct=1;
91 for x=175:300
92     for y=270:285
93         for z=1:9
94             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
95             ct=ct+1;
96         end
97     end
98 end
99 end
100 function [xm,ym,zm]=mesa10()
101 ct=1;
102 for x=0:125
103     for y=315:330
104         for z=1:10
105             xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;
106             ct=ct+1;
107         end
108     end
109 end
110 end
111 function [xm,ym,zm]=mesa11()
112 ct=1;
113 for x=175:300
114     for y=315:330
115         for z=1:9

```

```
116         xm(ct)=x;ym(ct)=y;zm(ct)=z;  
117         ct=ct+1;  
118     end  
119 end  
120 end  
121 end
```

Apéndice B

Gráficos de Rutas de Matlab

Las condiciones ideales se presentan cuando el centro de gravedad del *AGV* se ubica en su centroide geométrico, mientras que el error de posicionamiento se incrementa conforme el centro de gravedad del *AGV* se aleja de su centroide geométrico, como se ilustra en las Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6.

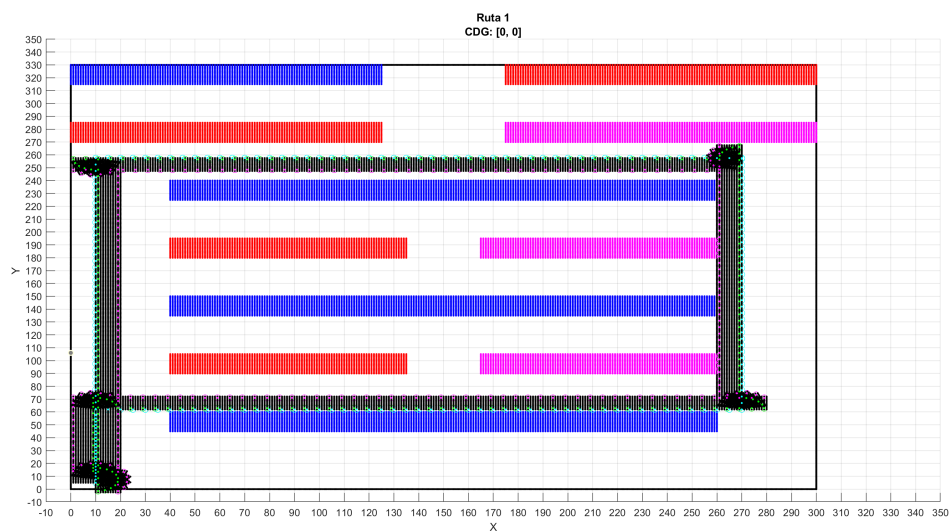


Figura B.1: Ruta número 1, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.

En la siguiente liga se encuentran todos los gráficos y archivos de registro de

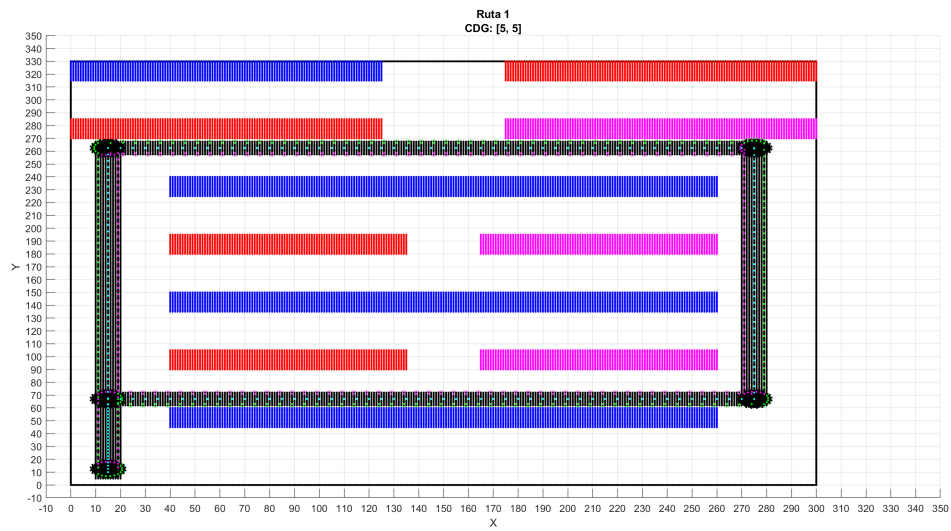


Figura B.2: Ruta número 1, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.

errores:

<https://drive.google.com/drive/folders/1g4-As15Na3LI370PgztAbHJnMn40XCTi?usp=sharing>

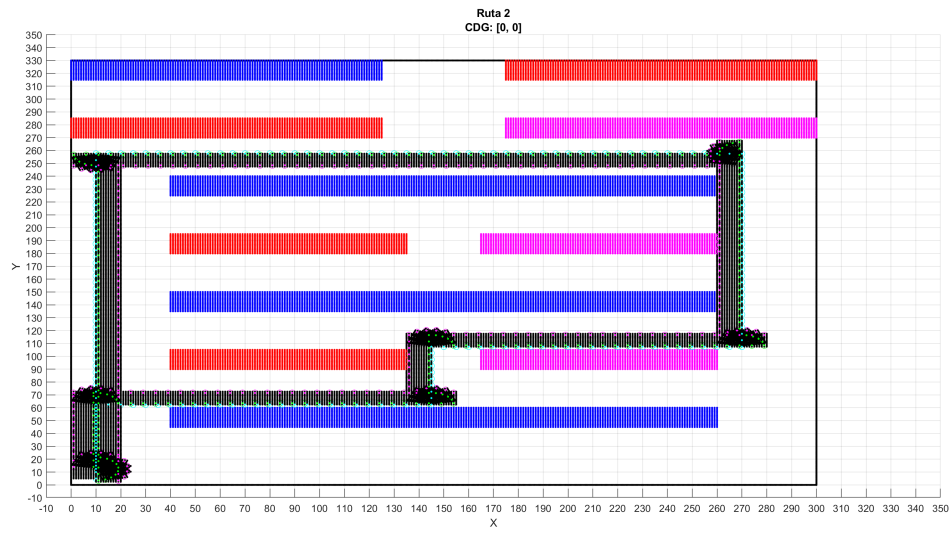


Figura B.3: Ruta número 2, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.

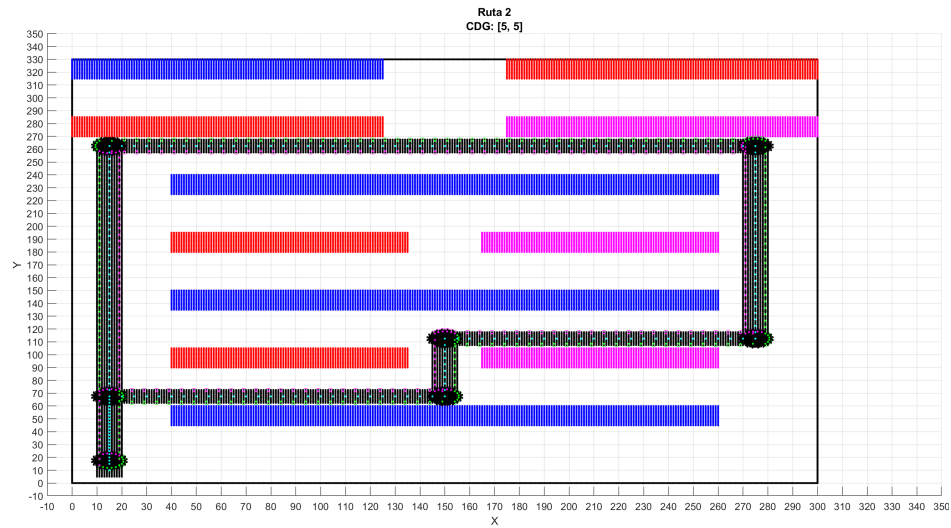


Figura B.4: Ruta número 2, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.

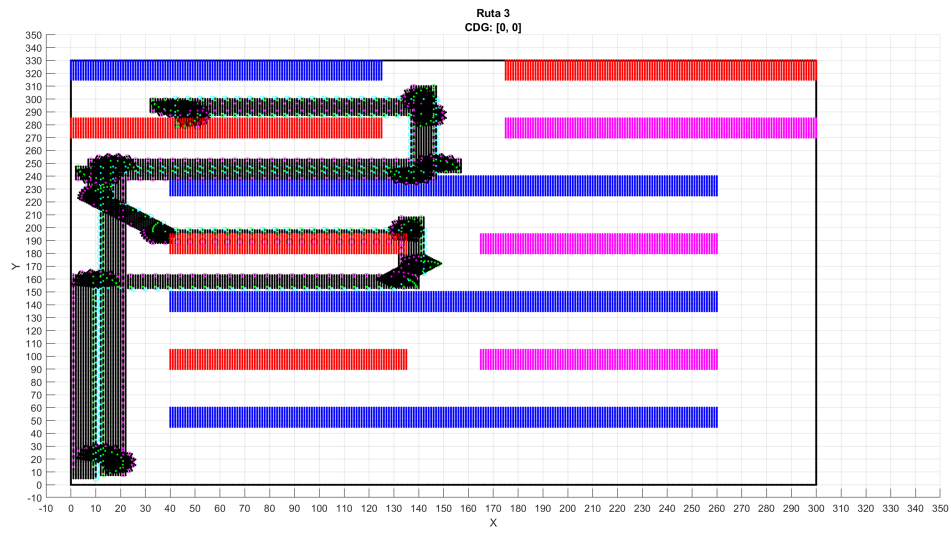


Figura B.5: Ruta número 3, el centro de gravedad se encuentra alejado del centroide geométrico.

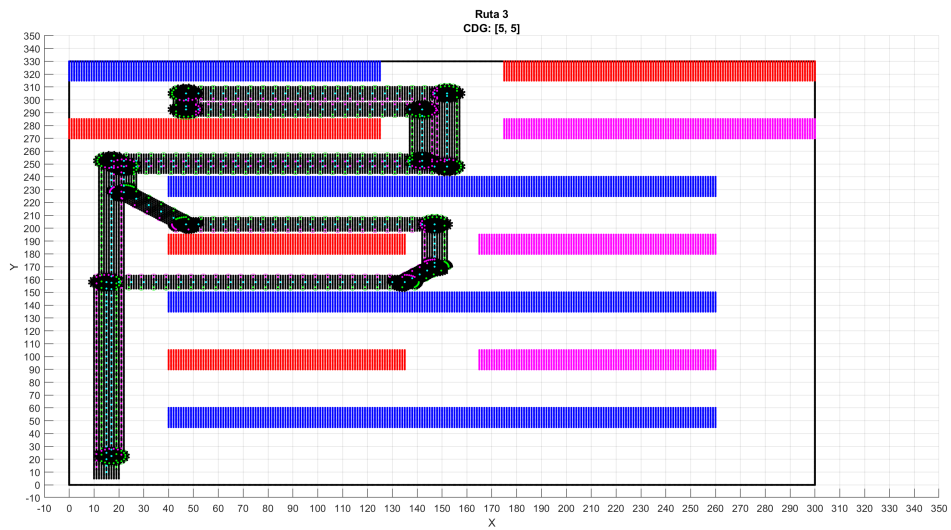


Figura B.6: Ruta número 3, el centro de gravedad se encuentra en el centroide geométrico.

Apéndice C

Resultado de Errores por Pasos

Listing C.1: Ruta 2, CDG: 3,6

```
1 R2 CDG: [3, 6]
2 Error AGV con ruta origen: 0.00
3 Error AGV con ruta origen: 3.16
4 Error AGV con ruta origen: 3.16
5 Error AGV con ruta origen: 3.16
6 Error AGV con ruta origen: 3.16
7 Error AGV con ruta origen: 3.16
8 Error AGV con ruta origen: 3.16
9 Error AGV con ruta origen: 3.16
10 Error AGV con ruta origen: 3.16
11 Error AGV con ruta origen: 3.16
12 Error AGV con ruta origen: 3.16
13 Error AGV con ruta origen: 3.16
14 Error AGV con ruta origen: 3.16
15 Error AGV con ruta origen: 3.16
16 Error AGV con ruta origen: 2.63
17 Error AGV con ruta origen: 2.03
18 Error AGV con ruta origen: 1.38
19 Error AGV con ruta origen: 0.70
20 Error AGV con ruta origen: 0.00
```

21	Error AGV con ruta origen: 0.00
22	Error AGV con ruta origen: 0.00
23	Error AGV con ruta origen: 0.00
24	Error AGV con ruta origen: 0.00
25	Error AGV con ruta origen: 0.00
26	Error AGV con ruta origen: 0.00
27	Error AGV con ruta origen: 0.00
28	Error AGV con ruta origen: 0.00
29	Error AGV con ruta origen: 0.00
30	Error AGV con ruta origen: 0.00
31	Error AGV con ruta origen: 0.00
32	Error AGV con ruta origen: 0.00
33	Error AGV con ruta origen: 0.00
34	Error AGV con ruta origen: 0.00
35	Error AGV con ruta origen: 0.00
36	Error AGV con ruta origen: 0.00
37	Error AGV con ruta origen: 0.00
38	Error AGV con ruta origen: 0.00
39	Error AGV con ruta origen: 0.00
40	Error AGV con ruta origen: 0.00
41	Error AGV con ruta origen: 0.00
42	Error AGV con ruta origen: 0.00
43	Error AGV con ruta origen: 0.00
44	Error AGV con ruta origen: 0.00
45	Error AGV con ruta origen: 0.00
46	Error AGV con ruta origen: 0.00
47	Error AGV con ruta origen: 0.00
48	Error AGV con ruta origen: 0.70
49	Error AGV con ruta origen: 1.38
50	Error AGV con ruta origen: 2.03
51	Error AGV con ruta origen: 2.63
52	Error AGV con ruta origen: 3.16
53	Error AGV con ruta origen: 3.16
54	Error AGV con ruta origen: 3.16

55	Error AGV con ruta origen: 3.16
56	Error AGV con ruta origen: 3.16
57	Error AGV con ruta origen: 3.16
58	Error AGV con ruta origen: 3.16
59	Error AGV con ruta origen: 3.16
60	Error AGV con ruta origen: 3.16
61	Error AGV con ruta origen: 3.16
62	Error AGV con ruta origen: 2.63
63	Error AGV con ruta origen: 2.03
64	Error AGV con ruta origen: 1.38
65	Error AGV con ruta origen: 0.70
66	Error AGV con ruta origen: 0.00
67	Error AGV con ruta origen: 0.00
68	Error AGV con ruta origen: 0.00
69	Error AGV con ruta origen: 0.00
70	Error AGV con ruta origen: 0.00
71	Error AGV con ruta origen: 0.00
72	Error AGV con ruta origen: 0.00
73	Error AGV con ruta origen: 0.00
74	Error AGV con ruta origen: 0.00
75	Error AGV con ruta origen: 0.00
76	Error AGV con ruta origen: 0.00
77	Error AGV con ruta origen: 0.00
78	Error AGV con ruta origen: 0.00
79	Error AGV con ruta origen: 0.00
80	Error AGV con ruta origen: 0.00
81	Error AGV con ruta origen: 0.00
82	Error AGV con ruta origen: 0.00
83	Error AGV con ruta origen: 0.00
84	Error AGV con ruta origen: 0.00
85	Error AGV con ruta origen: 0.00
86	Error AGV con ruta origen: 0.00
87	Error AGV con ruta origen: 0.00
88	Error AGV con ruta origen: 0.00

89	Error AGV con ruta origen: 0.00
90	Error AGV con ruta origen: 0.00
91	Error AGV con ruta origen: 0.00
92	Error AGV con ruta origen: 0.70
93	Error AGV con ruta origen: 1.38
94	Error AGV con ruta origen: 2.03
95	Error AGV con ruta origen: 2.63
96	Error AGV con ruta origen: 3.16
97	Error AGV con ruta origen: 3.16
98	Error AGV con ruta origen: 3.16
99	Error AGV con ruta origen: 3.16
100	Error AGV con ruta origen: 3.16
101	Error AGV con ruta origen: 3.16
102	Error AGV con ruta origen: 3.16
103	Error AGV con ruta origen: 3.16
104	Error AGV con ruta origen: 3.16
105	Error AGV con ruta origen: 3.16
106	Error AGV con ruta origen: 3.16
107	Error AGV con ruta origen: 3.16
108	Error AGV con ruta origen: 3.16
109	Error AGV con ruta origen: 3.16
110	Error AGV con ruta origen: 3.16
111	Error AGV con ruta origen: 3.16
112	Error AGV con ruta origen: 3.16
113	Error AGV con ruta origen: 3.16
114	Error AGV con ruta origen: 3.16
115	Error AGV con ruta origen: 3.16
116	Error AGV con ruta origen: 3.16
117	Error AGV con ruta origen: 3.16
118	Error AGV con ruta origen: 3.16
119	Error AGV con ruta origen: 3.16
120	Error AGV con ruta origen: 3.16
121	Error AGV con ruta origen: 3.16
122	Error AGV con ruta origen: 3.16

123	Error AGV con ruta origen: 3.16
124	Error AGV con ruta origen: 3.16
125	Error AGV con ruta origen: 3.16
126	choca mesa 9
127	Error AGV con ruta origen: 3.16
128	choca mesa 9
129	Error AGV con ruta origen: 3.62
130	choca mesa 9
131	Error AGV con ruta origen: 3.98
132	choca mesa 9
133	Error AGV con ruta origen: 4.25
134	choca mesa 9
135	Error AGV con ruta origen: 4.42
136	Error AGV con ruta origen: 4.47
137	Error AGV con ruta origen: 4.47
138	Error AGV con ruta origen: 4.47
139	Error AGV con ruta origen: 4.47
140	Error AGV con ruta origen: 4.47
141	Error AGV con ruta origen: 4.47
142	Error AGV con ruta origen: 4.47
143	Error AGV con ruta origen: 4.47
144	Error AGV con ruta origen: 4.47
145	Error AGV con ruta origen: 4.47
146	Error AGV con ruta origen: 4.47
147	Error AGV con ruta origen: 4.47
148	Error AGV con ruta origen: 4.47
149	Error AGV con ruta origen: 4.47
150	Error AGV con ruta origen: 4.47
151	Error AGV con ruta origen: 4.47
152	Error AGV con ruta origen: 4.47
153	Error AGV con ruta origen: 4.47
154	Error AGV con ruta origen: 4.47
155	Error AGV con ruta origen: 4.47
156	Error AGV con ruta origen: 4.47

157	Error AGV con ruta origen: 4.47
158	Error AGV con ruta origen: 4.47
159	Error AGV con ruta origen: 4.47
160	Error AGV con ruta origen: 4.47
161	Error AGV con ruta origen: 4.47
162	Error AGV con ruta origen: 4.47
163	Error AGV con ruta origen: 4.47
164	Error AGV con ruta origen: 4.47
165	Error AGV con ruta origen: 4.47
166	Error AGV con ruta origen: 4.47
167	Error AGV con ruta origen: 4.47
168	Error AGV con ruta origen: 4.47
169	Error AGV con ruta origen: 4.47
170	Error AGV con ruta origen: 4.47
171	Error AGV con ruta origen: 4.47
172	Error AGV con ruta origen: 4.47
173	Error AGV con ruta origen: 4.47
174	Error AGV con ruta origen: 4.47
175	Error AGV con ruta origen: 4.47
176	Error AGV con ruta origen: 4.47
177	Error AGV con ruta origen: 4.47
178	Error AGV con ruta origen: 4.47
179	Error AGV con ruta origen: 4.47
180	Error AGV con ruta origen: 4.47
181	Error AGV con ruta origen: 4.47
182	Error AGV con ruta origen: 4.47
183	Error AGV con ruta origen: 4.47
184	Error AGV con ruta origen: 4.47
185	Error AGV con ruta origen: 4.47
186	Error AGV con ruta origen: 4.47
187	Error AGV con ruta origen: 4.47
188	Error AGV con ruta origen: 4.47
189	choca mesa 8
190	Error AGV con ruta origen: 4.42

191	choca mesa 8
192	Error AGV con ruta origen: 4.25
193	Error AGV con ruta origen: 3.98
194	Error AGV con ruta origen: 3.62
195	Error AGV con ruta origen: 3.16
196	Error AGV con ruta origen: 3.16
197	Error AGV con ruta origen: 3.16
198	Error AGV con ruta origen: 3.16
199	Error AGV con ruta origen: 3.16
200	Error AGV con ruta origen: 3.16
201	Error AGV con ruta origen: 3.16
202	Error AGV con ruta origen: 3.16
203	Error AGV con ruta origen: 3.16
204	Error AGV con ruta origen: 3.16
205	Error AGV con ruta origen: 3.16
206	Error AGV con ruta origen: 3.16
207	Error AGV con ruta origen: 3.16
208	Error AGV con ruta origen: 3.16
209	Error AGV con ruta origen: 3.16
210	Error AGV con ruta origen: 3.16
211	Error AGV con ruta origen: 3.16
212	Error AGV con ruta origen: 3.16
213	Error AGV con ruta origen: 3.16
214	Error AGV con ruta origen: 3.16
215	Error AGV con ruta origen: 3.16
216	Error AGV con ruta origen: 3.16
217	Error AGV con ruta origen: 3.16
218	Error AGV con ruta origen: 3.16
219	Error AGV con ruta origen: 3.16
220	Error AGV con ruta origen: 3.16
221	Error AGV con ruta origen: 3.16
222	Error AGV con ruta origen: 3.16
223	Error AGV con ruta origen: 3.16
224	Error AGV con ruta origen: 3.16

```

225 Error AGV con ruta origen: 3.16
226 Error AGV con ruta origen: 3.16
227 Error AGV con ruta origen: 3.16
228 Error AGV con ruta origen: 3.16
229 Error AGV con ruta origen: 3.16
230 Error AGV con ruta origen: 3.16
231 Error AGV con ruta origen: 3.16
232 Error AGV con ruta origen: 3.16
233 Error AGV con ruta origen: 3.16
234 Error AGV con ruta origen: 3.16
235 Error AGV con ruta origen: 3.16
236 Error AGV con ruta origen: 3.16
237 Error AGV con ruta origen: 3.16
238 Error AGV con ruta origen: 3.16
239 Error AGV con ruta origen: 3.16
240 Error AGV con ruta origen: 3.16
241 Error AGV con ruta origen: 3.16
242 Error AGV con ruta origen: 3.16
243 Error AGV con ruta origen: 3.16
244 Error AGV con ruta origen: 3.16
245 Error AGV con ruta origen: 2.63
246 Error AGV con ruta origen: 2.03
247 Error AGV con ruta origen: 1.38
248 Error AGV con ruta origen: 0.70
249 Error AGV con ruta origen: 0.00
250 Error AGV con ruta origen: 0.70
251 Error AGV con ruta origen: 1.38
252 Error AGV con ruta origen: 2.03
253 Error AGV con ruta origen: 2.63
254
255 avgTvs =
256
257 2.6077

```

Listing C.2: Ruta 3, CDG: 5,5

```
1 R3 CDG: [5, 5]
2 Error AGV con ruta origen: 0.00
3 Error AGV con ruta origen: 0.00
4 Error AGV con ruta origen: 0.00
5 Error AGV con ruta origen: 0.00
6 Error AGV con ruta origen: 0.00
7 Error AGV con ruta origen: 0.00
8 Error AGV con ruta origen: 0.00
9 Error AGV con ruta origen: 0.00
10 Error AGV con ruta origen: 0.00
11 Error AGV con ruta origen: 0.00
12 Error AGV con ruta origen: 0.00
13 Error AGV con ruta origen: 0.00
14 Error AGV con ruta origen: 0.00
15 Error AGV con ruta origen: 0.00
16 Error AGV con ruta origen: 0.00
17 Error AGV con ruta origen: 0.00
18 Error AGV con ruta origen: 0.00
19 Error AGV con ruta origen: 0.00
20 Error AGV con ruta origen: 0.00
21 Error AGV con ruta origen: 0.00
22 Error AGV con ruta origen: 0.00
23 Error AGV con ruta origen: 0.00
24 Error AGV con ruta origen: 0.00
25 Error AGV con ruta origen: 0.00
26 Error AGV con ruta origen: 0.00
27 Error AGV con ruta origen: 0.00
28 Error AGV con ruta origen: 0.00
29 Error AGV con ruta origen: 0.00
30 Error AGV con ruta origen: 0.00
31 Error AGV con ruta origen: 0.00
32 Error AGV con ruta origen: 0.00
33 Error AGV con ruta origen: 0.00
```

34	Error AGV con ruta origen: 0.00
35	Error AGV con ruta origen: 0.00
36	Error AGV con ruta origen: 0.00
37	Error AGV con ruta origen: 0.00
38	Error AGV con ruta origen: 0.00
39	Error AGV con ruta origen: 0.00
40	Error AGV con ruta origen: 0.00
41	Error AGV con ruta origen: 0.00
42	Error AGV con ruta origen: 0.00
43	Error AGV con ruta origen: 0.00
44	Error AGV con ruta origen: 0.00
45	Error AGV con ruta origen: 0.00
46	Error AGV con ruta origen: 0.00
47	Error AGV con ruta origen: 0.00
48	Error AGV con ruta origen: 0.00
49	Error AGV con ruta origen: 0.00
50	Error AGV con ruta origen: 0.00
51	Error AGV con ruta origen: 0.00
52	Error AGV con ruta origen: 0.00
53	Error AGV con ruta origen: 0.00
54	Error AGV con ruta origen: 0.00
55	Error AGV con ruta origen: 0.00
56	Error AGV con ruta origen: 0.00
57	Error AGV con ruta origen: 0.00
58	Error AGV con ruta origen: 0.00
59	Error AGV con ruta origen: 0.00
60	Error AGV con ruta origen: 0.00
61	Error AGV con ruta origen: 0.00
62	Error AGV con ruta origen: 0.00
63	Error AGV con ruta origen: 0.00
64	Error AGV con ruta origen: 0.00
65	Error AGV con ruta origen: 0.00
66	Error AGV con ruta origen: 0.00
67	Error AGV con ruta origen: 0.00

68	Error AGV con ruta origen: 0.00
69	Error AGV con ruta origen: 0.00
70	Error AGV con ruta origen: 0.00
71	Error AGV con ruta origen: 0.00
72	Error AGV con ruta origen: 0.00
73	Error AGV con ruta origen: 0.00
74	Error AGV con ruta origen: 0.00
75	Error AGV con ruta origen: 0.00
76	Error AGV con ruta origen: 0.00
77	Error AGV con ruta origen: 0.00
78	Error AGV con ruta origen: 0.00
79	Error AGV con ruta origen: 0.00
80	Error AGV con ruta origen: 0.00
81	Error AGV con ruta origen: 0.00
82	Error AGV con ruta origen: 0.00
83	Error AGV con ruta origen: 0.00
84	Error AGV con ruta origen: 0.00
85	Error AGV con ruta origen: 0.00
86	Error AGV con ruta origen: 0.00
87	Error AGV con ruta origen: 0.00
88	Error AGV con ruta origen: 0.00
89	Error AGV con ruta origen: 0.00
90	Error AGV con ruta origen: 0.00
91	Error AGV con ruta origen: 0.00
92	Error AGV con ruta origen: 0.00
93	Error AGV con ruta origen: 0.00
94	Error AGV con ruta origen: 0.00
95	Error AGV con ruta origen: 0.00
96	Error AGV con ruta origen: 0.00
97	Error AGV con ruta origen: 0.00
98	Error AGV con ruta origen: 0.00
99	Error AGV con ruta origen: 0.00
100	Error AGV con ruta origen: 0.00
101	Error AGV con ruta origen: 0.00

102	Error AGV con ruta origen: 0.00
103	Error AGV con ruta origen: 0.00
104	Error AGV con ruta origen: 0.00
105	Error AGV con ruta origen: 0.00
106	Error AGV con ruta origen: 0.00
107	Error AGV con ruta origen: 0.00
108	Error AGV con ruta origen: 0.00
109	Error AGV con ruta origen: 0.00
110	Error AGV con ruta origen: 0.00
111	Error AGV con ruta origen: 0.00
112	Error AGV con ruta origen: 0.00
113	Error AGV con ruta origen: 0.00
114	Error AGV con ruta origen: 0.00
115	Error AGV con ruta origen: 0.00
116	Error AGV con ruta origen: 0.00
117	Error AGV con ruta origen: 0.00
118	Error AGV con ruta origen: 0.00
119	Error AGV con ruta origen: 0.00
120	Error AGV con ruta origen: 0.00
121	Error AGV con ruta origen: 0.00
122	Error AGV con ruta origen: 0.00
123	Error AGV con ruta origen: 0.00
124	Error AGV con ruta origen: 0.00
125	Error AGV con ruta origen: 0.00
126	Error AGV con ruta origen: 0.00
127	Error AGV con ruta origen: 0.00
128	Error AGV con ruta origen: 0.00
129	Error AGV con ruta origen: 0.00
130	Error AGV con ruta origen: 0.00
131	Error AGV con ruta origen: 0.00
132	Error AGV con ruta origen: 0.00
133	Error AGV con ruta origen: 0.00
134	Error AGV con ruta origen: 0.00
135	Error AGV con ruta origen: 0.00

136	Error AGV con ruta origen: 0.00
137	Error AGV con ruta origen: 0.00
138	Error AGV con ruta origen: 0.00
139	Error AGV con ruta origen: 0.00
140	Error AGV con ruta origen: 0.00
141	Error AGV con ruta origen: 0.00
142	Error AGV con ruta origen: 0.00
143	Error AGV con ruta origen: 0.00
144	Error AGV con ruta origen: 0.00
145	Error AGV con ruta origen: 0.00
146	Error AGV con ruta origen: 0.00
147	Error AGV con ruta origen: 0.00
148	Error AGV con ruta origen: 0.00
149	Error AGV con ruta origen: 0.00
150	Error AGV con ruta origen: 0.00
151	Error AGV con ruta origen: 0.00
152	Error AGV con ruta origen: 0.00
153	Error AGV con ruta origen: 0.00
154	Error AGV con ruta origen: 0.00
155	Error AGV con ruta origen: 0.00
156	Error AGV con ruta origen: 0.00
157	Error AGV con ruta origen: 0.00
158	Error AGV con ruta origen: 0.00
159	Error AGV con ruta origen: 0.00
160	Error AGV con ruta origen: 0.00
161	Error AGV con ruta origen: 0.00
162	Error AGV con ruta origen: 0.00
163	Error AGV con ruta origen: 0.00
164	Error AGV con ruta origen: 0.00
165	Error AGV con ruta origen: 0.00
166	Error AGV con ruta origen: 0.00
167	Error AGV con ruta origen: 0.00
168	Error AGV con ruta origen: 0.00
169	Error AGV con ruta origen: 0.00

170	Error AGV con ruta origen: 0.00
171	Error AGV con ruta origen: 0.00
172	Error AGV con ruta origen: 0.00
173	Error AGV con ruta origen: 0.00
174	Error AGV con ruta origen: 0.00
175	Error AGV con ruta origen: 0.00
176	Error AGV con ruta origen: 0.00
177	Error AGV con ruta origen: 0.00
178	Error AGV con ruta origen: 0.00
179	Error AGV con ruta origen: 0.00
180	Error AGV con ruta origen: 0.00
181	Error AGV con ruta origen: 0.00
182	Error AGV con ruta origen: 0.00
183	Error AGV con ruta origen: 0.00
184	Error AGV con ruta origen: 0.00
185	Error AGV con ruta origen: 0.00
186	Error AGV con ruta origen: 0.00
187	Error AGV con ruta origen: 0.00
188	Error AGV con ruta origen: 0.00
189	Error AGV con ruta origen: 0.00
190	Error AGV con ruta origen: 0.00
191	Error AGV con ruta origen: 0.00
192	Error AGV con ruta origen: 0.00
193	Error AGV con ruta origen: 0.00
194	Error AGV con ruta origen: 0.00
195	Error AGV con ruta origen: 0.00
196	Error AGV con ruta origen: 0.00
197	Error AGV con ruta origen: 0.00
198	Error AGV con ruta origen: 0.00
199	Error AGV con ruta origen: 0.00
200	Error AGV con ruta origen: 0.00
201	Error AGV con ruta origen: 0.00
202	Error AGV con ruta origen: 0.00
203	Error AGV con ruta origen: 0.00

204	Error AGV con ruta origen: 0.00
205	Error AGV con ruta origen: 0.00
206	Error AGV con ruta origen: 0.00
207	Error AGV con ruta origen: 0.00
208	Error AGV con ruta origen: 0.00
209	Error AGV con ruta origen: 0.00
210	Error AGV con ruta origen: 0.00
211	Error AGV con ruta origen: 0.00
212	Error AGV con ruta origen: 0.00
213	Error AGV con ruta origen: 0.00
214	Error AGV con ruta origen: 0.00
215	Error AGV con ruta origen: 0.00
216	Error AGV con ruta origen: 0.00
217	Error AGV con ruta origen: 0.00
218	Error AGV con ruta origen: 0.00
219	Error AGV con ruta origen: 0.00
220	Error AGV con ruta origen: 0.00
221	Error AGV con ruta origen: 0.00
222	Error AGV con ruta origen: 0.00
223	Error AGV con ruta origen: 0.00
224	Error AGV con ruta origen: 0.00
225	Error AGV con ruta origen: 0.00
226	Error AGV con ruta origen: 0.00
227	Error AGV con ruta origen: 0.00
228	Error AGV con ruta origen: 0.00
229	Error AGV con ruta origen: 0.00
230	Error AGV con ruta origen: 0.00
231	Error AGV con ruta origen: 0.00
232	Error AGV con ruta origen: 0.00
233	Error AGV con ruta origen: 0.00
234	Error AGV con ruta origen: 0.00
235	Error AGV con ruta origen: 0.00
236	Error AGV con ruta origen: 0.00
237	Error AGV con ruta origen: 0.00

238	Error AGV con ruta origen: 0.00
239	Error AGV con ruta origen: 0.00
240	Error AGV con ruta origen: 0.00
241	Error AGV con ruta origen: 0.00
242	Error AGV con ruta origen: 0.00
243	Error AGV con ruta origen: 0.00
244	Error AGV con ruta origen: 0.00
245	Error AGV con ruta origen: 0.00
246	Error AGV con ruta origen: 0.00
247	Error AGV con ruta origen: 0.00
248	Error AGV con ruta origen: 0.00
249	Error AGV con ruta origen: 0.00
250	Error AGV con ruta origen: 0.00
251	Error AGV con ruta origen: 0.00
252	Error AGV con ruta origen: 0.00
253	Error AGV con ruta origen: 0.00
254	Error AGV con ruta origen: 0.00
255	Error AGV con ruta origen: 0.00
256	Error AGV con ruta origen: 0.00
257	Error AGV con ruta origen: 0.00
258	Error AGV con ruta origen: 0.00
259	Error AGV con ruta origen: 0.00
260	Error AGV con ruta origen: 0.00
261	Error AGV con ruta origen: 0.00
262	Error AGV con ruta origen: 0.00
263	Error AGV con ruta origen: 0.00
264	Error AGV con ruta origen: 0.00
265	Error AGV con ruta origen: 0.00
266	Error AGV con ruta origen: 0.00
267	Error AGV con ruta origen: 0.00
268	Error AGV con ruta origen: 0.00
269	Error AGV con ruta origen: 0.00
270	Error AGV con ruta origen: 0.00
271	Error AGV con ruta origen: 0.00

272	Error AGV con ruta origen: 0.00
273	Error AGV con ruta origen: 0.00
274	Error AGV con ruta origen: 0.00
275	Error AGV con ruta origen: 0.00
276	Error AGV con ruta origen: 0.00
277	Error AGV con ruta origen: 0.00
278	Error AGV con ruta origen: 0.00
279	Error AGV con ruta origen: 0.00
280	Error AGV con ruta origen: 0.00
281	Error AGV con ruta origen: 0.00
282	Error AGV con ruta origen: 0.00
283	Error AGV con ruta origen: 0.00
284	Error AGV con ruta origen: 0.00
285	Error AGV con ruta origen: 0.00
286	Error AGV con ruta origen: 0.00
287	Error AGV con ruta origen: 0.00
288	Error AGV con ruta origen: 0.00
289	Error AGV con ruta origen: 0.00
290	Error AGV con ruta origen: 0.00
291	Error AGV con ruta origen: 0.00
292	Error AGV con ruta origen: 0.00
293	Error AGV con ruta origen: 0.00
294	Error AGV con ruta origen: 0.00
295	Error AGV con ruta origen: 0.00
296	Error AGV con ruta origen: 0.00
297	Error AGV con ruta origen: 0.00
298	Error AGV con ruta origen: 0.00
299	Error AGV con ruta origen: 0.00
300	Error AGV con ruta origen: 0.00
301	Error AGV con ruta origen: 0.00
302	Error AGV con ruta origen: 0.00
303	Error AGV con ruta origen: 0.00
304	Error AGV con ruta origen: 0.00
305	Error AGV con ruta origen: 0.00

```
306 Error AGV con ruta origen: 0.00
307 Error AGV con ruta origen: 0.00
308 Error AGV con ruta origen: 0.00
309 Error AGV con ruta origen: 0.00
310 Error AGV con ruta origen: 0.00
311 Error AGV con ruta origen: 0.00
312 Error AGV con ruta origen: 0.00
313 Error AGV con ruta origen: 0.00
314 Error AGV con ruta origen: 0.00
315 Error AGV con ruta origen: 0.00
316 Error AGV con ruta origen: 0.00
317 Error AGV con ruta origen: 0.00
318 Error AGV con ruta origen: 0.00
319 Error AGV con ruta origen: 0.00
320 Error AGV con ruta origen: 0.00
321 Error AGV con ruta origen: 0.00
322 Error AGV con ruta origen: 0.00
323 Error AGV con ruta origen: 0.00
324 Error AGV con ruta origen: 0.00
325 Error AGV con ruta origen: 0.00
326 Error AGV con ruta origen: 0.00
327 Error AGV con ruta origen: 0.00
328 Error AGV con ruta origen: 0.00
329 Error AGV con ruta origen: 0.00
330 Error AGV con ruta origen: 0.00
331 Error AGV con ruta origen: 0.00
332 Error AGV con ruta origen: 0.00
333 Error AGV con ruta origen: 0.00
334 Error AGV con ruta origen: 0.00
335 Error AGV con ruta origen: 0.00
336 Error AGV con ruta origen: 0.00
337 Error AGV con ruta origen: 0.00
338
339 avgTvs =
```

340

341

0

Listing C.3: Ruta 3, CDG: 7,6

```
1 R3 CDG: [7, 6]
2 Error AGV con ruta origen: 0.00
3 Error AGV con ruta origen: 3.16
4 Error AGV con ruta origen: 3.16
5 Error AGV con ruta origen: 3.16
6 Error AGV con ruta origen: 3.16
7 Error AGV con ruta origen: 3.16
8 Error AGV con ruta origen: 3.16
9 Error AGV con ruta origen: 3.16
10 Error AGV con ruta origen: 3.16
11 Error AGV con ruta origen: 3.16
12 Error AGV con ruta origen: 3.16
13 Error AGV con ruta origen: 3.16
14 Error AGV con ruta origen: 3.16
15 Error AGV con ruta origen: 3.16
16 Error AGV con ruta origen: 3.16
17 Error AGV con ruta origen: 3.16
18 Error AGV con ruta origen: 3.16
19 Error AGV con ruta origen: 3.16
20 Error AGV con ruta origen: 3.16
21 Error AGV con ruta origen: 3.16
22 Error AGV con ruta origen: 3.16
23 Error AGV con ruta origen: 3.16
24 Error AGV con ruta origen: 3.16
25 Error AGV con ruta origen: 3.16
26 Error AGV con ruta origen: 3.16
27 Error AGV con ruta origen: 3.16
28 Error AGV con ruta origen: 3.16
29 Error AGV con ruta origen: 3.16
30 Error AGV con ruta origen: 3.16
```

31	Error AGV con ruta origen: 3.16
32	Error AGV con ruta origen: 3.16
33	Error AGV con ruta origen: 3.16
34	Error AGV con ruta origen: 2.63
35	Error AGV con ruta origen: 2.03
36	Error AGV con ruta origen: 1.38
37	Error AGV con ruta origen: 0.70
38	Error AGV con ruta origen: 0.00
39	Error AGV con ruta origen: 0.00
40	Error AGV con ruta origen: 0.00
41	Error AGV con ruta origen: 0.00
42	Error AGV con ruta origen: 0.00
43	Error AGV con ruta origen: 0.00
44	Error AGV con ruta origen: 0.00
45	Error AGV con ruta origen: 0.00
46	Error AGV con ruta origen: 0.00
47	Error AGV con ruta origen: 0.00
48	Error AGV con ruta origen: 0.00
49	Error AGV con ruta origen: 0.00
50	Error AGV con ruta origen: 0.00
51	Error AGV con ruta origen: 0.00
52	Error AGV con ruta origen: 0.00
53	Error AGV con ruta origen: 0.00
54	Error AGV con ruta origen: 0.00
55	Error AGV con ruta origen: 0.00
56	Error AGV con ruta origen: 0.00
57	Error AGV con ruta origen: 0.00
58	Error AGV con ruta origen: 0.00
59	Error AGV con ruta origen: 0.00
60	Error AGV con ruta origen: 0.00
61	Error AGV con ruta origen: 0.00
62	Error AGV con ruta origen: 0.00
63	Error AGV con ruta origen: 0.35
64	Error AGV con ruta origen: 0.70

65	Error AGV con ruta origen: 1.04
66	Error AGV con ruta origen: 1.38
67	choca mesa 4
68	Error AGV con ruta origen: 1.71
69	Error AGV con ruta origen: 1.71
70	Error AGV con ruta origen: 1.71
71	Error AGV con ruta origen: 1.71
72	Error AGV con ruta origen: 1.71
73	Error AGV con ruta origen: 2.03
74	Error AGV con ruta origen: 2.34
75	Error AGV con ruta origen: 2.63
76	Error AGV con ruta origen: 2.90
77	Error AGV con ruta origen: 3.16
78	Error AGV con ruta origen: 3.16
79	Error AGV con ruta origen: 3.16
80	Error AGV con ruta origen: 3.16
81	Error AGV con ruta origen: 3.16
82	Error AGV con ruta origen: 3.16
83	Error AGV con ruta origen: 3.16
84	Error AGV con ruta origen: 3.16
85	Error AGV con ruta origen: 3.62
86	Error AGV con ruta origen: 3.98
87	Error AGV con ruta origen: 4.25
88	Error AGV con ruta origen: 4.42
89	Error AGV con ruta origen: 4.47
90	Error AGV con ruta origen: 4.47
91	Error AGV con ruta origen: 4.47
92	Error AGV con ruta origen: 4.47
93	Error AGV con ruta origen: 4.47
94	Error AGV con ruta origen: 4.47
95	Error AGV con ruta origen: 4.47
96	Error AGV con ruta origen: 4.47
97	Error AGV con ruta origen: 4.47
98	Error AGV con ruta origen: 4.47

99	Error AGV con ruta origen: 4.47
100	Error AGV con ruta origen: 4.47
101	Error AGV con ruta origen: 4.47
102	Error AGV con ruta origen: 4.47
103	Error AGV con ruta origen: 4.47
104	Error AGV con ruta origen: 4.47
105	Error AGV con ruta origen: 4.47
106	Error AGV con ruta origen: 4.47
107	Error AGV con ruta origen: 4.47
108	Error AGV con ruta origen: 4.47
109	Error AGV con ruta origen: 4.47
110	Error AGV con ruta origen: 4.46
111	Error AGV con ruta origen: 4.42
112	Error AGV con ruta origen: 4.35
113	Error AGV con ruta origen: 4.25
114	Error AGV con ruta origen: 4.13
115	Error AGV con ruta origen: 4.13
116	Error AGV con ruta origen: 4.13
117	choca mesa 7
118	Error AGV con ruta origen: 4.13
119	Error AGV con ruta origen: 4.13
120	Error AGV con ruta origen: 4.13
121	Error AGV con ruta origen: 3.98
122	Error AGV con ruta origen: 3.81
123	Error AGV con ruta origen: 3.62
124	Error AGV con ruta origen: 3.40
125	Error AGV con ruta origen: 3.16
126	Error AGV con ruta origen: 3.16
127	Error AGV con ruta origen: 3.16
128	Error AGV con ruta origen: 3.16
129	Error AGV con ruta origen: 3.16
130	Error AGV con ruta origen: 2.63
131	Error AGV con ruta origen: 2.03
132	Error AGV con ruta origen: 1.38

133	Error AGV con ruta origen: 0.70
134	Error AGV con ruta origen: 0.00
135	Error AGV con ruta origen: 0.00
136	Error AGV con ruta origen: 0.00
137	Error AGV con ruta origen: 0.00
138	Error AGV con ruta origen: 0.00
139	Error AGV con ruta origen: 0.00
140	Error AGV con ruta origen: 0.00
141	Error AGV con ruta origen: 0.00
142	Error AGV con ruta origen: 0.00
143	Error AGV con ruta origen: 0.00
144	Error AGV con ruta origen: 0.00
145	Error AGV con ruta origen: 0.00
146	Error AGV con ruta origen: 0.00
147	Error AGV con ruta origen: 0.00
148	Error AGV con ruta origen: 0.00
149	Error AGV con ruta origen: 0.00
150	Error AGV con ruta origen: 0.00
151	Error AGV con ruta origen: 0.00
152	Error AGV con ruta origen: 0.00
153	Error AGV con ruta origen: 0.00
154	Error AGV con ruta origen: 0.00
155	Error AGV con ruta origen: 0.00
156	Error AGV con ruta origen: 0.00
157	Error AGV con ruta origen: 0.00
158	Error AGV con ruta origen: 0.00
159	Error AGV con ruta origen: 0.00
160	Error AGV con ruta origen: 0.00
161	Error AGV con ruta origen: 0.70
162	Error AGV con ruta origen: 1.38
163	choca mesa 7
164	Error AGV con ruta origen: 2.03
165	Error AGV con ruta origen: 2.63
166	Error AGV con ruta origen: 3.16

167	Error AGV con ruta origen: 3.16
168	Error AGV con ruta origen: 3.16
169	Error AGV con ruta origen: 3.16
170	Error AGV con ruta origen: 3.16
171	Error AGV con ruta origen: 3.16
172	Error AGV con ruta origen: 3.16
173	Error AGV con ruta origen: 3.16
174	Error AGV con ruta origen: 3.16
175	Error AGV con ruta origen: 3.16
176	Error AGV con ruta origen: 3.16
177	Error AGV con ruta origen: 3.16
178	Error AGV con ruta origen: 3.16
179	Error AGV con ruta origen: 3.62
180	Error AGV con ruta origen: 3.98
181	Error AGV con ruta origen: 4.25
182	Error AGV con ruta origen: 4.42
183	Error AGV con ruta origen: 4.47
184	Error AGV con ruta origen: 4.47
185	Error AGV con ruta origen: 4.47
186	Error AGV con ruta origen: 4.47
187	Error AGV con ruta origen: 4.47
188	Error AGV con ruta origen: 4.47
189	Error AGV con ruta origen: 4.47
190	Error AGV con ruta origen: 4.47
191	Error AGV con ruta origen: 4.47
192	Error AGV con ruta origen: 4.47
193	Error AGV con ruta origen: 4.47
194	Error AGV con ruta origen: 4.47
195	Error AGV con ruta origen: 4.47
196	Error AGV con ruta origen: 4.47
197	Error AGV con ruta origen: 4.47
198	Error AGV con ruta origen: 4.47
199	Error AGV con ruta origen: 4.47
200	Error AGV con ruta origen: 4.47

201	Error AGV con ruta origen: 4.47
202	Error AGV con ruta origen: 4.47
203	Error AGV con ruta origen: 4.47
204	Error AGV con ruta origen: 4.47
205	Error AGV con ruta origen: 4.42
206	Error AGV con ruta origen: 4.25
207	choca mesa 10
208	Error AGV con ruta origen: 3.98
209	Error AGV con ruta origen: 3.62
210	Error AGV con ruta origen: 3.16
211	Error AGV con ruta origen: 3.16
212	Error AGV con ruta origen: 3.16
213	Error AGV con ruta origen: 3.16
214	Error AGV con ruta origen: 2.63
215	Error AGV con ruta origen: 2.03
216	Error AGV con ruta origen: 1.38
217	Error AGV con ruta origen: 0.70
218	Error AGV con ruta origen: 0.00
219	Error AGV con ruta origen: 0.00
220	Error AGV con ruta origen: 0.00
221	Error AGV con ruta origen: 0.00
222	Error AGV con ruta origen: 0.00
223	Error AGV con ruta origen: 0.00
224	Error AGV con ruta origen: 0.00
225	Error AGV con ruta origen: 0.00
226	Error AGV con ruta origen: 0.00
227	Error AGV con ruta origen: 0.00
228	Error AGV con ruta origen: 0.00
229	Error AGV con ruta origen: 0.00
230	Error AGV con ruta origen: 0.00
231	Error AGV con ruta origen: 0.00
232	Error AGV con ruta origen: 0.00
233	Error AGV con ruta origen: 0.00
234	Error AGV con ruta origen: 0.00

235	Error AGV con ruta origen: 0.00
236	Error AGV con ruta origen: 0.00
237	Error AGV con ruta origen: 0.00
238	Error AGV con ruta origen: 0.70
239	Error AGV con ruta origen: 1.38
240	Error AGV con ruta origen: 2.03
241	Error AGV con ruta origen: 2.63
242	Error AGV con ruta origen: 3.16
243	Error AGV con ruta origen: 3.16
244	Error AGV con ruta origen: 3.16
245	Error AGV con ruta origen: 3.16
246	Error AGV con ruta origen: 3.16
247	Error AGV con ruta origen: 3.16
248	Error AGV con ruta origen: 3.16
249	Error AGV con ruta origen: 3.16
250	Error AGV con ruta origen: 3.16
251	Error AGV con ruta origen: 3.62
252	Error AGV con ruta origen: 3.98
253	Error AGV con ruta origen: 4.25
254	Error AGV con ruta origen: 4.42
255	Error AGV con ruta origen: 4.47
256	Error AGV con ruta origen: 4.47
257	Error AGV con ruta origen: 4.47
258	Error AGV con ruta origen: 4.47
259	Error AGV con ruta origen: 4.47
260	Error AGV con ruta origen: 4.47
261	Error AGV con ruta origen: 4.47
262	Error AGV con ruta origen: 4.47
263	Error AGV con ruta origen: 4.47
264	Error AGV con ruta origen: 4.47
265	Error AGV con ruta origen: 4.47
266	Error AGV con ruta origen: 4.47
267	Error AGV con ruta origen: 4.47
268	Error AGV con ruta origen: 4.47

269	Error AGV con ruta origen: 4.47
270	Error AGV con ruta origen: 4.47
271	Error AGV con ruta origen: 4.47
272	Error AGV con ruta origen: 4.47
273	Error AGV con ruta origen: 4.47
274	Error AGV con ruta origen: 4.47
275	Error AGV con ruta origen: 4.47
276	Error AGV con ruta origen: 4.47
277	Error AGV con ruta origen: 4.47
278	Error AGV con ruta origen: 4.47
279	Error AGV con ruta origen: 4.47
280	Error AGV con ruta origen: 4.47
281	Error AGV con ruta origen: 4.42
282	Error AGV con ruta origen: 4.25
283	Error AGV con ruta origen: 3.98
284	Error AGV con ruta origen: 3.62
285	Error AGV con ruta origen: 3.16
286	Error AGV con ruta origen: 3.16
287	Error AGV con ruta origen: 3.16
288	Error AGV con ruta origen: 3.16
289	Error AGV con ruta origen: 3.16
290	Error AGV con ruta origen: 3.16
291	Error AGV con ruta origen: 3.16
292	Error AGV con ruta origen: 3.16
293	Error AGV con ruta origen: 3.16
294	Error AGV con ruta origen: 3.16
295	Error AGV con ruta origen: 3.16
296	Error AGV con ruta origen: 3.16
297	Error AGV con ruta origen: 3.16
298	Error AGV con ruta origen: 3.16
299	Error AGV con ruta origen: 3.16
300	Error AGV con ruta origen: 3.16
301	Error AGV con ruta origen: 3.16
302	Error AGV con ruta origen: 3.16

303	Error AGV con ruta origen: 3.16
304	Error AGV con ruta origen: 3.16
305	Error AGV con ruta origen: 3.16
306	Error AGV con ruta origen: 3.16
307	Error AGV con ruta origen: 3.16
308	Error AGV con ruta origen: 3.16
309	Error AGV con ruta origen: 3.16
310	Error AGV con ruta origen: 3.16
311	Error AGV con ruta origen: 3.16
312	Error AGV con ruta origen: 3.16
313	Error AGV con ruta origen: 3.16
314	Error AGV con ruta origen: 3.16
315	Error AGV con ruta origen: 3.16
316	Error AGV con ruta origen: 3.16
317	Error AGV con ruta origen: 3.16
318	Error AGV con ruta origen: 3.16
319	Error AGV con ruta origen: 3.16
320	Error AGV con ruta origen: 3.16
321	Error AGV con ruta origen: 3.16
322	Error AGV con ruta origen: 3.16
323	Error AGV con ruta origen: 3.16
324	Error AGV con ruta origen: 3.16
325	Error AGV con ruta origen: 3.16
326	Error AGV con ruta origen: 3.16
327	Error AGV con ruta origen: 3.16
328	Error AGV con ruta origen: 3.16
329	Error AGV con ruta origen: 3.16
330	Error AGV con ruta origen: 3.16
331	Error AGV con ruta origen: 3.16
332	Error AGV con ruta origen: 2.63
333	Error AGV con ruta origen: 2.03
334	Error AGV con ruta origen: 1.38
335	Error AGV con ruta origen: 0.70
336	Error AGV con ruta origen: 0.00

```
337 Error AGV con ruta origen: 0.70
338 Error AGV con ruta origen: 1.38
339 Error AGV con ruta origen: 2.03
340 Error AGV con ruta origen: 2.63
341 Error AGV con ruta origen: 3.16
342
343 avgTvs =
344
345     2.6467
```

Bibliografía

- [1] Dmitry Ivanov, Alexander Tsipoulanidis, and Jörn Schönberger. *Global Supply Chain and Operations Management*. Springer Texts in Business and Economics, 2019.
- [2] Lothar Schulze and Alexander Wullner. The Approach of Automated Guided Vehicle Systems. *IEEE*, pages 522–527, 2006.
- [3] Stefan Buhrs Lothar Schulze, Sebastian Behling. Automated Guided Vehicle Systems: a Driver for Increased Business Performance. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2, 2008.
- [4] M. De Ryck, M. Versteyhe, and F. Debrouwere. Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. *Journal of Manufacturing Systems*, 54(December 2019):152–173, 2020.
- [5] John Faber Archila and Marcelo Becker. Mathematical models and design of an AGV (Automated Guided Vehicle). *Proceedings of the 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2013*, pages 1857–1862, 2013.
- [6] Con Cronin, Andrew Conway, and Joseph Walsh. State-of-the-art review of autonomous intelligent vehicles (AIV) technologies for the automotive and manufacturing industry. *30th Irish Signals and Systems Conference, ISSC 2019*, pages 1–6, 2019.

- [7] MakoGomez90. AGV transportando carro, 2016.
- [8] Günter Ullrich. *The History of Automated Guided Vehicle Systems*, pages 1–14. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [9] D. Herrero-Perez H. Martinez-Barbera. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments. *EL Sevier - Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26:296–311, 2010.
- [10] Victor Hugo Mosquera Leyton. Control backstepping de un robot scara con incertidumbre paramétrica a backstepping control for scara robot based on parametric uncertainty. *CIENCIA E INGENIERÍA NEOGRANADINA*, 22:107–122, 2012.
- [11] Luis C Básaca-preciado, Oleg Yu, Julio C Rodríguez-quinonez, Xochitl García, Vera V Tyrsa, Moises Rivas-lopez, Daniel Hernandez-balbuena, Paolo Mercorelli, Mikhail Podrygalo, Alexander Gurko, and Irina Tabakova. Optical 3D laser measurement system for navigation of autonomous mobile robot. *Optics and Lasers in Engineering*, 54:159–169, 2014.
- [12] T. Stock and G. Seliger. Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40(Icc):536–541, 2016.
- [13] Carla Gonçalves Machado, Mats Peter Winroth, and Elias Hans Dener Ribeiro da Silva. Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5):1462–1484, 2020.
- [14] Morandin Junior and Dos Rei. Sensors Applied to Automated Guided Vehicles Position Control: A Systematic Review. *IEEE Sensors*, 2020.
- [15] Liam Lynch, Thomas Newe, John Clifford, Joseph Coleman, Joseph Walsh, and Daniel Toal. Automated Ground Vehicle (AGV) and Sensor

- Technologies- A Review. *International Conference on Sensing Technology (ICST)*, 12:347–352), 2018.
- [16] Ioan Doroftei, Victor Grosu, and Veaceslav Spinu. Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation. *Bioinspiration and Robotics Walking and Climbing Robots*, 2007.
- [17] Ankit Gupta, Rohan Divekar, and Mohit Agrawal. Autonomous Parallel Parking System for Ackerman steering four wheelers. *IEEE*, 2010.
- [18] Maja J. Mataric. Behaviour-based control: Examples from navigation, learning, and group behaviour. *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 9(2-3):323–336, 1997.
- [19] R Alami, R Chatila, S Fleury, M Ghallab, and F Ingrand. An Architecture for Autonomy 1 Introduction. *International Journal Of Robotics Research*, 21(2):1–38, 1998.
- [20] Maja J. Mataric. *The Robotics Primer*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 2007.
- [21] CLARENCE W. DE SILVA. *SENSORS AND ACTUATORS. ENGINEERING SYSTEM INSTRUMENTATION*. CRC PRESS, 2nd edition, 2016.
- [22] Ata Jahangir Moshayedi, Jinsong Li, and Liefu Liao. AGV (automated guided vehicle) robot : Mission and obstacles in design and performance. *Journal of Simulation and Analysis of Novel Technologies in Mechanical Engineering*, 12(4):5–18, 2019.
- [23] Thomas R Kurfess. *ROBOTICS AND AUTOMATION HANDBOOK*. CRC PRESS, 2005.
- [24] elosciloscopio.com. Sensor de distancia ultrasónico HC-SR04 .

- [25] Prof Marcelo Wendling. Sensores. Technical report, Universidade Estadual Paulista, 2010.
- [26] R S Popovic, Z Randjelovic, and D Manic. Integrated Hall-effect magnetic sensors. *El Sevier*, 91:46–50, 2001.
- [27] RoboTeq. Magnetic Guide Sensors.
- [28] Zhi Song, Xinyu Wu, Tiantian Xu, Jianquan Sun, Qinshi Gao, and Yong He. A new method of AGV navigation based on Kalman Filter and a magnetic nail localization. *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2016.
- [29] S. Kamewaka and S. Ueamura. A MAGNETIC GUIDANCE ETHOD FOR AUTOMATED GUIDED VEHICLES. *Ieee transactions on magnetics*, MAG-23(5), 1987.
- [30] RoboTeq. Sensor magnético guía.
- [31] RoboTeq. Magnetic Guide Sensors.
- [32] Sok Yong Lee and Hai Won Yang. Navigation of automated guided vehicles using magnet spot guidance method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28(3):425–436, 2012.
- [33] Houde Dai, Pengfei Guo, Hongyu Chen, Silin Zhao, Penghua Liu, and Guijuan Lin. An Improved Magnetic Spot Navigation for Replacing the Barcode Navigation in Automated Guided Vehicles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2021.
- [34] Maarten Uijt De Haag, Zhen Zhu, and Jacob Campbell. Laser-Based Navigation. In *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications*, volume 2, pages 1541–1569. Wiley-IEEE Press, 2020.

- [35] Clair Wyatt. *Electro-optical System Design for Information Processing*. McGraw-Hill Education, New York, Estados Unidos, 1991.
- [36] EBV Elektronik. Broadcom time of flight sensors.
- [37] KEYENCE. Escáner láser de seguridad Serie SZ-V. Technical report, KEYENCE, 2019.
- [38] DS Automation GMBH. Navigation.
- [39] Velodyne Lidar. Lidar FAQ, 09 2020.
- [40] Norhafizan Ahmad, Raja Ariffin Raja Ghazilla, Nazirah M. Khairi, and Vijayabaskar Kasi. Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems*, 1(2):256–262, 2013.
- [41] OECD. OECD policy guidance RFID and applications. *Journal of the National Cancer Institute*, 104(17):NP, 2012.
- [42] Zeydin Pala and Nihat Inanç. Smart parking applications using RFID technology. *2007 1st Annual RFID Eurasia*, 2007.
- [43] Stephen A Weis. Rfid (radio frequency identification): Principles and applications. *System*, 2(3):1–23, 2007.
- [44] Z. G. Man, W. H. Ye, P. Zhao, P. H. Lou, and T. J. Wu. Research on RFID and vision-based AGV navigation. *Advanced Materials Research*, 136:298–302, 2010.
- [45] Youngjae Lee, Jinhong Kim, Wonpil Yu, and Kiyoun Moon. An RFID-based Real-time Localization of Multiple AGV(Automatic Guided Vehicle) System for the Guided Path Navigation. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages 4–7, 2016.

- [46] Christopher J. Hegarty. The Global Positioning System (GPS). *Springer Handbooks*, 50(3):197–218, 2017.
- [47] Neil Ashby. Relativity and the global positioning system. *Physics Today*, 55(5):41–47, 2002.
- [48] Roy Featherstone and Roy Featherstone. Accuracy and Efficiency. *Rigid Body Dynamics Algorithms*, pages 195–212, 2008.
- [49] M. M. Al Emran Hasan, M. Ektesabi, and A. Kapoor. Fuzzy logic controller in an electric vehicle with dynamically changing centre of gravity. *2010 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, ICSET 2010*, 2010.
- [50] Cao Yu, Aihua Shen, Jiazhong Xu, Ming Qiao, and Yuantao Wang. Calculation and accuracy analysis of center of gravity of payload rack. *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2011*, 2:669–673, 2011.
- [51] Kristin Angel. *Calculating the Location of the Center-of-Gravity Using an Accelerometer Array*. PhD thesis, Rochester Institute of Technology, 2019.
- [52] J.C. Torres. Modelado geométrico. In *Diseño asistido por ordenador*, chapter TEMA 2, page 20. Universidad de Granada, 2020.
- [53] Irving Alberto Cruz Matías. Capítulo 3 : Transformaciones Geométricas. Technical report, Universidad de las Américas Puebla, 2007.