INSTITUTO TECNOLOGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS EN TECNOLOGIAS DE INFORMACION Y ELECTRONICA

T E S I S

MAESTRIA EN CIENCIAS EN SISTEMAS INTELIGENTES

Automatización de la Dirección de un Vehículo Autónomo

Por

Francisco Gerardo González Palacios

Monterrey, N. L., Diciembre de 2005

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS MONTERREY

PROGRAMA DE GRADUADOS DE TECNOLOGÍAS DE
INFORMACIÓN Y ELECTRÓNICA

T E S I S

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS INTELIGENTES

Automatización de la Dirección de un Vehículo Autónomo

por

Francisco Gerardo González Palacios

Monterrey, N.L., Diciembre de 2005

©Francisco Gerardo González Palacios, 2005.

Automatización de la Dirección de un Vehículo Autónomo

por

Francisco Gerardo González Palacios

T e s i s

Maestro en Ciencias

en

Sistemas Inteligentes

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey
Campus Monterrey

Monterrey, N.L., Diciembre de 2005

Resumen

Esta tesis describe una metodología confiable para el desarrollo de un vehículo autónomo (VA) de escala real, a partir de un vehículo móvil utilitario. El propósito es que el vehículo sea capaz de seguir una trayectoria establecida y enseguida realizar una tarea. El énfasis en este trabajo radicó en la automatización del sistema de dirección e instrumentación del control de velocidad, con base en una arquitectura jerárquica de control.

En la actualidad existen dos enfoques principales, para el desarrollo de un Vehículo Autónomo (VA): el primero, consiste en diseñar y construir un VA en su totalidad, sin embargo este método presenta varias desventajas, entre ellas un mayor tiempo de desarrollo, así como un gran incremento en el costo de implementación del prototipo. El segundo, y actualmente más utilizado, es realizar adecuaciones a un vehículo convencional para automatizar aquellas funciones que realiza un operador en su conducción, con el objetivo de controlar al vehículo en función de su dirección (ϕ) y de su velocidad (v), gobernando los tres grados de libertad (x, y, θ) con que cuenta. Permitiendo así, su navegación dentro de un espacio de configuración. Una de la principales ventajas del desarrollo de un VA a partir de un vehículo convencional es aprovechar la gran gama de vehículos existentes, que van desde unidades de transporte y agricultura, hasta vehículos para minería. En tales condiciones se elige el vehículo más apropiado, con base al tipo de ambiente donde será utilizado y en función de la tarea a realizar.

El vehículo móvil utilizado para la comprobación de la metodología propuesta, fue un vehículo utilitario eléctrico, originalmente diseñado para trabajos diversos en la minería y en la industria. El vehículo no contaba con preparaciones o instrumentos que permitieran manipularlo de forma automática. Surgió entonces la necesidad de hacer algunas adecuaciones con el objetivo de automatizar e instrumentar algunos sistemas de acuerdo a la arquitectura de control. Los sistemas que integran al vehículo móvil son el de velocidad, dirección y frenado, entre los principales. La automatización de la dirección presentó un nivel mayor de complejidad, en comparación al resto de los sistemas, debido a que no contaba con ningún mecanismo o actuador para su manipulación.

El refinamiento de los sistemas de control se realizó en un periodo mayor a tres meses. Permitiendo converger en un prototipo de un VA y de acuerdo a los resultados de los experimentos realizados, el método para convertir un vehículo móvil en un Vehículo Autónomo queda comprobado; logrando errores, en el seguimiento de trayectorias de más de 100 m del 2 % m.

Dedicatoria

Dedico esta tesis, que representa una meta de mi vida, a:

A tí Fernanda, por haberme apoyado en la forma como lo hiciste...

A tí, hijo, Pablo, por el tiempo que no compartimos juntos...
A tí, también, Emiliano...

A tí Dios mio...

Agradecimientos

Agradezco al Centro de Inteligencia Artificial, por el apoyo académico y las facilidades otorgadas. Así como también agradezco a todos, y a cada uno de los profesores CSI por la formación académica que me brindaron, durante estos años. En especial al Dr. Rogelio Soto, director del centro y Dr. Ricardo Ramirez, por el tiempo dedicado a esta tesis.

A ustedes Carlos y Hugo, por su gran apoyo y amistad.

Agradezco enormemente a usted Dr. José Luis Gordillo, por su enseñanza y confianza en el tiempo que estuve trabajando con usted.

A Fernando, Emiliano, Erick y a todos los estudiantes que colaboraron de algún modo en la realización de esta tesis, y a todos los demás.

A Norma y Jesús, por su apoyo en la realización de esta meta.

A todos ustedes, gracias.

Contenido

1. Introducción **1**

2. Desarrollo de un Vehículo Autónomo **9**
2.1. Modelo 10
2.1.1. Modelo Cinemático 10
2.1.2. Arquitectura de control 13
2.2. Metodología 15
2.3. Análisis y caracterización 17
2.3.1. Sistema de locomoción 17
2.3.2. Dirección 19
2.3.3. Velocidad 20
2.4. Modelado 21
2.4.1. Mecánico 21
2.4.2. Actuador 22
2.5. Diseño 25
2.5.1. Mecánico 25
2.5.2. Electrónico 26
2.5.3. Control 26
2.6. Implementación 27
2.7. Validación y pruebas 27
2.8. Correcciones y refinamientos 28
2.9. Modificaciones 28
2.10. Definición de variables 29

3. Automatización de la dirección de un VA **33**
3.1. Actuación 33
3.1.1. Análisis y Caracterización 34
3.1.2. Modelo 35
3.1.3. Diseño 36
3.2. Sensado 41
3.2.1. Análisis y Caracterización 41
3.2.2. Modelo 42
3.2.3. Diseño 43
3.3. Control 45

3.3.1. Análisis y Caracterización 45
3.3.2. Modelo 46
3.3.3. Diseño 48
3.3.4. Implementación y Pruebas 52

4. Implementación y Resultados **59**
4.1. Vehículo utilitario 59
4.2. Mecanismo de dirección 60
4.3. Sensado 61
4.3.1. Sensor de dirección 61
4.3.2. Sensor de límite 64
4.3.3. Sensor de velocidad 65
4.4. Control 67
4.4.1. Implementación 67
4.5. Experimentos y resultados 69
4.5.1. Comportamiento simple y respuesta al impulso 70
4.5.2. Seguimiento de una línea recta 71
4.5.3. Trayectorias 72

5. Conclusiones **81**

A. Sistemas Mecánicos **85**
A.1. Especificaciones 85
A.2. Diseños mecánicos 85
A.3. Instrumentación 87

B. Cálculo de x, y, θ del VA **91**

C. Dinámica y control de la dirección **93**
C.1. Análisis de la planta a controlar 93

Índice de figuras

1.1. Geometría Ackermann 3
1.2. Método para la generación de un VA 4
1.3. Arquitectura de control jerárquica, desarrollada en [Albores 06] 6

2.1. Modelo bicicleta 11
2.2. Arquitectura jerárquica de [Albores 06] 13
2.3. Metodología para el la conversión de un vehículo móvil en un VA . . . 16
2.4. Sistema de locomoción 18
2.5. Geometría Ackermann 18
2.6. Representación de la translación del vehículo 19
2.7. Simulación de trayectoria del vehículo, con dirección de giros constantes 20
2.8. Caracterización de la velocidad del vehículo 21
2.9. Modelo gráfico del vehículo móvil a convertir 22
2.10. Diagrama a bloques del sistema eléctrico del vehículo móvil 23
2.11. Diagrama esquemático del sistema dinámico del motor de CD 24
2.12. Diagrama a bloque de las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17) 25
2.13. Diagrama a bloques del control de dirección 26
2.14. Diagrama a bloqes de un sistema de control digital 27
2.15. Implementaciones realizadas al vehículo utilitario 28
2.16. Interfaz del usuario, donde se define y envia la trayectoria al VA 29
2.17. Seguimiento de primer trayectoria del prototipo del VA 30
2.18. Seguimiento de trayectoria del prototipo del VA 31

3.1. Vehículo utilitario móvil, de escala real 34
3.2. Sistema mecánico de dirección 36
3.3. Actuador de CD 39
3.4. Engranes "bevel", perpendiculares con relación 1 : 1 40
3.5. Sistema electromecánico 41
3.6. Esquema eléctrico del potenciómetro rotacional 43
3.7. Diagrama a bloques de un sistema de adquisición 43
3.8. Función de transferencia del comportamiento del sensor de dirección. . 44
3.9. Histéresis máxima, del sensor de dirección. 45
3.10. Sistema dinámico de dirección del vehículo, planta 46
3.11. Diagrama del control de lazo cerrado de la dirección 47

3.12. Diagrama a bloques del sistema de control simplificado 47
3.13. Método de caracterización de la planta en lazo abierto 49
3.14. Respuesta de la planta ante un entrada escalón 51
3.15. Ubicación de los polos de lazo cerrado en el plano z 53
3.16. Comportamiento del sistema automático de dirección del VA 54
3.17. Error del sistema de control 55
3.18. Diagrama del control adaptable 56
3.19. Zonas de operación del sistema de dirección 56
3.20. Respuesta con control adaptable 57
3.21. Error del sistema de control adaptable 57

4.1. Vehículo utilitario eléctrico utilizado en el desarrollo de un VA 60
4.2. Sistema electromecánico para el control de dirección del VA 61
4.3. Rango total de operación del sensor de dirección (*span*) 62
4.4. Acoplamiento del sensor de dirección 63
4.5. Sensor de dirección 64
4.6. Medición de la dirección en estado estable, con filtrado analógico 65
4.7. Medición de la dirección en estado estable, con filtrado digital 66
4.8. Límite izquierdo, calibrado en $-30°$ 67
4.9. Límite izquierdo, calibrado en $30°$ 67
4.10. Sensor de límite 68
4.11. Elementos del sensor de velocidad 69
4.12. Implementación del sensor de velocidad 70
4.13. Interfaz de potencia 71
4.14. Módulos de la arquitectura jerarquíca que integran al VA 72
4.15. Desempeño del control de dirección; ante un señal de prueba escalón . . 73
4.16. Seguimiento de una recta de 50 m. 73
4.17. Evolución de trayectoria tipo "8" 75
4.18. Ejecución de la trayectoria tipo "8", por el VA 77
4.19. Error en el recorrido de la trayectoria en forma de "8". 78
4.20. Desempeño del control de dirección 78
4.21. Error del control de dirección, en operación 79

A.1. Sistema electromecánico para el control de dirección 87
A.2. Rediseño de flecha de transmisión para montaje de engranes "bevel" . . 88
A.3. Acoplamiento del sensor de dirección a la dirección 88
A.4. Diseño de cople rígido para el montaje del sensor de dirección 89
A.5. Diseño del soporte de sujeción de transductor, potenciómetro 89

B.1. Modelo geométrico del modelo bicicleta 91

C.1. Sistema de dirección; planta 94
C.2. Diagrama del sistema de dirección 95
C.3. Diagrama a bloques de unidad de corrección 97

Índice de tablas

3.1. Especificaciones del sistema de dirección mecánica 35
3.2. Datos de medición de torque 35
3.3. Evaluación de las propuestas para el lugar de actuación 37
3.4. Comparación de actuadores eléctricos 39
3.5. Comparación de propiedades de acoplamiento para actuador 40
3.6. Comparación de transductores 42
3.7. Fórmulas para sintonización por el método Ziegler-Nichols 52

4.1. Rango de operación del sensor de dirección 63
4.2. Lista de puntos que definen la trayectoria de referencia y recorrida . . . 76
4.3. Error estimado en el recorrido de la trayectoria tipo "8" 77

A.1. Especificaciones del vehículo utilitario eléctrico 86

Capítulo 1

Introducción

El desarrollo de robots móviles es una respuesta a la necesidad de realizar tareas en entornos naturales donde se expone la integridad física del ser humano, ya sea por la realización de la propia tarea o por el entorno donde se desarrolla. Sin embargo, en la actualidad los robots móviles son incapaces de realizar este tipo de actividades debido a que en su gran mayoría son robots experimentales que carecen de un diseño mecánico robusto. La mayoría de robots móviles deben operar en un ambiente totalmente controlado y reducido, tal como el de un laboratorio. Así, estos robots experimentales están limitados a evolucionar en ambientes naturales con condiciones adversas, exceptuando algunos sistemas actuales que son muy específicos [Dudek 00]. Por otra parte, a pesar de esta limitante se han logrado grandes avances en robótica móvil, desde el desarrollo de componentes físicos (sensores, actuadores, procesadores, entre otros), así como de sistemas de cómputo (lenguajes de programación, sistemas de control y algoritmos).

En cambio, en la industria automotriz han ocurrido grandes avances tecnológicos, particularmente en automóviles de trabajo rudo, a los cuales se les han adecuado herramientas en función de su aplicación, tales como: escavadoras, tractores, grúas, entre otros. En la mayoría de los casos, estos vehículos son operados mediante una interfaz o remotamente. El aprovechamiento de la tecnología logrado en esta industria, con más de un siglo de investigación, daría una ventaja para diseñar robots mucho más robustos en su condición mecánica, permitiendo que los robots basados en vehículos móviles puedan evolucionar en ambientes exteriores. Además, si se lograra automatizar las funciones que realiza un operador humano en la conducción del vehículo, tales como: la percepción del ambiente, la planificación de las acciones y el control del vehículo se estaría proporcionando un cierto nivel de autonomía en la aplicación. Los resultados serían vehículos autónomos capaces de evolucionar y realizar tareas específicas en ambientes exteriores permitiendo así salvaguardar al operador [Rehg 00]. Por lo tanto, un vehículo autónomo permitiría reemplazar al conductor del vehículo cuando se utilice en tareas de alto riesgo, tales como en la transportación de material tóxico, en la fumigación de pesticidas en campos agrícolas, las exploraciones terrestres, mineras o petroleras entre otras actividades peligrosas para el ser humano.

Actualmente existen dos enfoques para el desarrollo de un Vehículo Autónomo (VA). El primero, consiste en diseñar y construir un VA en su totalidad, sin embargo este método presenta varias desventajas, entre ellas un mayor tiempo de diseño, así como un incremento en el costo de implementación del prototipo. El segundo enfoque, y actualmente más utilizado, es realizar adecuaciones a un vehículo convencional para automatizar aquellas funciones que realiza un operador en su conducción, con el objetivo de controlar al vehículo en función de su dirección (ϕ) y de su velocidad (v), gobernando los tres grados de libertad (x, y, θ) con que cuenta. Como resultado el vehículo es capaz de navegar dentro de un espacio de trabajo.

Una de la principales ventajas del la generación de un VA, a partir de un vehículo convencional, es aprovechar la gran gama de vehículos existentes, que van desde unidades de transporte y agricultura, hasta vehículos para minería. En tales condiciones se elegirá el vehículo más apropiado, con base al tipo de ambiente donde será utilizado y en función de la tarea a realizar.

El objetivo de esta tesis es la automatización e instrumentación del sistema de dirección mecánica de un vehículo utilitario eléctrico. Además se realizaran adecuaciones para el control de velocidad del vehículo, con el propósito de evolucionar en un espacio de trabajo de forma autónoma. La conversión de un vehículo en un VA se realiza a través de un método sistemático de conversión, con base en el modelo cinemático del vehículo.

Este trabajo de investigación considera sólo los elementos, correspondientes al control de la dirección e instrumentación del vehículo. Como el desarrollo de un VA, a través de la adecuación de un vehículo estándar, representa un problema complejo en donde convergen diversas ramas de la ingeniería, varios de los sistemas que complementan al VA se realizaran paralelamente; sin embargo tales elementos, como el freno eléctrico y mecánico no se abordaran en este trabajo.

El modelo cinemático del vehículo se abstrae con base en el sistema de locomoción Ackermann, con que cuenta el vehículo. Este sistema de locomoción es uno de los más comunes y eficientes, a pesar de que fue patentado en el siglo XIX, conforma el sistema más utilizado en automóviles comerciales e incluso en vehículos pesados. Gracias a este sistema de locomoción, el cual se observa en la Figura 1.1, es posible que el vehículo gire sin deslizamientos a baja velocidad, debido a que los ejes de rotación de las llantas traseras y delanteras coinciden en el punto (c), siendo este punto el centro de rotación del vehículo respecto al centro de las llantas. Puede observarse que la rueda delantera interior gira un ángulo mayor, con el objetivo de eliminar el deslizamiento debido a que posee un doble pivote [Milliken 95]. Considerando que el vehículo no tiene deslizamiento y suponiendo que las fuerzas centrífugas son iguales a cero, los vectores instantáneos de velocidad son tangentes a la curva (t) descrita por el vehículo [Ollero 01]. Lo cual se traduce a que el vehículo no se desplaza lateralmente.

Otra característica de un vehículo convencional es que presentan restricciones de movimiento denominadas no-holonómicas, puesto que el vehículo no puede cambiar de dirección sin cambiar su posición a la vez [Laumond 97]. Estas características permiten simplificar el modelo del vehículo a un modelo más simple, al modelo de bicicleta, el cual será analizado en el Capítulo 2.

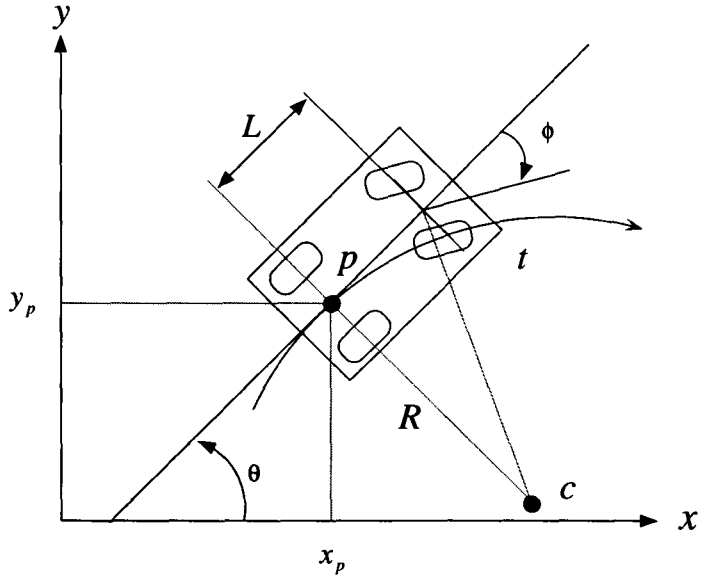


Figura 1.1: Geometría Ackermann, del vehículo en el plano x, y con posición θ y dirección ϕ describe la curva t.

Se propone la conversión de un vehículo utilitario de escala real a un VA, a través de un método sistemático, el cual se divide en las siguientes etapas: *análisis y caracterización*, *modelado*, *diseño*, *implementación* y un *ciclo de pruebas, validaciones, correcciones y modificaciones.* Gracias al método, se incluirá un sistema de control electromecánico con el que se manipulará el sistema de dirección, dejando la opción de conducción manual. Para la validación del método se cuenta con un vehículo eléctrico utilitario de escala real. El método se muestra de forma esquemática en la Figura 1.2.

Las etapas que describen el método propuesto, que tiene como propósito desarrollar un VA de escala real se describen a continuación:

Análisis y Caracterización. Se estudia cada uno de los sistemas que integran al vehículo, tanto mecánicos como eléctricos, también se obtienen los datos del comportamiento dinámico del vehículo a través de la caracterización tanto de la planta a controlar, como de los diferentes parámetros con que cuenta como velocidad, aceleración y frenado, entre los más importantes.

Modelado. Se realiza el modelado de los sistemas mecánicos y eléctricos, con base en programas computacionales especializados de acuerdo al sistema a modelar, con el

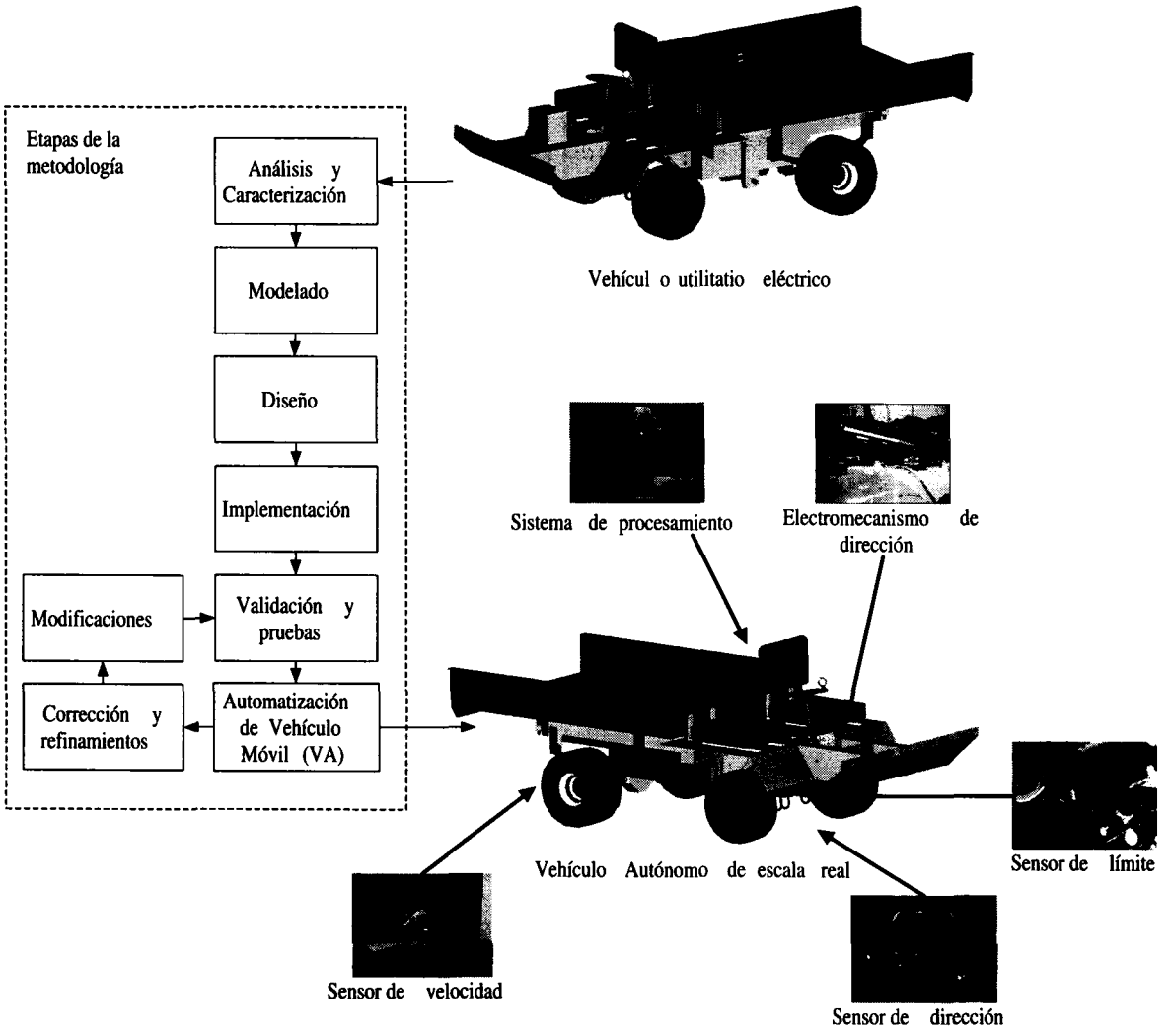


Figura 1.2: Etapas del método para la generación de un VA, partiendo de un vehículo estándar y como salida un prototipo de VA.

fin de obtener una descripción completa, detallada y útil del vehículo. Contar con un modelo permite diseñar los elementos de conversión al VA rápida y eficientemente, debido que la construcción e implementación posterior se harán con base en dichos modelos.

Diseño. Se diseñan los sistemas mecánicos y electrónicos cuyo propósito es permitir el acoplamiento y control del actuador de dirección. Los diseños se validan con base al modelo de cada sistema. Cabe mencionar que debido a que el vehículo no fue diseñado para ser automatizado, el control del sistema de dirección requiere la implantación de un sistema mecánico que además permita la operación normal del sistema de dirección, según se requiera.

Implementación. Se instalan en el vehículo los sistemas de control de dirección y de velocidad, de acuerdo a la arquitectura de control jerárquica, basada en sistemas

mínimos de microprocesadores. Se incluye además los sensores que permitan medir la dirección y velocidad, así como los algoritmos para su control.

Validación y pruebas. Todos los sistemas elaborados, son validados y probados, con el fin mejorar el comportamiento del VA en el seguimiento de una trayectoria. Esta etapa se realiza dentro de un ciclo de validación, pruebas y correcciones, el cual se interrumpe cuando los resultados son satisfactorios, con base en los análisis de desempeño y los criterios de efectividad. Dicho ciclo brinda una mejora continua, puesto que en las validaciones y pruebas se detectan las oportunidades de mejora y, gracias al modelo, se actualizan las versiones anteriores de los sistemas. Así, se converge a un prototipo mejorado del VA de forma sistemática.

Corrección y refinamientos. Dentro del ciclo de mejora, se ajusta cada uno de los sistemas para incrementar su eficiencia de desempeño, en su diseño. Las correcciones y modificaciones se realizan sobre el modelo de cada sistema que posteriormente se instala en el VA.

Modificaciones. Se realizan las modificaciones especificadas en la subetapa anterior, para mejorar y converger a una implementación óptima, reiniciando nuevamente la etapa de validación y pruebas.

El resultado del método propuesto es el prototipo de un Vehículo Autónomo. La arquitectura de control, compuesta por sensores, actuadores, sistemas de cómputo y algoritmos proporcionan al vehículo, cierto grado de autonomía. Con ello el VA adquiere la capacidad de navegar en un espacio de configuración, así como de realizar una tarea específica, como el seguimiento de una trayectoria libre de obstáculos, dentro del espacio de trabajo.

El sistema de control que gobierna al VA se basó en la arquitectura de control definida en [Palacios 00]. Sin embargo, aunque la estructura de los lazos cerrados de velocidad y dirección implicados se mantiene se incluyeron modificaciones, con el objetivo de robustecerla. El control utilizado, definido en [Albores 06], se muestra en la Figura 1.3, donde se observa que las funciones de planeación, sensado y actuación son fragmentadas en tareas independientes. Se reduce entonces la complejidad del control del VA, permitiendo que cada módulo del sistema de control sea responsable de la tarea asignada. Este tipo de sistemas de control es jerárquico y modular.

El sistema de control jerárquico se integra por diferentes módulos en niveles descendentes y divididos en dos tareas principales; la primera es la planeación de la trayectoria que permite generar una trayectoria en forma de una secuencia de puntos en el ambiente de configuración, con base en el modelo del ambiente y el modelo cinemático del vehículo; la segunda brinda al VA la capacidad de seguir la trayectoria establecida. La Figura 1.3 muestra la jerarquía de los módulos que integran al sistema. El *control de trayectoria*, tiene como tarea monitorear la posición actual del vehículo

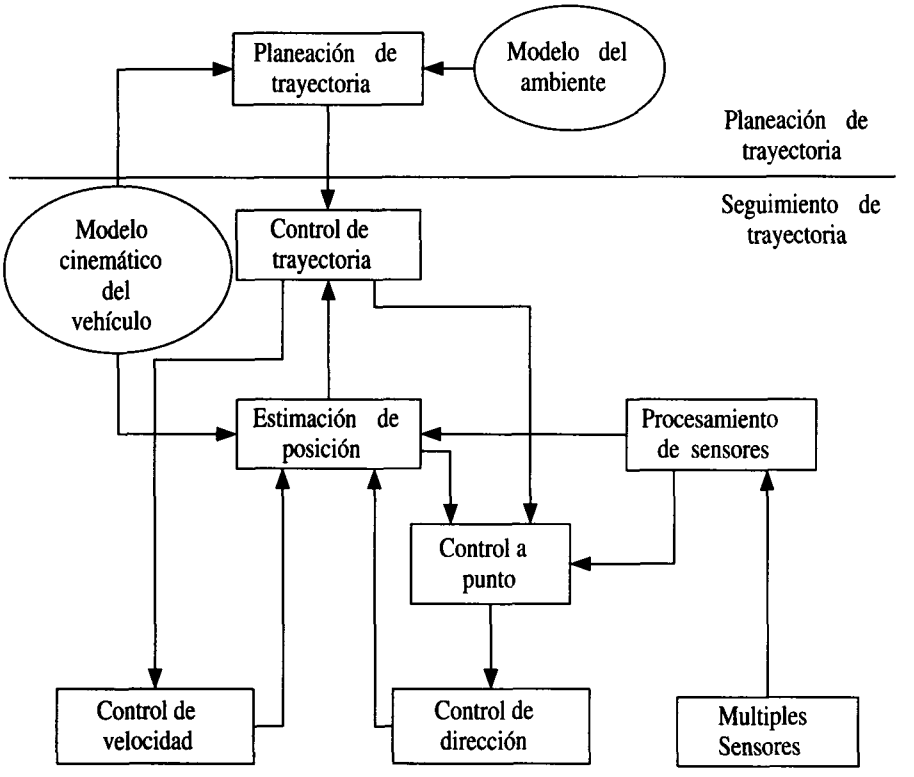


Figura 1.3: Arquitectura de control jerárquica, desarrollada en [Albores 06]

y la administración de la trayectoria asignada. Este controlador determina el inicio y fin de la trayectoria al activar y desactivar al *control de velocidad*, quien se encarga de mantener una velocidad crucero constante. La posición actual y orientación del vehículo la calcula el módulo de *estimación de posición*, con base en el modelo cinemático del vehículo, el modelo del ambiente y los datos obtenidos por los sensores, así como los controladores de dirección y velocidad. El *control a punto* determina el ángulo de la dirección de las llantas, con base en las coordenadas del punto asignado por el control de trayectoria y la posición actual. Esta información se alimenta al *control de dirección* encargado de manipular el ángulo de las llantas. La última etapa de la arquitectura la conforman los componentes físicos: *actuadores y sensores*, que realizan la interfaz entre el sistema de control y el vehículo móvil, mediante los cuales se manipula la velocidad y la dirección. Finalmente, el VA puede realizar el recorrido de la trayectoria asignada y se detiene cuando haya alcanzado el último punto de la trayectoria (lista de puntos).

La automatización e instrumentación del control de dirección, así como las modificaciones para la medición de velocidad, son las tareas desarrolladas a profundidad en esta tesis; para lo cual se aplicó el método para la generación de un VA. Las tareas restantes fueron desarrolladas paralelamente; sin embargo son detalladas en otros trabajos de investigación.

Con el propósito de profundizar en el trabajo de investigación desarrollado, el Capítulo 2 de esta tesis, presenta el análisis de los elementos físicos del vehículo a escala real a automatizar; también se abordan los fundamentos existentes de trabajos previos en está área. El Capítulo 3 propone un sistema electromecánico para el control de dirección del vehículo; por lo tanto se profundiza en el análisis, diseño y selección del sistema de control de dirección. El Capítulo 4 presenta las implementaciones del sistema propuesto, así como los sistemas diseñados para el control del actuador; además presenta un análisis de desempeño de los sistemas de control. El Capítulo 5 presenta las conclusiones de este trabajo, también de algunas recomendaciones sobre el trabajo futuro. Además, el Apéndice A muestra los diseños y especificaciones de los principales componentes mecánicos. El Apéndice B muestra la forma de cálculo de posición y orientación del vehículo. Asimismo el Apéndice C presenta el análisis del sistema mecánico de dirección.

Capítulo 2

Desarrollo de un Vehículo Autónomo

Este capítulo presenta los principales componentes que integran la conversión de un vehículo móvil a un Vehículo Autónomo (VA). Se presenta tanto la arquitectura de control, la cual permite que un vehículo móvil adquiera un determinado grado de autonomía, así como la metodología de conversión.

El desarrollo de un VA proviene generalmente de las adecuaciones realizadas a vehículos móviles para automatizar aquellas funciones que un operador realiza en su conducción. Sin embargo, otros tipos de desarrollos son aquellos donde se construye al robot móvil en su totalidad. Tales casos son muy específicos y resultan en procesos muy costosos, por lo tanto la primera de estas opciones es la más viable y la adoptada para esta tesis. Por otra parte, el grado de autonomía que posee un VA resulta de la capacidad que tiene para ejecutar una tarea sin la intervención del hombre; para lograrlo se requiere de un sistema de procesamiento de información y de programas de cómputo que permitan percibir el entorno, modelar, planificar y actuar en el espacio de configuración [Ollero 01].

El método propuesto para la conversión de un vehículo utilitario eléctrico a un vehículo autónomo se integra por una serie de etapas de desarrollo. La primera, consiste en un *Análisis y Caracterización* de los sistemas físicos que integran al vehículo. La segunda es *Modelado*, donde se obtienen los modelos que representan el comportamiento de los sistemas físicos a controlar. La tercera es el *Diseño*, donde se generan los sistemas mecánicos, electrónicos y algoritmos, los cuales se integran mediante una arquitectura de control. La cuarta, la *Implementación* de los diferentes sistemas que fueron desarrollados en etapas previas, sobre el vehículo móvil. Finalmente, en la última etapa se realizan una serie de *Validaciones y Pruebas* de los sistemas desarrollados con el objetivo de realizar una medición cuantitativa del desempeño del VA. A partir de este punto, inicia un ciclo de mejora continúa a través de una serie de *Refinamientos y Modificaciones* con el propósito de elevar el nivel de desempeño del vehículo. El ciclo se rompe cuando se hayan alcanzado un nivel aceptable de desempeño.

2.1 Modelo

El vehículo móvil utilizado en la comprobación del método propuesto es un vehículo utilitario eléctrico de escala real, el cual tiene un sistema de locomoción igual al de un automóvil estándar. Por lo tanto, para controlar al vehículo es necesario un modelo que represente su movimiento, siendo los elementos mecánicos los que definen su comportamiento cinemático. Con base en el modelo cinemático es posible entonces, definir los parámetros de entrada y los parámetros de salida que determinan su movimiento y con ello los sistemas a automatizar. Además es requerido un sistema que coordine e integre la función de cada uno de los sistemas del vehículo a controlar.

La arquitectura de control que integra los sistemas mecánicos y electrónicos y además proporciona al vehículo utilitario la capacidad de seguir una trayectoria libre de obstáculos en un espacio de configuración, fue desarrollada por el grupo visión del CSI del Tecnológico de Monterrey. El uso de este sistema de control le proporcionará, al vehículo móvil, un determinado nivel de autonomía.

2.1.1 Modelo Cinemático

El modelo cinemático del vehículo utilitario se obtiene de la configuración de los elementos mecánicos y parámetros que rigen su locomoción. Sin embargo, si se tomaran en cuenta cada uno de los parámetros que influyen en el comportamiento del vehículo, tales como: la deformación de las llantas, las inercias de movimiento, los coeficientes de fricción, la inclinación, las cargas inerciales, entre otros, además de considerar el sistema mecánico, el modelo se volvería demasiado complejo. Por ello, es necesaria la simplificación de parámetros para obtener un modelo simple, pero confiable. Con el propósito de simplificar el método se parte de varias suposiciones, tales como:

- El vehículo utilitario se desplazará sobre una superficie plana.
- Los ejes son perpendiculares al suelo.
- Se restringe el rodamiento de la llantas a un movimiento puramente rotacional, con lo cual no se consideran los deslizamientos laterales.
- En tiempos suficientemente cortos el vehículo utilitario mantiene la misma dirección de referencia.

El sistema mecánico de locomoción con que cuenta el vehículo utilitario, se le conoce como sistema de locomoción Ackermann, el cual se integra por dos ejes con dos llantas cada uno unidos mediante el chasis. Con este mecanismo las llantas delanteras definen la dirección que seguirá el vehículo, mientras las llantas del eje trasero proporcionan la potencia de tracción del vehículo. Por simplicidad del modelo, se supone que las dos llantas delanteras se unen al centro del eje al igual que las llantas traseras se unen en una sola en el diferencial; lo cual permite aproximar el

modelo cinemático del vehículo móvil a un modelo de sólo dos llantas, donde la rueda delantera realiza el direccionamiento y la trasera es sólo guiada. El modelo aproximado del vehículo utilitario se le denomina *modelo de bicicleta*, según se observa en la Figura 2.1, donde el espacio de configuración lo determina x, y, θ. En el modelo, x, y representan las coordenadas cartesianas, t representa la trayectoria descrita, R el radio de curvatura y el ángulo de dirección es ϕ, con referencia a la base de llanta [Kelly 98].

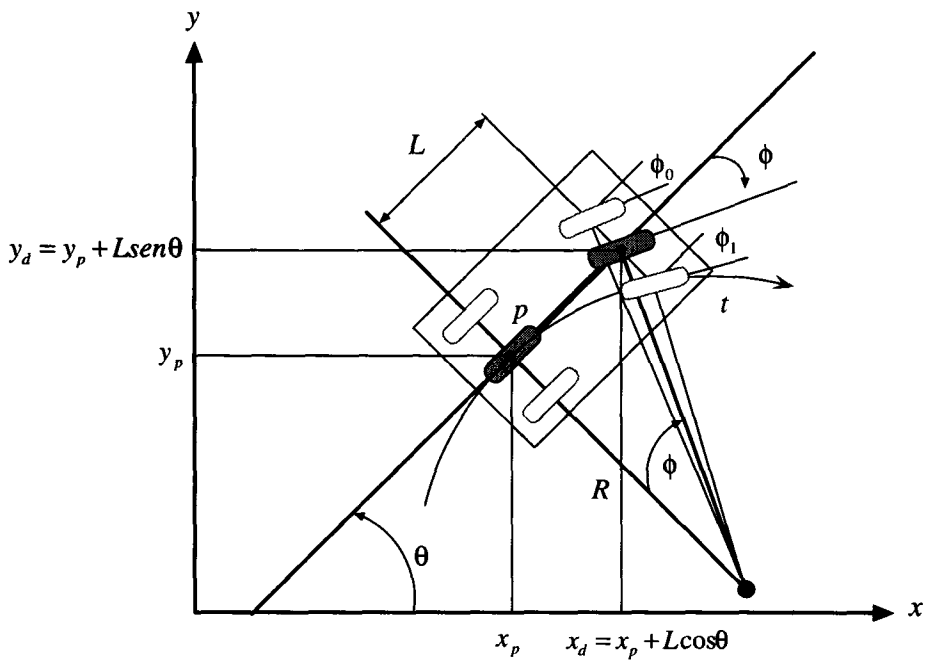


Figura 2.1: Modelo bicicleta, que aproxima al modelo cinemático del vehículo eléctrico utilitario.

Es importante tomar en cuenta que los vehículos móviles no son capaces de seguir cualquier trayectoria debido a las características de construcción y restricciones de movimiento que poseen. Las características de construcción se establecen por los topes mecánicos los cuales limitan la rotación de las llantas delanteras, así como las propias dimensiones físicas. Mientras que las restricciones cinemáticas que afectan al movimiento del vehículo son no-holonómicas, puesto que sus grados de libertad no actúan de forma independiente, lo cual restringe sus movimientos al no poder rotar sobre su propio eje, sin modificar la posición sobre el plano. Tomando en cuenta las consideraciones iniciales y despreciando los desplazamientos laterales se obtiene un modelo cinemático aproximado y completo, llamado modelo de bicicleta [Latombe 91].

La restricción no-holónomica para las llantas delanteras se definen por la ecuación (2.1), de la misma forma se muestra la restricción para la llanta trasera por la ecuación (2.2), ambas ecuaciones indican que las fuerzas lateras se contrarrestan, impidiendo los deslizamientos laterales.

$$\dot{x_d}\sin(\theta+\phi) - \dot{y_d}\cos(\theta+\phi) = 0 \tag{2.1}$$

$$\dot{x_p}\sin(\theta) - \dot{y_p}\cos(\theta) = 0 \tag{2.2}$$

donde x_d, y_d son las coordenadas de la llanta delantera mientras x_p, y_p son las coordenadas de la llanta trasera,

$$x_d = x_p + L\cos\theta \tag{2.3}$$

$$y_d = y_p + L\sin\theta \tag{2.4}$$

siendo L la distancia entre los ejes. Al sustituir (2.3) y (2.4) en (2.1) y simplificando,

$$\dot{x_p}\sin(\theta+\phi) - \dot{y_p}\cos(\theta+\phi) - \dot{\theta}L\cos\phi = 0 \tag{2.5}$$

El ángulo de dirección, que se toma en el modelo de bicicleta, es el promedio del ángulo de las dos llantas. La ecuación (2.6) define el radio de curva que describe el vehículo,

$$R = \frac{L}{\tan\phi} \tag{2.6}$$

Finalmente obtenemos el modelo cinemático del vehículo,

$$\begin{bmatrix} \dot{x_p} \\ \dot{y_p} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ \frac{\tan\phi}{L} \\ 0 \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} v_2 \tag{2.7}$$

donde, v_1 y v_2 son las velocidades del vehículo y de dirección, respectivamente.

Es importante mencionar que este modelo cinemático controla la posición del vehículo descrita por tres grados de libertad, sin embargo estos tres grados (x, y, θ) se controlan con solamente dos parámetros: velocidad y dirección (v, ϕ) respectivamente. Así, la parte medular de este trabajo será el control de dirección y velocidad que permite manipular por completo al vehículo utilitario con base en una arquitectura de control.

2.1.2 Arquitectura de control

La arquitectura de control implementada se basó en el trabajo de [Palacios 00] quien definió un sistema modular para automatizar un vehículo de escala reducida. Por lo tanto, esta arquitectura, mostrada en la Figura 2.2, ha sido validada y probada. Este sistema de control es jerárquico, puesto que la tarea principal se descompone en tareas independientes que son asignadas a módulos de niveles inferiores, los que son responsables de llevarlas a cabo y reportar sus resultados al módulo principal. La descomposición de funciones permite reducir la complejidad del problema principal. Ahora bien, esta arquitectura de control implementada fue modificada con el objetivo de robustecerla, a través de la inclusión de sensores de límite de seguridad y tiene capacidad para la inclusión de sensores absolutos y relativos.

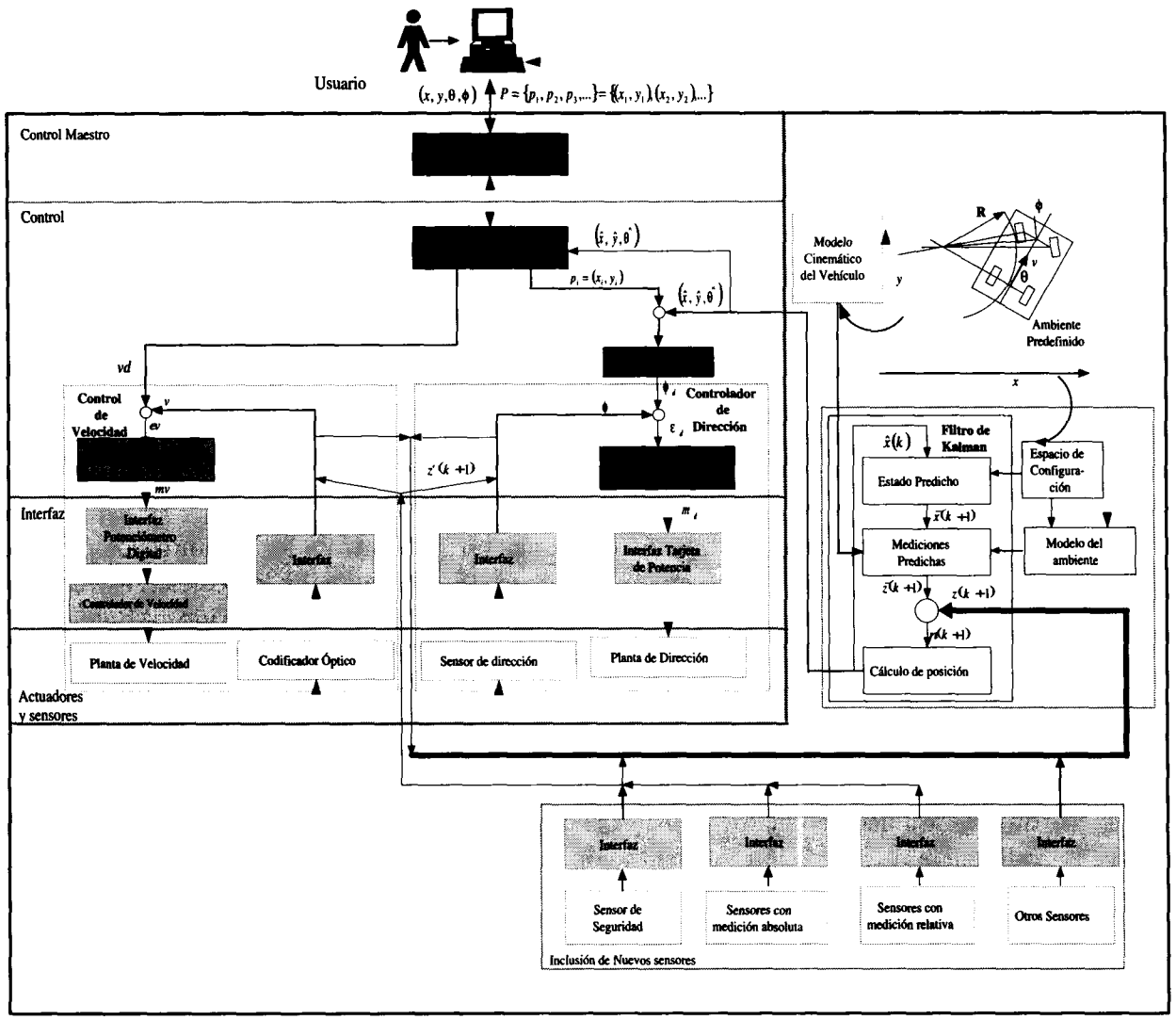


Figura 2.2: Arquitectura jerárquica de [Albores 06]

Gracias a la arquitectura de control el vehículo autónomo sigue una trayectoria asignada, por el usuario a través de una computadora que comunica a dicho usuario con el VA. El VA se pone en marcha, al recibir la señal de arranque, con una determinada velocidad gobernada por el *Control de Velocidad.* Al mismo tiempo el *Control de Trayectoria* activa a los *Controladores A Punto* y de *Dirección* con el objetivo de alcanzar el primer punto de la lista y administrar los puntos restantes hasta agotar la lista de puntos. Una vez alcanzado el último punto de la trayectoria el vehículo finaliza su tarea deteniendo su movimiento. Durante el seguimiento de la trayectoria, el VA calcula la posición actual y estima el error del recorrido.

Los módulos que integran la arquitectura de control jerárquica se describen a continuación:

Usuario. El usuario, interactúa con el sistema a través de una interfaz, alojada en una computadora, como se observa en la Figura 2.2. Por medio de una interfaz establece comunicación entre el usuario y la unidad de procesamiento central de la arquitectura de control, a través de un protocolo con corrección de errores. Por medio de la interfaz es posible realizar las siguientes tareas: crear y asignar una trayectoria al vehículo mediante una secuencia de puntos; iniciar la ejecución de la trayectoria y visualizar los parámetros actuales del vehículo, tales como: velocidad, dirección, sensores de seguridad, posición, orientación, así como supervisar el comportamiento de los ciclos de control y modificar parámetros de sintonía de los diferentes controladores.

Unidad de procesamiento central (UPC). Módulo de mayor jerarquía, conocido como control maestro; su función es la coordinación del funcionamiento de la estructura de control, la asignación de tareas al resto de los módulos, la recepción de resultados y mantener comunicación constante entre la arquitectura del VA y el usuario.

Control de trayectoria. Su función es despachar, al controlador a punto, los puntos de la trayectoria a recorrer, en función de la posición inicial y la posición estimada, además de activar el control de velocidad para iniciar el recorrido. Al alcanzar el último punto de la trayectoria, este módulo envía un comando de paro de ejecución para detener la marcha.

Control a punto. Módulo encargado de guiar al vehículo a cada uno de los puntos de la trayectoria asignada. La variable controlada es la dirección de las llantas que debe hacer coincidir con la orientación y posición del punto consigna, con referencia a la posición y orientación actual del vehículo.

Control de dirección. La función de este módulo consiste en manipular a través de una interfaz al actuador de dirección, el cual permite que las llantas alcancen el ángulo requerido por el controlador a punto. Se incluyó además, un sensor de seguridad que limita el rango de operación de la dirección con el propósito de proteger al sistema.

Control de velocidad. Su función es alcanzar y mantener la velocidad crucero (velocidad constante) establecida. Este módulo se compone por un controlador digital, una interfaz, un motor de tracción y un sensor de velocidad (codificador óptico) el cual cierra el lazo de control.

Estimación de posición del vehículo. Módulo que realiza la estimación de posición con base en el modelo cinemático del vehículo, el modelo del ambiente y la información obtenida de los sensores de velocidad y dirección del vehículo.

Los módulos anteriormente descritos forman parte de la arquitectura a implementar en este desarrollo. Sin embargo, esta arquitectura contempla otros módulos como parte del trabajo realizado en [Albores 06], tales como un filtro de Kalman, sensores de medición absoluta.

La posibilidad de anexar nuevos módulos a la estructura inicial es una característica importante de este tipo de arquitectura de control. Debido a que no altera la jerarquía inicial, simplemente se integran los módulos en el nivel correspondiente; por ello es fácil la inclusión de otros sensores para aportar una mayor robustez.

2.2 Metodología

La metodología propuesta para la conversión de un vehículo eléctrico utilitario a un vehículo autónomo de escala real se muestra en la Figura 2.3, donde se observa una secuencia de etapas que llevan sistemáticamente a la conversión del vehículo móvil en un VA. El enfoque utilizado para la conversión es automatizar aquellas funciones que un operador realiza en la conducción del vehículo, tales como direccionamiento y aceleración, entre otras.

La metodología adoptada se puede generalizar en los siguientes pasos:

1. Definir límites de trabajo. Partiendo del vehículo utilitario, se adecua y automatiza los sistemas que le proporcionan la capacidad de sensar y actuar, principalmente el sistema de dirección y velocidad.

2. Caracterización de los diferentes sistemas eléctricos y mecánicos del vehículo utilitario; el objetivo es tener pleno dominio y conocimiento de las características y capacidades del carro.

   - Caracterización de velocidad.
   - Caracterización del sistema mecánico de dirección.
   - Caracterización del sistema eléctrico.

663231

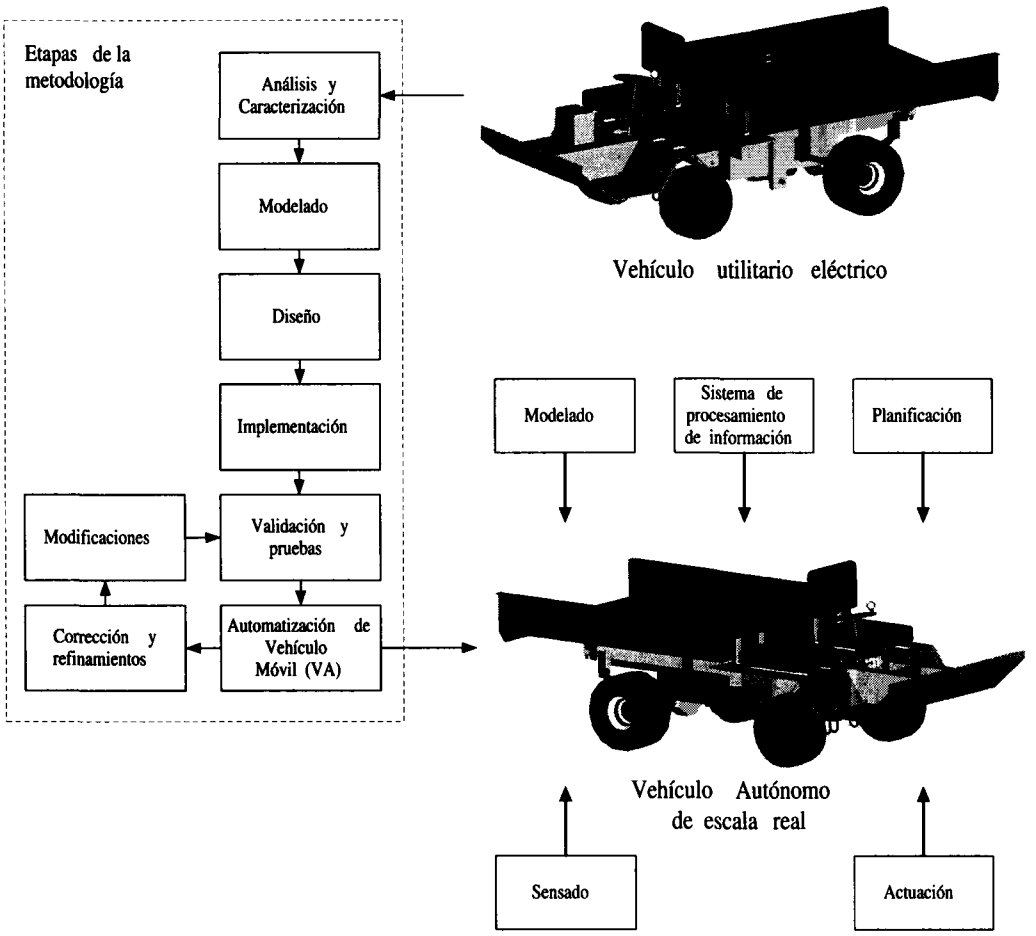


Figura 2.3: Metodología para el la conversión de un vehículo móvil en un VA

3. Modelado de sistemas, el objetivo es contar con modelos dinámicos y cinemáticos que representen el comportamiento, en el tiempo, de los sistemas evaluados, tales como: motores, sensores y mecanismos. De la misma manera es necesario contar con modelos mecánicos que facilitan la selección, diseño e implementación de nuevos dispositivos.

4. Diseño de los sistemas donde se seleccionará el actuador y sensores, así como otros instrumentos de medición para el control de la dirección que permitan cerrar los lazos de control, así como un estudio detallado de opciones para obtener la mejor idea de manipulación de la dirección, para lo cual se plantean diversas soluciones posibles las cuales son enseguida evaluadas. Debido a que el sistema de velocidad está parcialmente automatizado, sólo el sistema de dirección se automatizará completamente.

   - Planteamiento de ideas.
   - Análisis de las opciones.

- Elección de la mejor opción.
- Diseño y construcción del sistema mecánico, eléctrico y electrónico con base a la arquitectura de control.
- Diseño de los algoritmos de control digital basado en un microcontrolador.

5. Implementación del sistema electromecánico y electrónico.
6. Pruebas y validaciones, cuyo objetivo es caracterizar el desempeño actual y mejorar los modelos existentes.

La metodología será aplicada al desarrollo de cada uno de los sistemas que integran la arquitectura de control. Debido a que el vehículo es controlable en función de la velocidad y dirección de acuerdo al modelo cinemático del vehículo, este trabajo se enfocará a la automatización de la dirección con el objetivo de manipular las llantas de forma automática. Aunque este trabajo está orientado al control de dirección, el desarrollo complementario del VA correspondientes a los sistemas de velocidad, comunicación, entre otros, se desarrollaran paralelamente.

2.3 Análisis y caracterización

El objetivo de esta primera etapa es adquirir un pleno conocimiento de los principales componentes que integran al vehículo eléctrico utilitario, para conocer sus funcionalidades, capacidades y límites de operación. Con este propósito se realiza un análisis detallado de los elementos que forman al vehículo móvil desde los componentes físicos hasta el comportamiento dinámico del mismo.

Se realizan una serie de pruebas de campo con el objetivo de caracterizar y obtener las especificaciones generales y particulares de los sistemas del vehículo, los resultados de esta etapa se muestran en el Apéndice A. Es importante mencionar que a pesar que el vehículo fue adquirido en una empresa dedicada a la fabricación de vehículos de trabajo rudo, no se cuenta con todas las especificaciones y parámetros del vehículo; datos que fueron obtenidos a través de esta etapa.

2.3.1 Sistema de locomoción

La geometría de locomoción más popular, en vehículos móviles terrestres, es la de Ackermann conocida también como *Kingpins*. El vehículo utilitario eléctrico a convertir cuenta con esta arquitectura, mostrada en la Figura 2.4. Dentro del sistema de locomoción Ackermann se cuenta con un diferencial para transmitir la tracción del motor a las llantas traseras que son fijas, por lo tanto son sólo guiadas, mientras que las llantas delanteras son las que guían el desplazamiento del vehículo. El giro que describe el vehículo utilitario se muestra en la Figura 2.5, donde se observa

que la llanta delantera interna gira un ángulo ligeramente mayor, con respecto a la llanta externa a la trayectoria circular, permitiendo así eliminar el deslizamiento a bajas velocidades. Cuando el vehículo realiza un giro con determinado ángulo, gracias a su sistema de locomoción, las llantas se colocan de tal manera que su centro de rotación coincide en el mismo punto c. La trayectoria descrita por los centros de las llantas sobre el suelo es una circunferencia concéntrica al eje de rotación c [Milliken 95]. Por lo tanto, los parámetros de interés del sistema de locomoción son los límites de los ángulos de giro interior y exterior, así como los radios de giro.

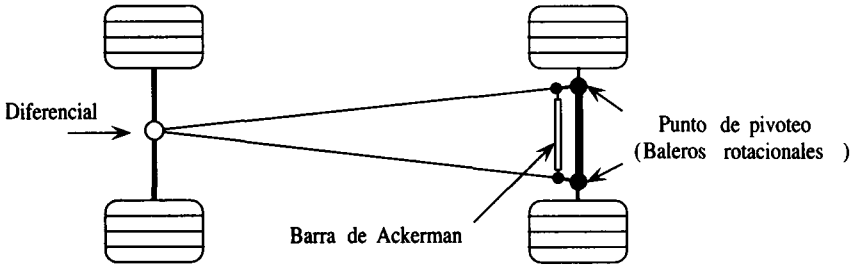


Figura 2.4: Sistema de locomoción; mecanismo común en vehículos móviles

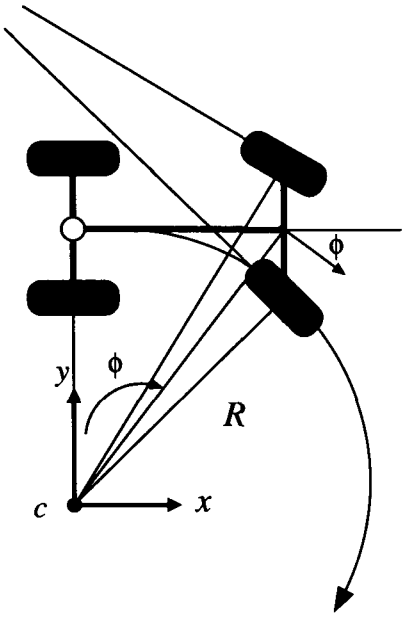


Figura 2.5: Geometría tipo Ackermann; la llanta interna gira un ángulo mayor respecto a otra, para que el centro de rotación de las llantas coincida en un mismo punto

2.3.2 Dirección

El objetivo de este análisis es determinar los límites de giro del volante (dirección) debido a que el sistema de dirección es manipulado a través de dicho volante; también se requiere conocer el rango de velocidad al que puede girar. Para ello, se realiza una simulación, con el objetivo de obtener los límites de velocidad de operación al que puede girar el volante, con ello se obtiene el rango de revoluciones por minuto (*rpm*) que debe tener el actuador. Se supone que la translación del vehículo sobre el plano de trabajo se representa por un vector velocidad (v), con dirección constante (ϕ) como se muestra en la Figura 2.6. En esta gráfica el vector (r) representa el desplazamiento lineal del vehículo entre dos posiciones a partir del cual se obtiene el desplazamiento en x y en y. A partir de los postulados y suposiciones anteriores es posible realizar una simulación sobre el comportamiento del vehículo cuando su dirección gira a diferentes velocidades. El resultado de la simulación muestra que para obtener una respuesta rápida del vehículo al trasladarse de un punto a otro, es de 30 *rpm* a 140 *rpm*. Por lo tanto, se establece la velocidad del giro del volante, para su control, en 90 *rpm*.

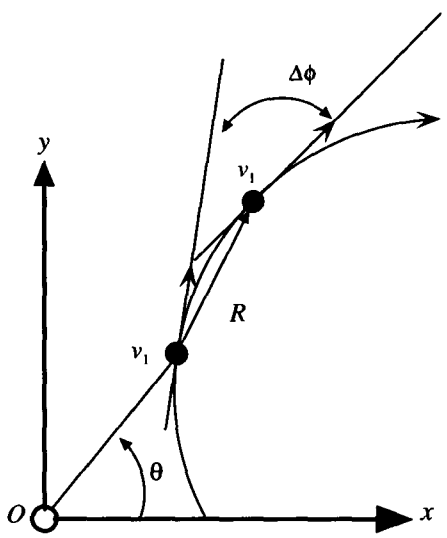


Figura 2.6: Representación de la translación del vehículo

$$\dot{x} = vcos(\theta) \tag{2.8}$$

$$\dot{y} = vsen(\theta) \tag{2.9}$$

donde v es la velocidad del vehículo, mientras que $\dot{x}$, $\dot{y}$ son las componentes de desplazamiento (x, y).

En la Figura 2.7 se muestra la simulación de la trayectoria que describe el vehículo utilitario eléctrico con variaciones sobre los parámetros: velocidad y dirección (v y ϕ). La simulación inicia en un punto específico teniendo como parámetros de entrada v y ϕ fijos, se obtiene como salida la trayectoria del vector (vehículo). Posteriormente se varía

el ángulo de dirección para obtener su comportamiento en todo el rango de trabajo. La simulación finaliza al obtener posiciones imposibles de alcanzar por el vehículo real, debido a sus limitaciones físicas. Los resultados de la simulación se analizan en función de la razón $\frac{\phi}{\Delta t}$, para determinar la rapidez con que el vehículo converge a un punto determinado, los resultados de esta simulación sirven como base en la selección del actuador.

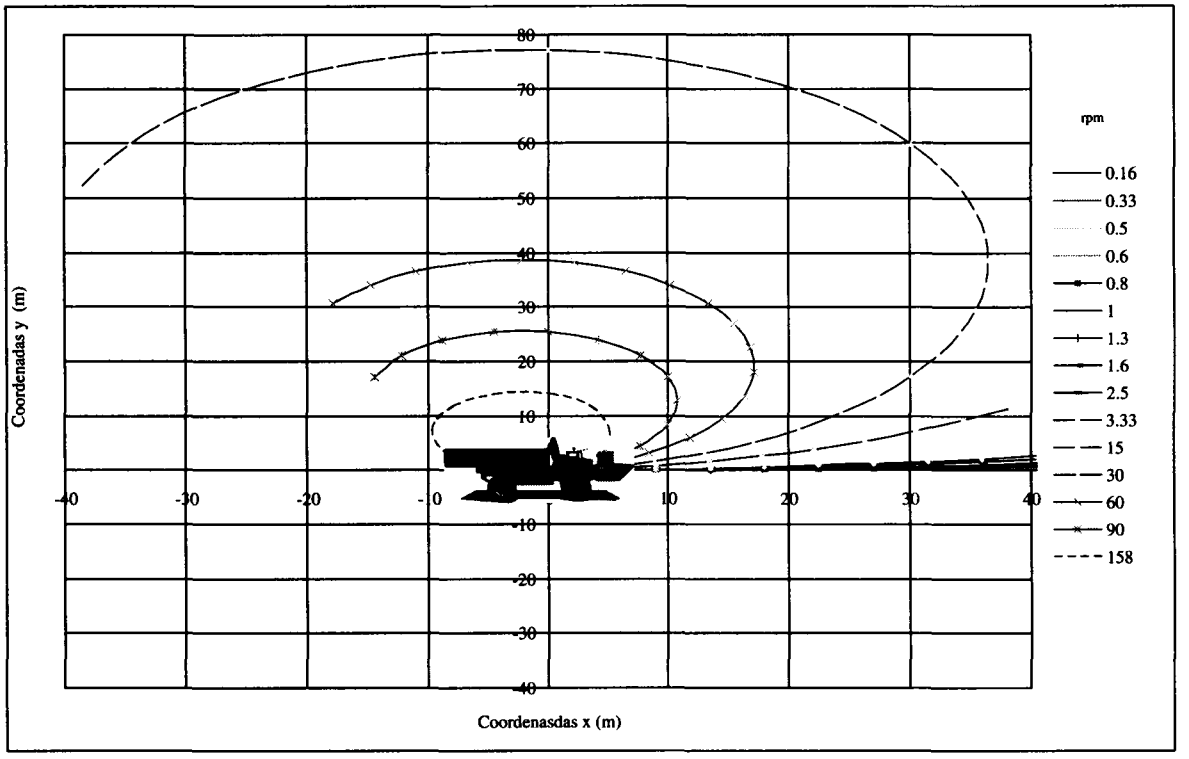


Figura 2.7: Simulación de trayectoria del vehículo, con dirección de giros constantes

2.3.3 Velocidad

El componente que proporciona la tracción al vehículo utilitario es un motor de CD de excitación independiente. Los motores de CD son dispositivos electromecánicos que transforman la energía eléctrica en energía mecánica, debido a que la corriente que fluye a través la armadura del motor produce la rotación del eje. Mediante un acoplamiento rígido, la rotación del motor es transferida a un eje diferencial, esta rotación es transmitida a las llantas traseras que generan la tracción del vehículo.

La velocidad se caracterizó mediante una serie de pruebas obteniendo el comportamiento promedio de la velocidad del vehículo en condiciones normales de operación. Debido a que la superficie de prueba presentaba una pendiente, se realizaron pruebas en ambos sentidos de la inclinación. La Figura 2.8 muestra los resultados de las pruebas, donde se observa que la velocidad máxima promedio fue 23 km/h .

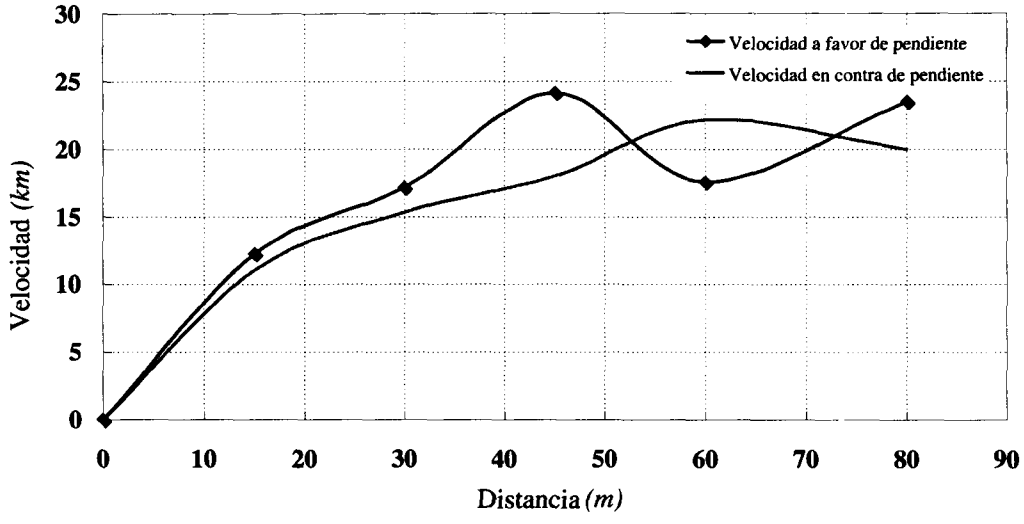


Figura 2.8: Caracterización de la velocidad, en favor y en contra de la pendiente del terreno

2.4 Modelado

Una de las etapas más importantes del desarrollo de un VA es el modelado; si deseamos controlar un sistema es necesario tener un modelo que represente el comportamiento, dinámico y cinemático del sistema lo más exacto posible, con base al cual se calculará su comportamiento en el tiempo. El modelo de un sistema se obtiene de las leyes físicas fundamentales que rigen su comportamiento, las cuales se expresan mediante ecuaciones matemáticas que describan la relación entre las entradas y las salidas del sistema, así como la relación interna entre sus componentes. En esta sección se obtendrán los modelos de los diferentes sistemas que rigen el comportamiento del vehículo, mediante los cuales, será posible controlar al vehículo móvil para que siga una trayectoria dentro de un espacio de configuración.

2.4.1 Mecánico

El modelo mecánico del vehículo según se muestra en la Figura 2.9, fue generado en un paquete computacional para diseño mecánico (Mechanical Desktop). Se modelaron cada uno de los componentes mecánicos del sistema desde las llantas hasta el motor de tracción, lo cual permitió desglosar cada parte del vehículo y tener una visión más general del vehículo. Así mismo, esta etapa es fundamental para el diseño de las modificaciones mecánicas que el vehículo requiere para la automatización de la dirección, tales como: sistema de dirección, inclusión de sensores de velocidad y dirección.

En la Figura 2.10, se observa el diagrama a bloques del sistema eléctrico del

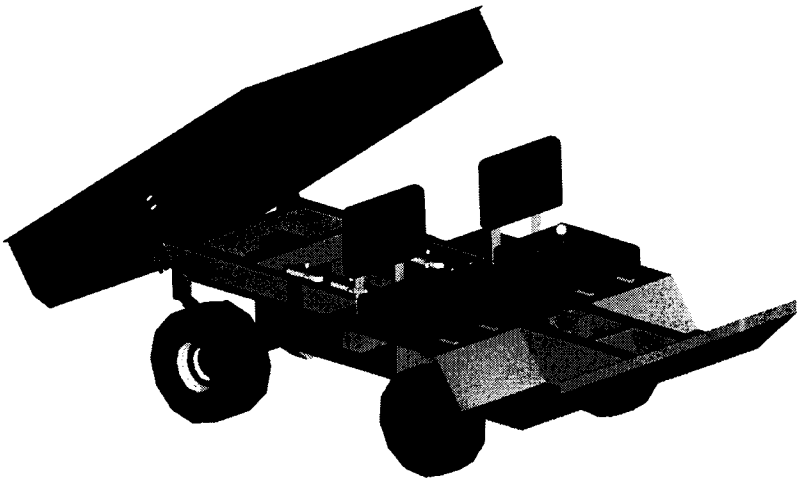


Figura 2.9: Modelo gráfico del vehículo móvil a convertir

vehículo, donde se aprecia el control de velocidad del motor, lo que representa una parcial automatización de este parámetro.

2.4.2 Actuador

Considerando que la fuente de energía del vehículo es eléctrica (36 V CD), el actuador a utilizar en la automatización del sistema de dirección será un motor de CD de imán permanente. Por lo tanto, el modelo del motor de CD es de suma importancia para establecer el controlador de este actuador.

El actuador que genera la tracción del vehículo es un motor de CD, se compone por una bobina de armadura montada sobre un eje que gira libremente. La bobina de armadura, se encuentra dentro de un campo magnético producido por la corriente del imán permanente. La Figura 2.11 muestra el circuito equivalente de un motor de CD de imán permanente representado por una resistencia de motor R_m, y una bobina L_m, referidos a una carga J_m. Al aplicar un voltaje (e_a) en la entrada, se produce una corriente i_a en el embobinado de armadura, que produce fuerzas electromagnéticas, fuerzas de atracción y repulsión que provocan la rotación del eje, donde el sentido de rotación depende de la dirección del flujo de la corriente, en virtud de la ley de Lenz. Las fuerzas en los conductores de la bobina de armadura, producen un torque (T), proporcional a i_a y el flujo magnético del entre hierro. Así un motor de CD realiza la transformación de energía eléctrica a mecánica. Cabe mencionar que una parte de

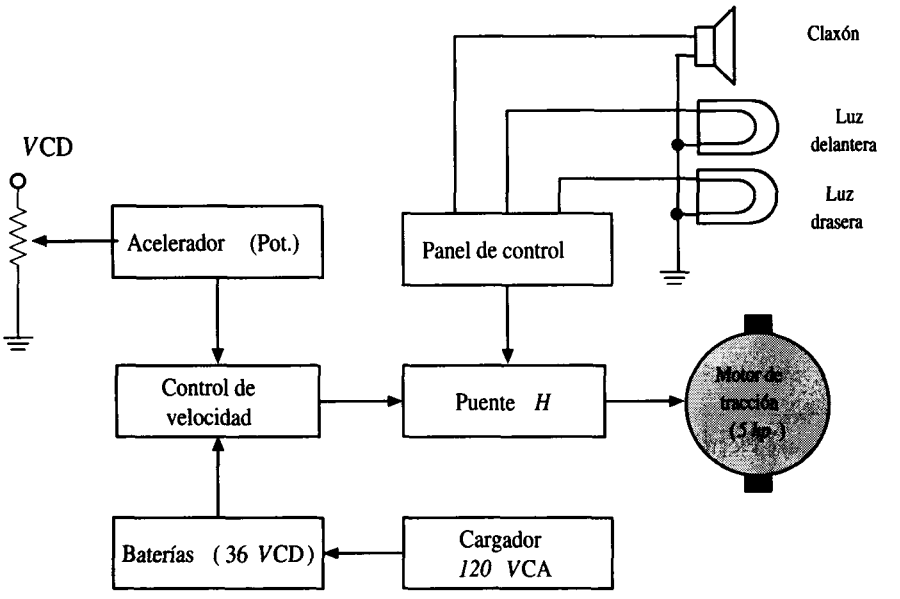


Figura 2.10: Diagrama a bloques del sistema eléctrico del vehículo móvil

dicha energía se pierde en la conversión debido a factores como el calentamiento, la inducción, entre los más importantes [Bolton 01].

El par T desarrollado por el motor es proporcional al producto de la corriente i_a de armadura, por el flujo magnético en el entre hierro ($\psi = K_f i_f$) que a su vez es proporcional a la corriente de campo,

$$T = K_f i_f K_1 i_a = K_2 i_a \tag{2.10}$$

donde $K_2 = KK_1$ y es una constante de par motriz.

Cuando la armadura del motor está girando, se induce en ella un voltaje proporcional al producto del flujo por la velocidad angular. Este voltaje tiene una dirección opuesta al cambio que lo produce y se le llama fuerza contra electromotriz,

$$e_b = K_b \frac{d\theta}{d_t} \tag{2.11}$$

donde e_b es la fuerza contraelectromotriz (f.e.m.) y K_b es una constante de fuerza contraelectromotriz.

Aplicando la ley de voltajes de *Kirchoff* a la malla del circuito de armadura, tenemos que la suma de las caídas de voltaje en la malla es igual al voltaje aplicado,

$$R_m i_a + L_m \frac{di}{dt} + e_b = e_a \tag{2.12}$$

La corriente de armadura produce el torque que se aplica a la inercia y la fricción que

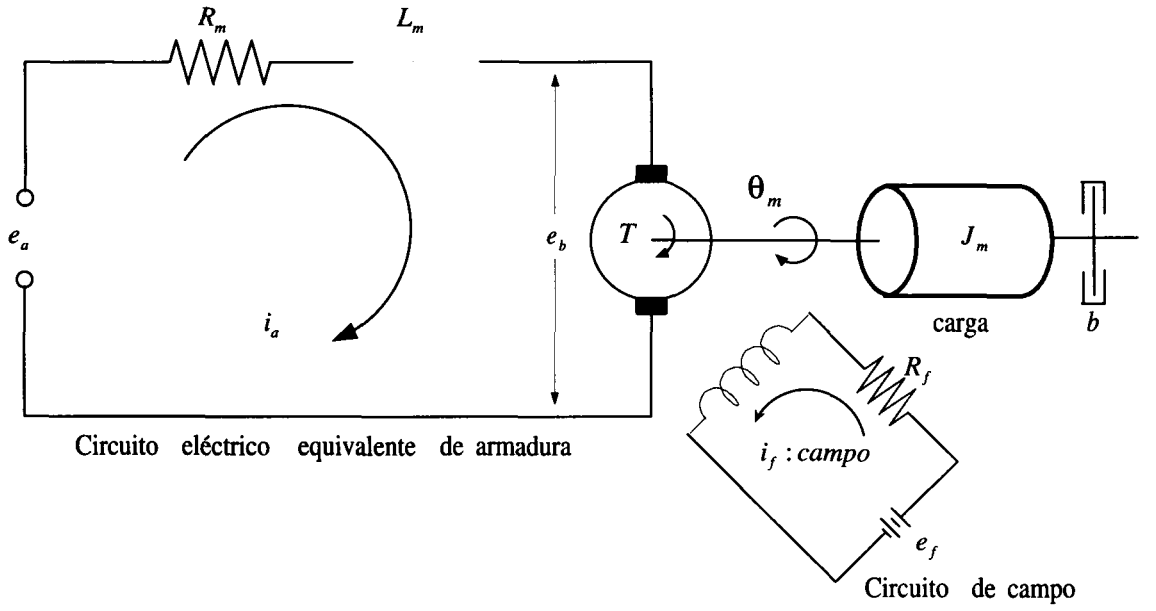


Figura 2.11: Diagrama esquemático del sistema dinámico del motor de CD

es la carga del motor,

$$T_n = T - T_a \tag{2.13}$$

donde T_n es el Torque neto y T es torque de amortiguamiento, de acuerdo al equilibrio dinámico [Beer 93],

$$J\frac{d^2\theta_m}{dt^2} + b_o\frac{d\theta_m}{dt} = T = K_2 i_a \tag{2.14}$$

Si se suponen que todas las condiciones iniciales son cero, y tomando las transformadas de Laplace de las ecuaciones (2.11), (2.12) y (2.14),

$$K_b s\Theta(s) = E_b(s) \tag{2.15}$$

$$(R_m + L_m s)I_a(s) + E_b(s) = E_a(s) \tag{2.16}$$

$$(Js^2 + bs)\Theta(s) = T(s) = K_2 I_a(s) \tag{2.17}$$

Si se considera $E_a(s)$ como la entrada y a $\Theta(s)$ como la salida, el sistema se representa mediante un diagrama a bloques tomando las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17), según se observa en la Figura 2.12.

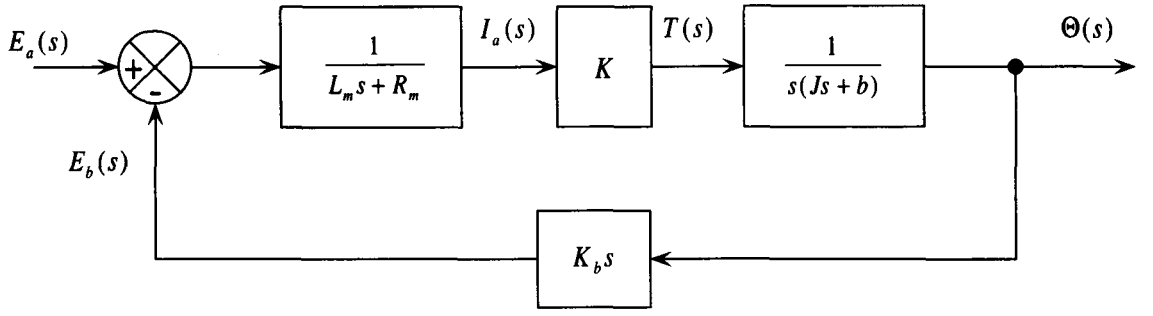


Figura 2.12: Diagrama a bloque de las ecuaciones (2.15), (2.16) y (2.17)

debido a que la inductancia de armadura L_m es muy pequeña, se desprecia. Al eliminar L_m, se obtiene la función de transferencia del motor referido a una carga,

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \tag{2.18}$$

donde $K_m = K/R_m b_m + K K_b$, es la constante de ganancia del motor.
$T_m = R_m J_m/(R_m b + K K_b)$, es la constante de tiempo del motor.

En la función de transferencia 2.18, se observa una propiedad integrativa $1/s$ que permite aproximarla a un sistema de primer orden, al verlo como un término independiente. Esta función de transferencia modela el comportamiento del motor de CD referido a una carga [Ogata 93].

2.5 Diseño

El propósito de esta etapa es generar los diseños de los sistemas mecánicos y electrónicos, así como establecer las modificaciones que permitan la automatización del sistema de dirección, que permitan controlarlo. Por lo tanto, el resultado de esta etapa son los diseños que dan inicio a la construcción física de los diferentes sistemas, además de los algoritmos de control para su implementación en la etapa posterior. La Figura 2.13 muestra los principales sistemas requeridos para automatizar la dirección del vehículo.

2.5.1 Mecánico

El objetivo es concebir las adecuaciones necesarias para la instrumentación del vehículo, así como el diseño de un mecanismo para manipular la dirección del vehículo. Debido a que el vehículo no fue diseñado para ser automatizado, la tarea de controlar el sistema de dirección requiere la implantación de un sistema mecánico que además permita la operación normal del sistema de dirección a placer, lo que incrementa su

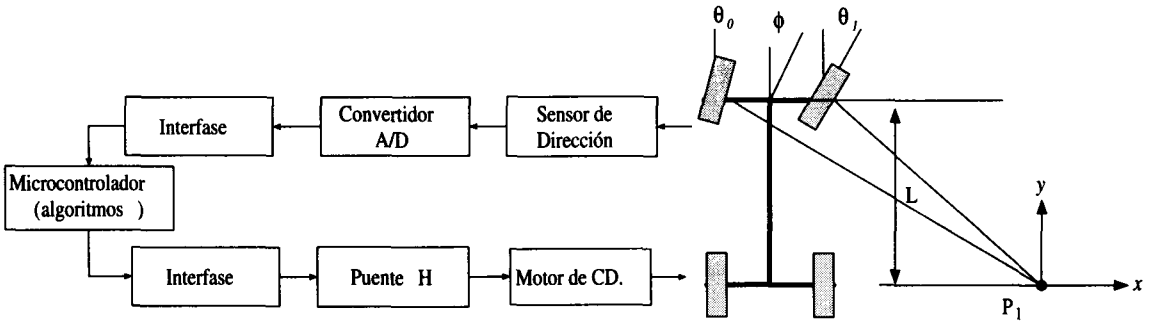


Figura 2.13: Diagrama a bloques del sistema de control y representación de la dirección del vehículo utilitario

complejidad.

El diseño del mecanismo y las adecuaciones para el control de dirección se realizarán con base a los requerimientos del sistema analizados, a través de un paquete computacional de diseño mecánico (Mechanical Desktop).

2.5.2 Electrónico

El diseño electrónico se enfocará en aquellos módulos donde se lleven a cabo el procesamiento de información, la comunicación, el sensado y la interfaz de potencia con el actuador. Los sistemas electrónicos serán realizados mediante un paquete computacional de diseño electrónico Protel, con base en los requerimientos de la arquitectura jerárquica de control.

2.5.3 Control

Debido a que la arquitectura de control del VA, se implementará en sistemas mínimos de microcontroladores los sistemas de control serán digitales.

Un sistema de control digital requiere de señales digitales como entrada, procesan la información y producen una señal que se envía al sistema de actuación, como se muestra en la Figura 2.14. La entrada R_k, representa el valor de referencia en formato digital. La diferencia entre la señal de referencia y la señal muestreada C_k, de la señal de salida, arroja el error actual del sistema E_k. El error se alimenta a un algoritmo de control, alojado en un microcontrolador, encargado del cálculo de un valor discreto M_k para corregir la salida actual. El módulo *DAC & Hold* (Digital to Analog Convert) permite convertir la señal manipulada M_k en una señal continua M, que es alimentada la planta a través de un actuador para controlar su dinámica. El sistema es retroalimentado con el valor en continuo C de la planta. La señal medida, por el

sensor, de la planta es discretizada a través de un convertidor análogo a digital (A/D) permitiendo tener una señal muestreada C_k, que cierra el lazo de control del sistema digital [Ogata 95]. Este es el modelo en el que se basará el control digital de la dirección.

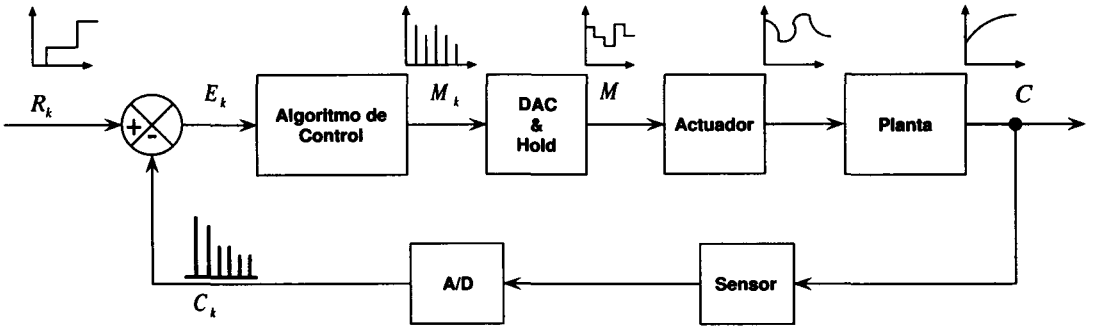


Figura 2.14: Diagrama a bloqes de un sistema de control digital

El diseño del sistema de control digital, será validado mediante el programa computacional de simulación, Matlab, con base en los requerimientos del sistema de dirección y las características del controlador digital a utilizar. La simulación se lleva a cabo al alimentar el modelo matemático del sistema del control de dirección, al programa Matlab y aplicarle una entrada escalón, con el objetivo del analizar su comportamiento.

2.6 Implementación

El propósito de esta etapa es la implantación de los sistemas desarrollados de forma segura y confiable. Las tarjetas electrónicas desarrolladas se concentraron y se aislaron dentro de un gabinete de control, el cual fue implantado en un costado del chasis del vehículo. Así como el mecanismo de actuación de dirección se implementó a un lado del volante. Por otra parte, los algoritmos de control fueron implementados en un microprocesador. La Figura 2.15 muestra dichas implementaciones.

2.7 Validación y pruebas

Finalmente, se validaron los sistemas desarrollados con el objetivo de obtener una medida de desempeño de cada uno de los sistemas y del comportamiento general del VA. La validación se realiza a través de la asignación y ejecución de trayectorias integradas por coordenadas (x, y) en el espacio de configuración. La Figura 2.16 muestra la interfaz que permite la asignación de las trayectorias, a través de la cuales se valida el sistema.

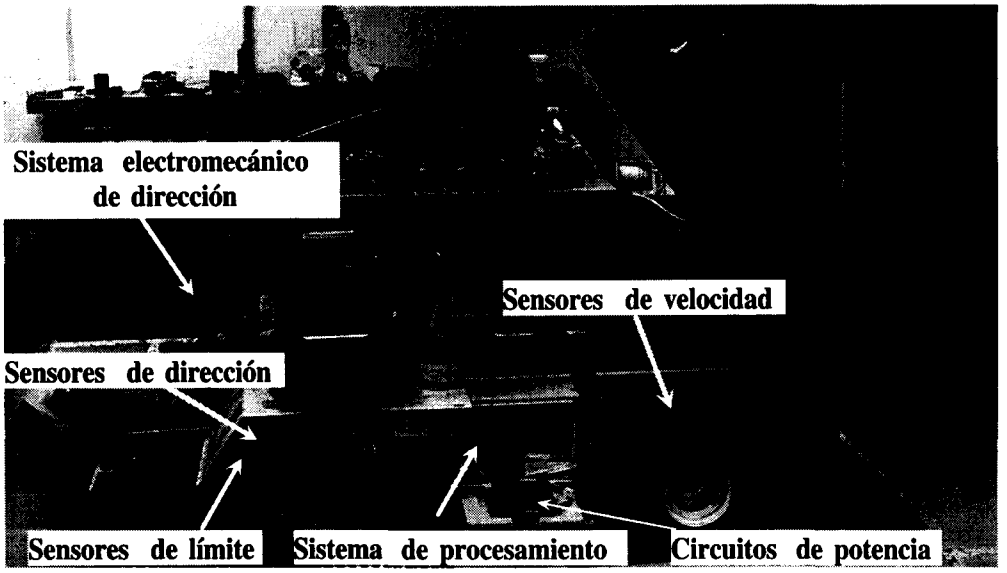


Figura 2.15: Sistemas mecánicos, electrónicos, algoritmos de control e instrumentación, implementados al vehículo para convertirlo en un VA

Mientras en la Figura 2.17 se muestra la evolución de la trayectoria ejecutada por el VA. La trayectoria asignada es una figura en forma de "⊐". Por lo tanto, al observar el resultado del recorrido de la trayectoria se aprecia la desviación obtenida. El error obtenido indica desajustes del sistema, por lo tanto los datos obtenidos serán fundamentales en la siguiente etapa para su análisis y mejora del desempeño del sistema.

2.8 Correcciones y refinamientos

En esta etapa se mejoran y corrigen defectos de los sistemas desarrollados e implementados en VA, por ejemplo se detecto una falta de ajuste en los controladores a punto y de dirección. Además, se detectaron algunos problemas en las tarjetas del panel de control y del puente H, las cuales fueron corregidas rápidamente gracias a los modelos de los circuitos electrónicos, ya que se modifican los modelos existentes y no se construyeron desde su inicio. Así como también, se corrigió el modelo de eje del motor ya que presentó algunos problemas en su embrague. Estos ajustes son resultado de la etapa de validación y pruebas.

2.9 Modificaciones

Finalmente, todos los problemas corregidos en los modelos se transforman en modificaciones físicas sobre los diferentes sistemas y mecanismo. Las modificaciones requeridas de las tarjetas electrónicas se realizaron rápidamente en el laboratorio

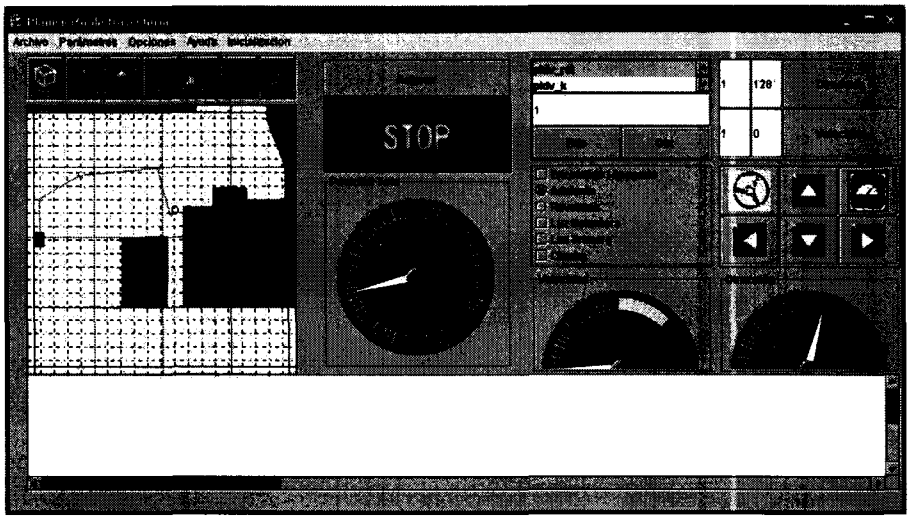


Figura 2.16: Interfaz del usuario, donde se define y envia la trayectoria al VA

de robótica, donde se mejoró la tarjeta a través de una prototipadora de circuitos impresos. El eje del motor se maquinó nuevamente, con base en el modelo corregido. Además se ajustaron algunos parámetros de los controladores del sistema.

Al termino de esta etapa, se regresó a la etapa de validación y pruebas en donde se sometió a una serie de pruebas que permitieron evaluar nuevamente el desempeño del VA. Entre otras pruebas, se evaluó nuevamente el seguimiento de la trayectoria mostrada en forma de "⊐", obteniéndose un resultado más satisfactorio que se muestra en la Figura 2.18. La gráfica muestra el recorrido del VA, donde el inicio de la trayectoria se define en $(0, 0)$, mientras el final se define en $(0, -40)$, por lo que la trayectoria cumple con el recorrido en forma de "⊐", de manera aceptable. Este ciclo se interrumpió al lograr minimizar el error obtenido, a través de una serie de pruebas de mayor dificultad y duración.

El resultado de la aplicación de esta metodología de conversión será un vehículo utilitario eléctrico de escala real capaz de realizar el seguimiento de una trayectoria sin la intervención del hombre, el cual se conoce como **Vehículo Autónomo**.

2.10 Definición de variables

A continuación se presenta una lista de términos utilizados en este Capítulo. Los términos se muestran de acuerdo al sistema que pertenecen.

Modelo cinemático

x_p : posición del vehículo en el eje x.

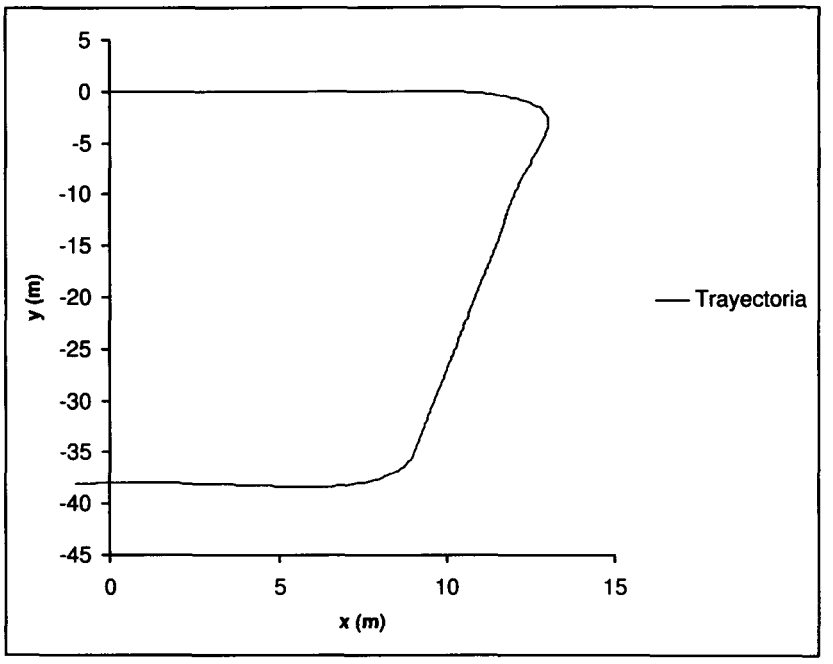


Figura 2.17: Seguimiento de primer trayectoria del prototipo del VA

y_p : posición del vehículo en el eje y.

θ : orientación del vehículo en el plano.

ϕ : dirección de las llantas delanteras del vehículo.

L :: distancia entre el eje delantero y trasero del vehículo.

R : radio del círculo que describe el vehículo, al desplazarse en el plano.

Modelo del actuador

R_m : resistencia de Armadura, en ohmios.

L_m : inductancia de armadura, en henrios.

i_a : corriente en la armadura del motor, en amperes.

i_f : corriente del campo, en amperes.

e_a : voltaje aplicado a la armadura, en voltios.

e_b : fuerza contra electromotriz, en voltios.

θ_m : desplazamiento angular, en radianes.

K_b : fuerza contra electromotriz constante, en voltios.

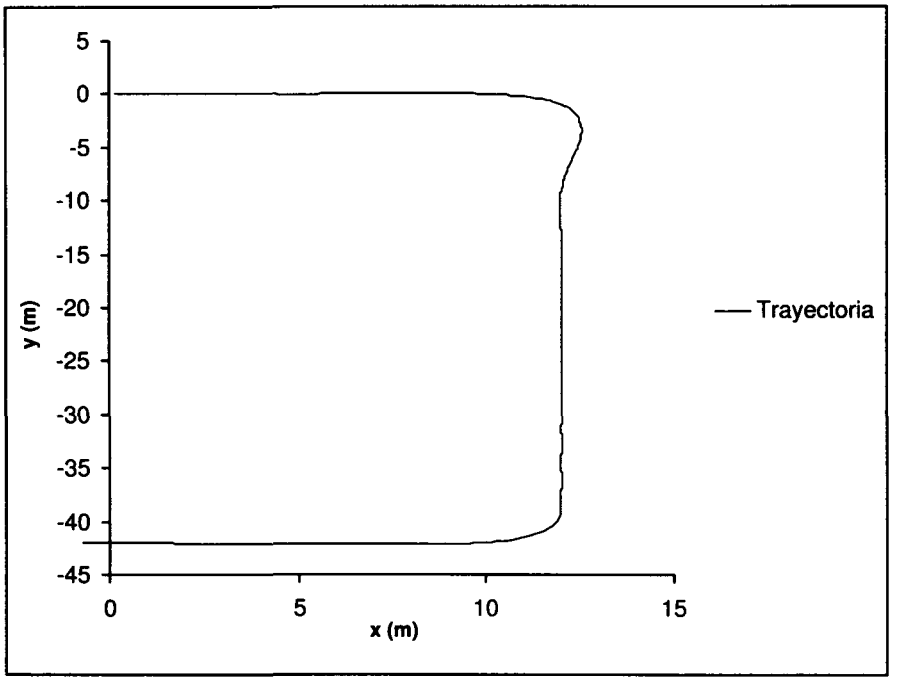


Figura 2.18: Seguimiento de trayectoria del prototipo del VA, después de realizado un ciclo de mejora

K : par motriz constante, en Newton-metro.

J_m : momento de inercia equivalente del motor con referencia al eje del motor, en $Kg - m^2$.

b_m : coeficiente de fricción viscosa del motor, referido al eje del motor, en $N - m/rad/seg$.

J_L : momento de inercia de la carga, con referencia al eje del motor, en $Kg - m^2$.

b_L : coeficiente de fricción viscosa de la carga, referido al eje del motor, en $N - m/rad/seg$.

Sistema de control discreto

R_k : entrada actual de referencia al sistema.

E_k : error actual.

M_k : variable manipulada actual.

C_k : salida actual del sistema.

M : variable manipulada continua.

C : salida del sistema continua.

Capítulo 3

Automatización de la dirección de un VA

Este capítulo describe el desarrollo de la automatización del sistema de dirección para un Vehículo Autónomo, con base en la metodología propuesta en el Capítulo 2.

El vehículo utilizado para la comprobación de esta metodología es un vehículo utilitario eléctrico de escala real, originalmente diseñado para ser operado por el humano, por lo cual consta de los sistemas básicos que le proporcionan la capacidad de locomoción, tales como: dirección, velocidad y frenado. Por esta razón, se requieren realizar adecuaciones e implementar nuevos aditamentos que permitan manipular automáticamente, al VA.

El objetivo de este trabajo es controlar de forma automática al vehículo móvil durante el recorrido de una trayectoria establecida, en función de su dirección ϕ y velocidad v, con base en su modelo cinemático. Surge así, la necesidad de automatizar el sistema de dirección mecánica del vehículo utilitario permitiendo además mantener la opción de conducción manual.

En las siguientes secciones se desarrollan las etapas de Análisis y Caracterización, Modelado y Diseño, según se presentaron en el Capitulo 2, mientras que el resto de las etapas de la metodología que se relacionan directamente con la implementación y pruebas se presentan en el Capítulo 4.

3.1 Actuación

El objetivo de esta primera fase en la automatización de la dirección del vehículo móvil, consiste en establecer un sistema que permita desarrollar la función que realiza un conductor humano. Por lo tanto, se requiere un sistema que guíe de manera automática al vehículo móvil.

Formalizando, la *Variable física a controlar* es la dirección del vehículo, mientras el sistema de dirección mecánica es la *planta* a controlar. Debido a que el vehículo no fue diseñado para ser automatizado, se requiere un sistema de corrección para manipular la dirección de llantas del vehículo. La *unidad de corrección* que permita un cambio en la planta, con el fin de modificar la variable controlada ϕ, consiste en un *actuador* [Bolton 01].

3.1.1 Análisis y Caracterización

El vehículo móvil utilizado en el desarrollo de esta tesis, se observa en la Figura 3.1. Se trata de un vehículo utilitario de cuatro ruedas con capacidad para dos pasajeros, una caja para carga y el volante que manipula al sistema de dirección.

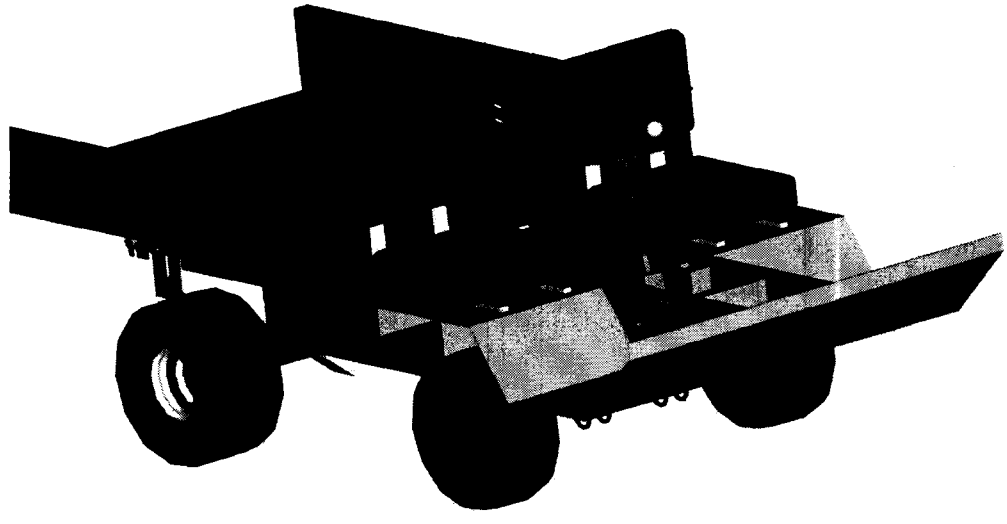


Figura 3.1: Vehículo utilitario móvil, de escala real

Con el fin de obtener las especificaciones de los parámetros más importantes del comportamiento de la planta a controlar, se realizaron una serie de pruebas y mediciones. Las pruebas consistieron en realizar una serie de giros con el vehículo, manteniendo el volante a tope, tanto hacia la izquierda como a la derecha, para obtener los límites de los radios de giros; además, se obtuvieron las dimensiones físicas del sistema, entre otros parámetros.

Según ya se mencionó, el sistema de dirección que posee el vehículo es tipo *Ackermann*; el cual se integra por una serie de elementos mecánicos acoplados entre sí que permiten manipular la dirección de las llantas, las cuales constituyen el efector final del vehículo móvil. La Tabla 3.1 muestra las especificaciones de la planta, donde el rango de trabajo está limitado por topes mecánicos.

Tabla 3.1: Especificaciones del sistema de dirección mecánica

Dirección	Mecánica
Tipo	Ackermann o KingPins
Caja reductora	6 vueltas(límite)
Distancia entre ejes: $L(m)$	1.21
Radio de Giro: R (m)	
Derecha	1.17
Izquierda	1.76
Ángulo de llantas: ϕ $(^o)$	
Derecha: ϕ_1	51.99
Izquierda: ϕ_0	39.99

Un parámetro fundamental en el desarrollo del sistema de control es el torque; requerido para manipular la planta (dirección). Su caracterización se realizó a través de una serie de pruebas consistentes en medir el torque necesario para manipular la dirección a través del volante del vehículo. Las pruebas se realizaron sobre diferentes superficies y condiciones de trabajo, mientras que la medición se realizó directamente sobre el eje del volante. Dichas mediciones se realizaron mediante un instrumento para medición de torque, llamado torquímetro.

Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 3.2, donde se observa que el mayor esfuerzo requerido para manipular las llantas es cuando el vehículo se encuentra estático y sin carga. Se determinó que el esfuerzo es mayor debido a que, además del momento inercial del sistema y el coeficiente de fricción de las llantas contra la superficie, el peso vehicular recae directamente sobre el volante. Sin embargo, cuando el vehículo se encuentra en movimiento la potencia del motor de avance ayuda de forma importante al rompimiento de la estática que presenta en estado estacionario.

Tabla 3.2: Datos de medición de torque

Condiciones de medición del vehículo	Torque medido (Nm)
Estático sin carga	15
Estático con carga	10
En movimiento sin carga	5
En movimiento con carga	5

3.1.2 Modelo

El sistema de dirección del vehículo utilitario se modeló en un programa para diseño mecánico (*Mechanical Desktop*). El modelo generado del sistema de dirección se observa en la Figura 3.2, el cual se integra por un volante acoplado directamente a una caja de dirección o reductor, la cual transfiere el movimiento rotacional del volante hacia las llantas por medio de dos extensiones mecánicas y un balero, conocido como

bota, que manipula la posición de la llanta derecha. Posteriormente, el movimiento es transferido a la llanta izquierda por medio de la barra de Ackermann que une ambas botas.

El modelo mecánico del sistema de dirección, facilita el diseño de la unidad de corrección cuya función es manipular la dirección del vehículo. Además del vehículo, se modeló el sistema de corrección y el actuador. Otra ventaja de contar con el modelo del sistema es que permite realizar el ciclo de corrección y refinamientos de una forma rápida y precisa.

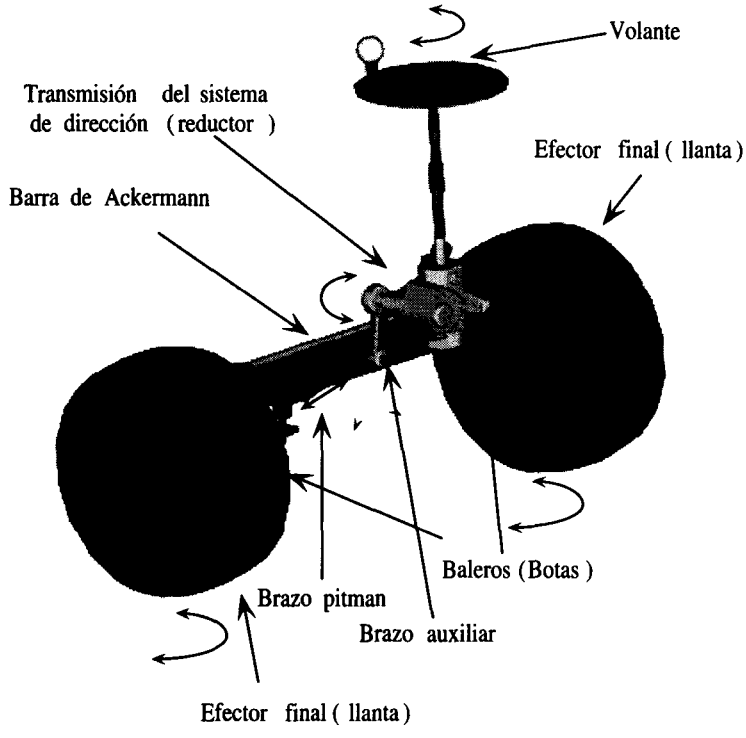


Figura 3.2: Componentes que integran al sistema mecánico de dirección, del vehículo utilitario eléctrico

3.1.3 Diseño

El objetivo de esta etapa es generar un sistema que permita manipular la dirección de las llantas de forma automática, además de tener la opción de conducción manual según se requiera.

Con la necesidad de automatización, se inicia el proceso de diseño donde una de las primeras fases es determinar el tipo de actuador a utilizar. Recordando las diferentes tecnologías de actuadores existentes, tales como: CA, CD, hidráulica y neumática entre otras, en nuestro caso, es mejor utilizar un actuador de CD debido

a que se alimenta de la misma fuente de energía utilizada por el vehículo, evitando así la transformación de energía.

La siguiente fase es determinar específicamente el punto de actuación en el sistema de dirección. La Figura 3.2 muestra el sistema de dirección del vehículo, donde podemos observar que es posible manipular la rotación de las llantas en cualquier punto del sistema mecánico, desde el volante hasta los baleros. Sin embargo, para determinar la solución más viable al problema se presenta un procedimiento sistemático, basado en técnicas de evaluación de diseño, consistente en los siguientes pasos:

- Se realizan una lluvia de ideas y se seleccionas las propuestas más viables.
- Se enlistan las propiedades más importantes de cada propuesta a solución.
- Se asignan un valor, representando el grado de importancia de cada propiedad.
- Se califican las propiedades de cada propuesta en una escala del 0 a 10.
- La calificación final se obtiene sumando las calificación asignadas al ponderarse, con base en el grado de importancia.
- Se establece la propuesta de mayor puntaje como la solución al problema.

Los resultados del procedimiento anterior para la selección del punto de manipulación, se muestran en la Tabla 3.3. En la Tabla, se presentan las ideas de manipulación más viables, tales como manipulación en: llanta, barra de Ackermann y volante, además de las propiedades de mayor trascendencia del sistema. Por otra parte, se observan las evaluaciones de cada una de las propuesta. Las propiedades evaluadas más relevantes en el diseño del sistema son acoplamiento y facilidad de uso. Por lo tanto, el punto de actuación se establece en el eje del volante.

Tabla 3.3: Evaluación de las propuestas para el lugar de actuación

Propiedades		Grado de importancia	Manipulación en:		
			Llanta	Barra de A.	Volante
Acoplamiento	Facilidad de implementación	5	30	25	40
	Costo de implementación	5	25	40	40
Facilidad de uso	Opción de manual	5	50	50	50
	Cambio manual-automático	4	8	20	32
Gasto	Potencia demandada	4	5	10	30
Dimensiones	Reducidas	4	20	24	20
Adecuaciones en	Estructura	3	9	27	18
	Mecanismo	5	40	257	50
Sensado	Precisión	5	50	40	30
	Facilidad de acoplamiento	5	50	50	50
		Evaluación	287	311	**360**

Ahora bien, la selección del actuador se realiza con base en los requerimientos del sistema de dirección, analizado y caracterizado anteriormente, los cuales se en listan a continuación:

- Fuente de Voltaje (V): 36 VCD
- Torque de salida requerido (M): $15Nm \Rightarrow 2120\ oz - in$
- Velocidad del volante, requerida (n): 90 rpm
- Tamaño compacto
- Potencia de salida: (P_o)

La selección del actuador depende básicamente de los requerimientos de carga, (P_o), que será aplicada sobre el punto de actuación seleccionado. Por lo tanto, es necesario determinar la potencia requerida para manipular al sistema de dirección. La potencia requerida, por la planta, se obtiene a través de la siguiente relación,

$$P_o = n \cdot M \tag{3.1}$$

donde P_o es la potencia rotacional mecánica, n es la velocidad angular, determinada por simulación en 90 rpm, M es el Torque requerido, medido en 15 Nm.

De acuerdo a las especificaciones de la planta,

$$P_o = \frac{(90\ rpm) \cdot (2120\ oz - in)}{1350} = 141\ Watts$$

donde 1350 factor de conversión, al convertirse en caballos de fuerza,

$$P_o = 0.1897 \quad hp$$

Sin embargo, para asegurar que la potencia de salida no se vea afectada por pérdidas por fricción o potencia, se considera para la selección del actuador un factor de seguridad del 1.5 a 2. Con base en este margen se obtiene la potencia requerida,

$$P_o = 211.5 \ - \ 282 \ Watts$$

que al convertir en caballos de fuerza,

$$P_o = 0.285 \ - \ 0.3794 \quad hp$$

En la Tabla 3.4 se muestran los parámetros más importantes y los actuadores que cumplen con los requerimientos del sistema. Analizando los actuadores presentados, podemos observar que el motor de pasos requiere corriente alterna para su operación.

Como el vehículo opera con corriente continua provista por un banco de baterías, la conversión a alterna representa una desventaja, respecto a las demás opciones. Por otra parte, el servo motor cumple todos los requerimientos del sistema y tiene como ventaja su gran precisión. Sin embargo, debido a que el punto de manipulación se encuentra muy alejado del efector final, que son las llantas, su ventaja se vuelve irrelevante, pues ignora las amortiguaciones, holguras y demás efectos debidos a la distancia entre el actuador y el efector final. Por lo tanto, la opción más viable que satisface los requerimientos del sistema, además de ofrecer un costo y tiempo de adquisición por debajo del resto de las opciones, es el motor de CD con escobillas de imán permanente .

Tabla 3.4: Comparación de actuadores eléctricos

Características de Operación		Motores de CD		
Parámetros Requeridos		Servo	Con Escobillas	Pasos
Voltaje de operación	0-36 VCD	24	36	120VCA
Torque nominal	15 Nm	20	16	12
Velocidad de operación	90 rpm	200	100	90
Costo	Accesible	Alto	Bajo	Medio
Tiempo de entrega	Semanas	6	1	4

El actuador seleccionado es un motor de CD con escobillas de imán permanente, que se muestra en la Figura 3.3. Originalmente el actuador fue utilizado en sistemas de posicionamiento de antenas parabólicas, debido a su potencia. El actuador tiene integrada una transmisión, para elevar su potencia de salida, con lo que surge la necesidad de hacer algunas adecuaciones para su implantación. Las adecuaciones se muestran en el Apéndice A.

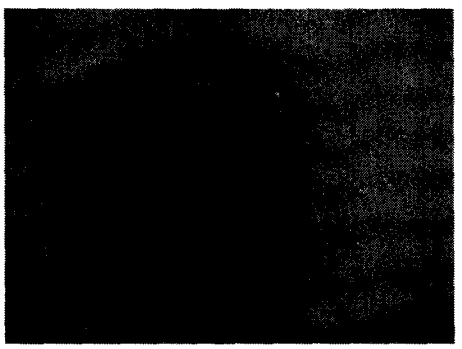


Figura 3.3: Actuador de 36 VCD, integrado por un motor de imán permanente y una transmisión

Finalmente, se define el acoplamiento entre el actuador y el volante. Para la selección del tipo de acoplamiento se realizó un ejercicio donde se presentan y comparan las propiedades de los diferentes tipos de acoplamientos propuestos. La Tabla 3.5 muestra la comparación entre los tipos de acoplamiento, donde se observa que el acoplamiento a

través de banda asíncrona y engranes tipo corona son las opciones que cumplen con el objetivo planteado. Sin embargo, el acoplamiento mediante engranes tiene una mayor ventaja que el uso de banda, al momento de acoplar y desacoplar. Por lo tanto, la forma de acoplamiento elegida, con base en el análisis anterior, es mediante engranes tipos corona o "bevel".

Tabla 3.5: Comparación de propiedades de acoplamiento para actuador

Propiedades de Acoplamiento	Tipos de Acoplamiento		
	Cople rígido	Engranes tipo "bevel"	Bada asíncrona
Conducción automática	Si	Si	Si
Conducción manual	No	Si	Si
Facilidad de acoplamiento	No	Si	Si
Facilidad de desacoplamiento	No	Si	No
Precisión	Alta	Media	Media
Costo	Bajo	Media	Alto

Los engranes tipo "bevel" se muestran en la Figura 3.4, donde se observa los engranes actuando en forma perpendicular. Esta característica proporciona una gran ventaja en el acoplamiento.

Ahora, sólo resta diseñar el mecanismo de acoplamiento con base en el modelo generado del sistema de dirección.

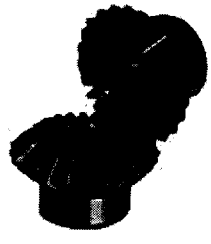
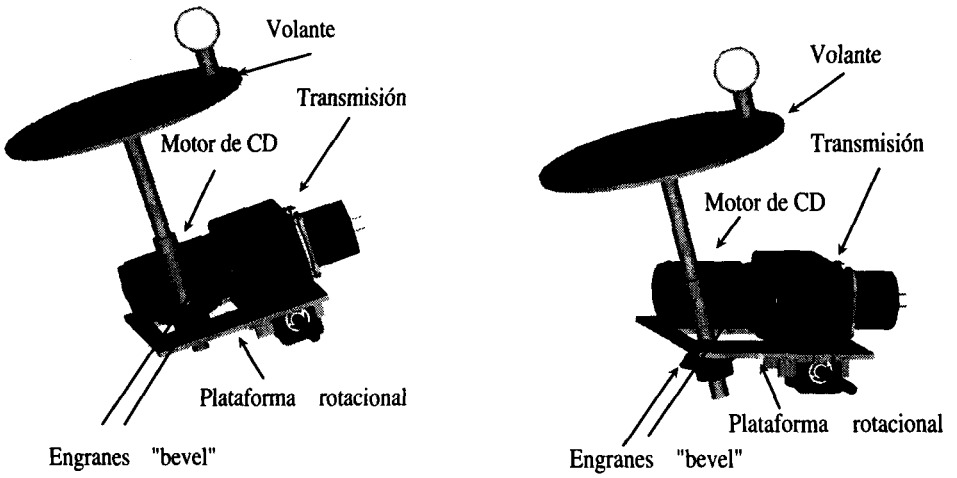


Figura 3.4: Engranes "bevel", perpendiculares con relación 1 : 1

El mecanismo diseñado para manipular la dirección del vehículo de forma automática, a través del volante mediante el motor de CD, se muestra en la Figura 3.5. En la Figura 3.5(a), se observa el sistema acoplado al volante, mediante los engranes "bevel". Mientras que en la Figura 3.5(b), se muestra el sistema desacoplado. Así, de esta forma el vehículo se puede operar de manera manual a través del volante. Gracias a que la plataforma donde se encuentra montado el actuador posee un movimiento rotacional, es posible un acoplamiento rápido y sencillo al momento de cambiar de manual a automático y viceversa.



(a) Sistema electromecánico acoplado (b) Sistema electromecánico desacoplado

Figura 3.5: Sistema electromecánico para el cotrol de dirección del VA, en sus dos modos de operación: automático y manual

3.2 Sensado

Un sensor permite adquirir la información para controlar un proceso, retroalimentando información al sistema de control. En la Figura 2.11 se muestra un sistema de control digital, donde el lazo de retroalimentación lo integra un sensor, cuya función es convertir el parámetro físico en una señal eléctrica, así como una etapa de acondicionamiento, mediante la cual se convierte la señal sensada a una señal compatible con el sistema de procesamiento. En nuestro caso la señal se convierte en digital, debido a que este desarrollo utiliza microcontroladores. En esta sección se presenta el desarrollo de un sensor de posición angular que permite medir la dirección, ϕ, de las llantas del vehículo.

3.2.1 Análisis y Caracterización

Existen una gran variedad de transductores basados en diferentes principios físicos, para sensar posición angular. Sin embargo, se plantea el uso de un potenciómetro como transductor debido a su bajo costo, a su facilidad de uso, de adquisición e instalación, en comparación con otros dispositivos utilizados para este propósito.

La selección del tipo de potenciómetro a utilizar se realizó con base en el análisis de tres tipos diferentes: el primero es un potenciómetro de carbón de una vuelta; el segundo es un potenciómetro de alambre de tres vueltas; el tercero es un potenciómetro de alambre de diez vueltas de precisión. Sin embargo, la primera de las opciones se descartó durante la selección, debido a que presentaba una gran inestabilidad en estado estacionario, quedando en plena desventaja respecto al resto. Los transductores se analizaron y caracterizaron bajos las mismas condiciones operacionales En la

caracterización se utilizó un equipo, rotacional de precisión, CNC para obtener las principales características de funcionalidad. La Tabla 3.6 muestra los resultados de las pruebas realizadas, donde el potenciómetro de diez vueltas presenta un mejor desempeño; siendo por consiguiente el transductor seleccionado para conformar el sensor de dirección. Las pruebas realizadas consistieron en manipular los potenciómetros a través del equipo CNC, con ello se obtuvieron los parámetros de histéresis, repetibilidad y precisión de dichos transductores.

Tabla 3.6: Comparación de las principales características de potenciómetros analizados

Características de operación	Potenciómetros de alambre	
	3 Vueltas	10 Vueltas
Rango de trabajo	-40°, 40°	-40°, 40°
Escala completa	80°	80°
Histéresis	2.275°	0.365°
Repetibilidad	1.25°	.125°
Precisión	2.15 %	1 %

3.2.2 Modelo

Los sensores basados en potenciómetros actúan como divisores de voltaje al varíar su resistencia en función del desplazamiento o rotación. La Figura 3.6 muestra el circuito eléctrico de un potenciómetro utilizado como transductor de posición, donde el voltaje (V) a través del contacto del potenciómetro es proporcional al desplazamiento d, teniendo un divisor de voltaje como se muestra en la ecuación (3.2). Este tipo de transductores se clasifican como activo, debido a la corriente eléctrica que pasa a través de la resistencia. Sin embargo, su bajo costo, fácil adquisición y uso, lo hace atractivo para el desarrollo experimental, además de brindar una buena resolución.

$$V = E \cdot \frac{d}{D} \tag{3.2}$$

donde D es el desplazamiento total y E es el voltaje de la fuente de alimentación. Se sobre entiende que el circuito de interfaz no representa una carga al potenciómetro [Everett 95]. Sin embargo, el potenciómetro utilizado es tipo rotacional y la medición del ángulo de excitación ϕ se determina de acuerdo a la relación 3.3.

$$\phi = \frac{R_1 \theta_T}{R_T} = \frac{V \theta_T}{E} \tag{3.3}$$

donde R_1 es el valor de la resistencia, R_T es resistencia total, θ_T es el ángulo total de giro, V es voltaje de salida y E es voltaje de entrada.

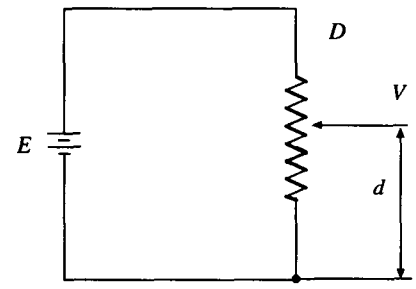


Figura 3.6: Esquema eléctrico del potenciómetro rotacional, utilizado como transductor.

3.2.3 Diseño

El sensor de dirección, basado en un potenciómetro como transductor, se realizó con base en el diagrama de la Figura 3.7, donde se observa una secuencia de procesos desde la adquisición de la señal análoga, mediante un transductor y amplificador, pasando por un filtro pasa bajo. El filtrado es necesario debido a la suma de ruido inherente a la adquisición. Posteriormente la señal pasa por un conmutador, un retenedor y finalmente se convierte en una señal digital utilizable por el sistema digital [Ogata 95].

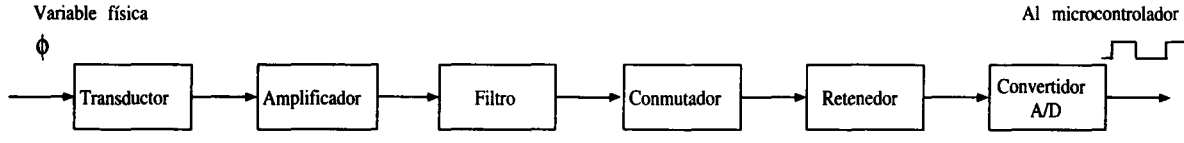


Figura 3.7: Diagrama a bloques de un sistema de adquisición, utilizando un potenciómetro rotacional como transducor

El sistema de adquisición se desarrolló con base en un convertidor A/D de aproximaciones sucesivas de 8 *bits* con un error de $\pm 1LSB$, por lo tanto la resolución está condicionada al ADC.

Una vez desarrollado el sensor se obtuvieron sus principales características de desempeño, las cuales presentan a continuación [Everett 95]:

- **Escala de entrada total**, en inglés llamada *span*, se refiere al rango dinámico del estímulo análogo que puede ser convertido por el sensor. El rango total de entrada va desde $-40°$ hasta $40°$, considerando $0°$ cuando las llantas se alinean al chasis del vehículo, equivalente a un span de $80°$.
- **Escala de salida completa**, denominada (FSO), es la diferencia algebraica entre la señal eléctrica de salida, medida con el máximo estímulo de entrada, y el mínimo estímulo de entrada aplicado. El cual es de 0.361 *Volts*.

- **Exactitud**, considerada una de las características más importantes de un sensor, aunque esta característica realmente mide la inexactitud del dispositivo. La inexactitud se mide como la máxima desviación de un valor que interpreta el sensor, con respecto a un valor ideal o real en función de una entrada. Partiendo de la función de transferencia ideal, la cual es lineal, para un desplazamiento de 0.3125° se debe generar un voltaje de 1.401 mv; por lo tanto, se tiene una sensibilidad ideal de 4.4832 $mV/°$. Sin embargo, al realizar una medición de $-40°$ a $-25°$, lo cual considera un incremento de $s = 15°$, se obtuvo un valor de $S = 67\ mV$. Si se convierte este valor a posición en base a su función de transferencia,

$$s_x = \frac{S}{b} = \frac{67mV}{4.4832mV/°} = 14.94468°$$

En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento del sensor ideal y del sensor real, obteniéndose una exactitud de 0.3 %.

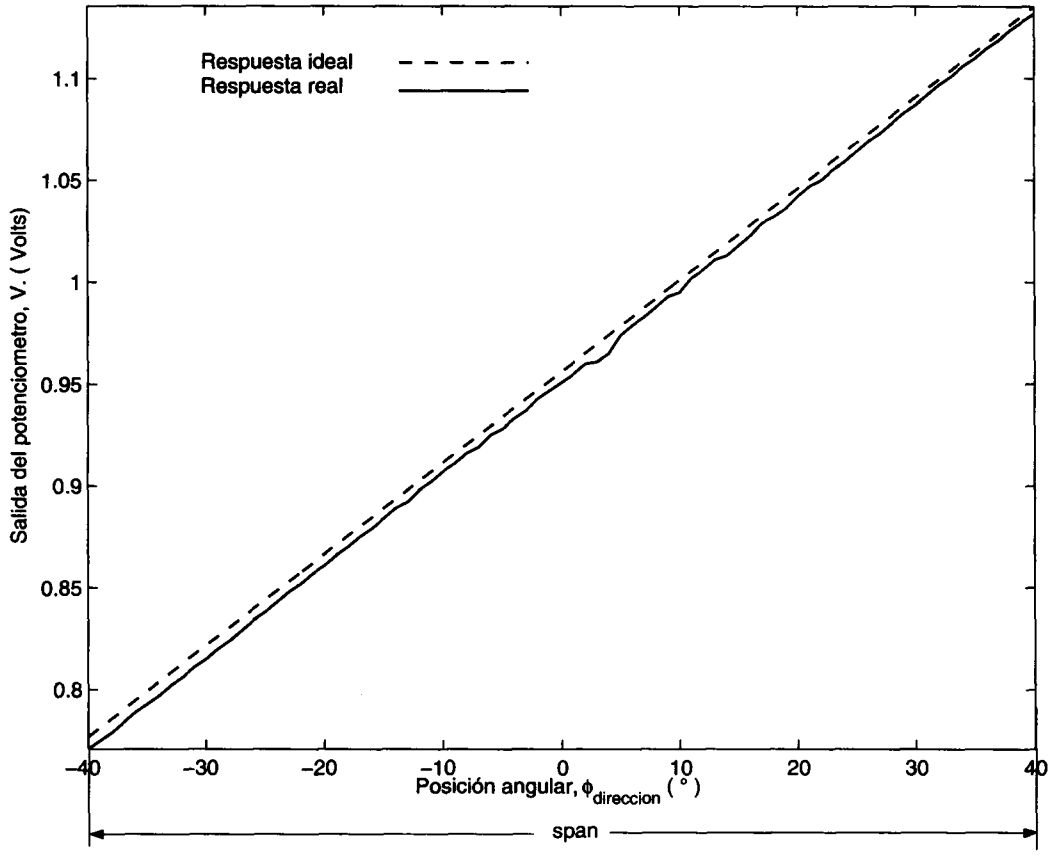


Figura 3.8: Función de transferencia del comportamiento del sensor de dirección.

- **Histéresis** es la desviación de la salida del sensor en un punto específico de la señal de entrada, cuando se aproximan en ambas direcciones. La Figura 3.9, muestra la histéresis del sensor de dirección donde se observa una histéresis máxima de 1.27°, equivalente a 4.017 LSB.

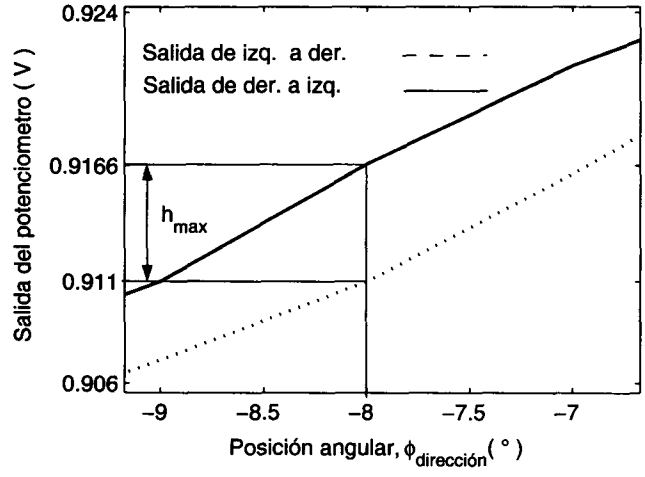


Figura 3.9: Histéresis máxima, del sensor de dirección.

- **Error de Nolinealidad** es la máxima desviación entre la función de transferencia real del sensor respecto a una función aproximada del sensor, suponiendo un comportamiento lineal. La linealidad que posee este transductor es de 0.1 %.

3.3 Control

La tarea del módulo de control, del sistema de dirección del vehículo, es mantener las llantas del vehículo en un determinado ángulo de referencia, gracias a un controlador digital, siguiendo una estrategia de control. La estrategia de control se establece, con base en el modelo del sistema dinámico de la dirección. Una de las principales desventajas de esta técnica es no contar con un modelo exacto del sistema, debido a la gran cantidad de parámetros involucrados. Sin embargo, generalmente es suficiente un modelo que sea representativo del sistema dinámico [Ogata 93].

En esta sección se presenta el desarrollo del sistema de control, basado en el modelo matemático de la planta.

3.3.1 Análisis y Caracterización

El sistema de dirección del vehículo se integra por una serie de elementos mecánicos, tales como engranes, baleros y varillas que permiten transferir el movimiento rotacional del volante, en movimiento lineal de la barra de Ackermann. Este mecanismo conocido también como barra de acoplamiento, une a los baleros que se convierten en puntos de pivoteo. El eje de rotación de la dirección de las llantas, el cual se encuentra inclinado respecto a la vertical. La Figura 3.10 muestra el sistema de dirección del vehículo, que en el contexto de control constituye *la planta*. Donde se observa el *actuador* acoplado al eje del volante a través de engranes tipo "bevel", con una relación 1 : 1, que al activarse transmite el torque

del motor hacia el reductor o transmisión del sistema de dirección. Por su parte, el reductor tiene una relación de 6 : 1 y su salida está acoplada al balero a través del brazo pitman y el brazo auxiliar sobre el cual se encuentra montada la llanta derecha de la dirección. La llanta izquierda se acopla a través de la barra Ackermann al sistema.

La planta se puede simplificar a un sistema equivalente de un momento de fricción viscosa, un momento de inercia equivalentes y un factor que vine a multiplicar el torque, además de reducir la velocidad, debido a los diferentes trenes de engranes. El sistema completo se analiza en el Apéndice C, donde se obtienen los parámetros que simplifican al sistema de dirección, tales como el momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa.

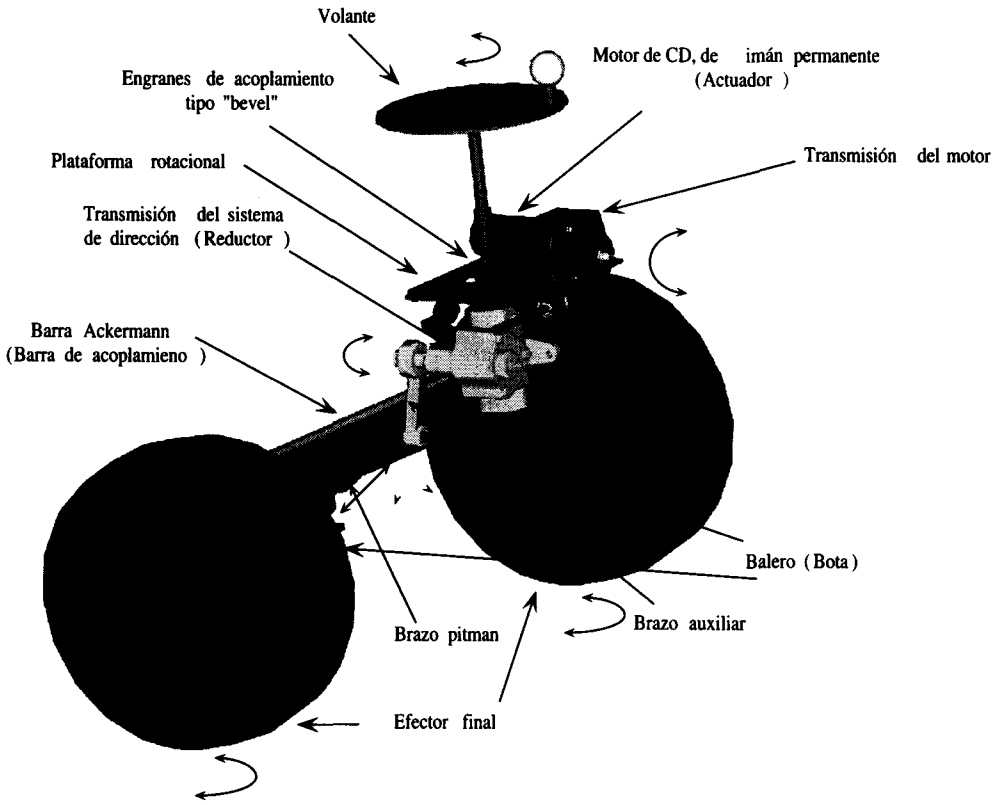


Figura 3.10: Sistema dinámico de dirección del vehículo, planta

3.3.2 Modelo

En un sistema de control el modelo matemático se define por la función de transferencia del sistema, la cual relaciona la variable de salida con la variable de entrada. Considerando el modelo de la Sección 2.4.1 (Figura 1.9), el diagrama a bloques del sistema de control de dirección, se muestra en la Figura 3.11, donde $G_c(s)$

representa el controlador, el actuador y la planta están representados mediante el lazo directo y el lazo de retroalimentación interno. Por su parte, el sensor es el lazo de retroalimentación externo del sistema de control.

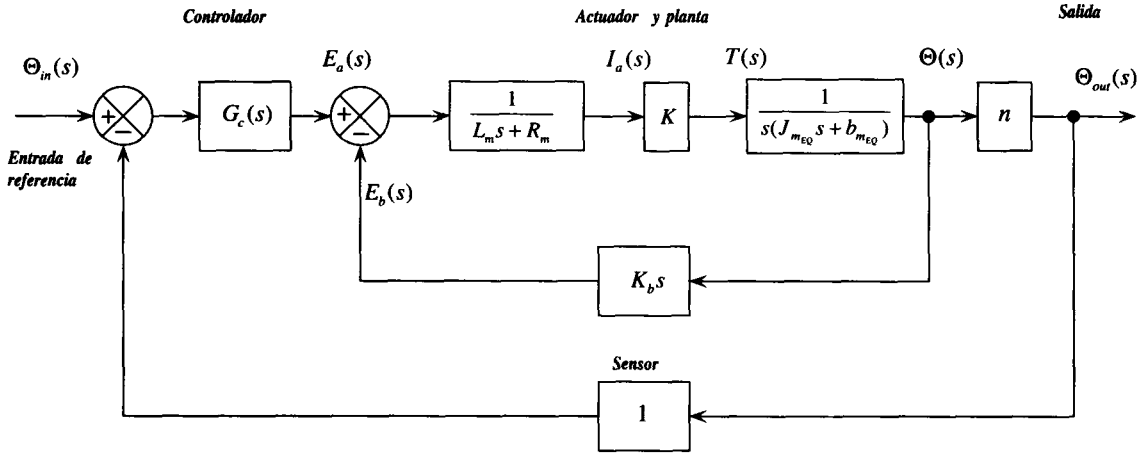


Figura 3.11: Diagrama del control de lazo cerrado de la dirección

Simplificando el diagrama a bloques del actuador, obtenemos el diagrama de la Figura 3.12, $K_{me} = K/R_m b_{mEQ} + KK_b$ es la constante de ganancia del motor, $T_{me} = R_m J_{mEQ}/(R_m b_{m_EQ} + KK_b)$ es la constante de tiempo del motor y $n = (n_1/n_2)(n_4/n_5)$ es la relación de engranes.

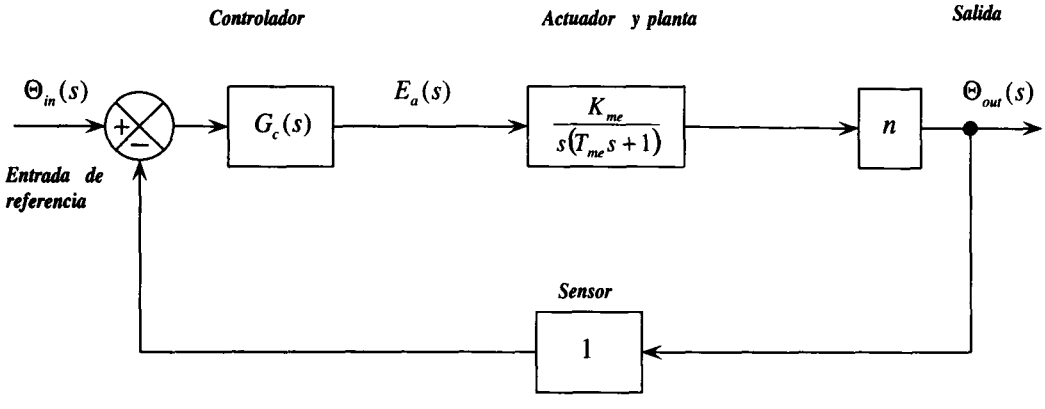


Figura 3.12: Diagrama a bloques del sistema de control simplificado

La función de transferencia del sistema, en Laplace, se obtiene del diagrama a bloques simplificado, donde $\Theta_{in}(s)$ es entrada y $\Theta_{out}(s)$ es salida.

$$\frac{\Theta_{out}}{\Theta_{in}} = \frac{G_c(s) K_{me} n}{s(T_{me} + 1) + G_c(s) K_{me} n} \tag{3.4}$$

Finalmente, los parámetros del sistema K_{me} y T_{me} son datos de la planta y del actuador, desconocidos. n es la relación conocida, de los engranes $\frac{n_1}{n_2}\frac{n_3}{n_4}$. Sin embargo, los parámetros desconocidos son necesarios para sintonizar el controlador de forma apropiada. En la Sección 3.3.3 de diseño se obtendrán las constantes que permitirán la sintonización del sistema.

3.3.3 Diseño

La estrategia de control a utilizar es una acción de control tipo Proporcional y Derivativo (PD), debido a sus características de funcionalidad. Este tipo de acción de control se caracteriza porque al cambiar la señal de error, el controlador produce una salida de gran magnitud, debido a que es proporcional a la rapidez de cambio del error y no a su valor. Este comportamiento produce un efecto donde la acción derivativa se adelanta a la acción proporcional. Aunque esta respuesta puede ser considerada como una desventaja, en nuestro caso se convierte en un beneficio, debido a que este comportamiento ayuda al sistema de dirección a romper el momento inercial. Además esta acción de control mantiene un sistema del tipo 1, ya que no aumenta los polos de lazo cerrado.

La acción de control automático Proporcional-Derivativo (PD), se define por la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de}{dt} \tag{3.5}$$

mientras que la función de transferencia del controlador PD, se expresa:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p\,(1 + T_d s) \tag{3.6}$$

donde K_p y T_d representan la *ganancia proporcional* y el *tiempo derivativo*, o tiempo de adelanto, respectivamente. Ambas constantes son regulables y definen el comportamiento del controlador.

La mayoría de los métodos de sintonización requieren conocer los parámetros del proceso para sintonizar el controlador utilizado. Los parámetros que identifican a un proceso son: la constante de ganancia K_{me}, que indica la sensibilidad del proceso, es la variable controlada, respecto a un cambio en el controlador; la constante de tiempo T_{me}, indica que tan rápido cambia la variable controlada; el tiempo muerto t_0, indica el tiempo que tarda el controlador en detectar el inicio de un cambio en la variable de salida.

En la actualidad existen diversas técnicas para sintonizar controladores, tales como: autosintonización, mediante mínimos error integral, entre otras. Sin embargo,

Ziegler y Nichols desarrollaron un técnica en 1950, y a pesar de ello es una de las técnicas más utilizadas hoy en día, debido la su eficacia y facilidad que presentan. Por lo tanto, el ajuste de los parámetros del controlador PD se realizan con base en la técnica de sintonización de *Ziegler-Nichols*, la cual requiere los parámetros de comportamiento dinámico de la planta. Las fórmulas de sintonización se muestran en la Tabla 3.7.

Los parámetros del comportamiento dinámico de la planta t_0, T_{me} y K_{me} son desconocidos; por lo cual se aplicará una técnica de caracterización con el objetivo de aproximar estos parámetros. Existen diferentes técnicas de caracterización de procesos dinámicos, sin embargo se tiene una mejor aproximación de los parámetros reales a través de la prueba de lazo abierto. Esta prueba consiste en la aplicación de una señal escalón suficientemente grande a la entrada de la planta para medir el cambio en la salida, como se observa en la Figura 3.13. La señal de entrada manual, en el esquema, es la variable manipulada y la salida representa la salida de la planta, el ángulo de dirección ϕ. El objetivo de la prueba es aproximar el sistema a un sistema de primer orden con tiempo muerto [Smith 02].

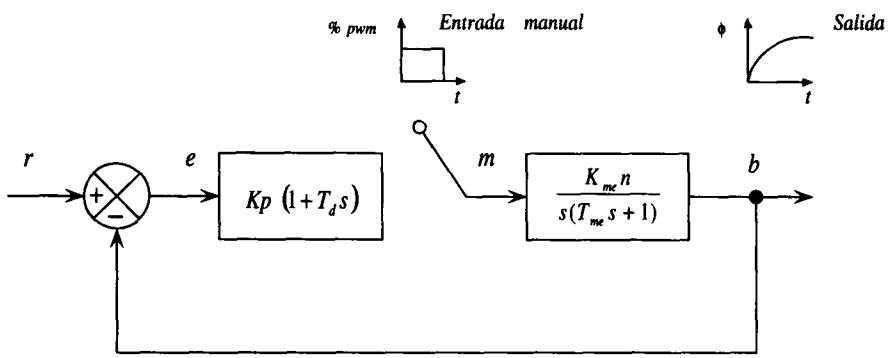


Figura 3.13: Método de caracterización de la planta en lazo abierto

El método de caracterización de la planta en lazo abierto, consiste en las etapas siguientes:

1. Se aplica a la planta en lazo abierto una señal tipo escalón (m).
2. Se registra la salida del sistema (b), y se almacena.
3. Se analizan los datos, gráficamente.
4. Gráficamente, se determinan los parámetros de la planta: K_{me}, T_{me} y t_0.

El método requiere que la adquisición del comportamiento de salida (ϕ), se realice mediante un dispositivo que posea una velocidad de respuesta mayor a la del proceso. Además, el dispositivo de medición requiere una sensibilidad mayor, comparada con

la resolución de respuesta del sistema, con el propósito de no perder ningún dato de la variable de salida. El dispositivo utilizado en la medición fue el sensor de ángulo desarrollado, de forma que los requerimientos de la prueba fueron cubiertos de manera apropiada.

En la Figura 3.14 se muestra la señal de entrada que se aplicó a la planta, de manera manual, que constituye la variable manipulada. En este sistema de control, la variable manipulada es el porcentaje del ciclo de trabajo del voltaje de la fuente de poder, que posee un rango de 0 % a 100 %; esta técnica se conoce como modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés). La respuesta de salida es el ángulo de dirección de las llantas del vehículo ϕ.

La ganancia del sistema en estado estable es uno de los parámetros más importantes que caracteriza a cualquier sistema dinámico. La ganancia de la planta se define como el cambio en estado estable dividido entre el cambio en la entrada que produjo ese cambio,

$$K = \frac{\Delta b_s}{\Delta m} \tag{3.7}$$

donde K representa la ganancia del proceso; se define como el porcentaje de la salida en proporción al porcentaje en la entrada. Δb_s representa el cambio en la señal transmitida; se define como el porcentaje de la salida transmitida. Mientras Δm define el cambio en la salida del controlador que representa el porcentaje en la salida del control.

Por tanto, y de acuerdo a el porcentaje de señal de entrada y el porcentaje de respuesta del ángulo de salida,

$$K = \frac{28.75\,\%}{100\,\%} = 0.2875 \tag{3.8}$$

El siguiente paso es analizar la respuesta de salida para extraer las características de la planta, como resultado de la señal aplicada. Los parámetros buscados son t_0 y T_{me}. Existen diversos métodos gráficos de estimación de estos parámetros; sin embargo el método de dos puntos es el más aproximado a los valores reales [Corripio 90].

El método de dos puntos requiere determinar gráficamente el punto donde la respuesta de la planta alcanza el 63.2 % del total de la respuesta en estado estable. Este punto se define como t_1. Además se localiza el punto donde la respuesta de la planta logra el 28.3 % del total de la respuesta de la planta caracterizada. Este punto se define como t_2. En la Figura 3.14, se muestra el punto t_1 en 14.17°, mientras el punto t_2 en 6.348°. El tiempo muerto de la planta es de $0.2seg.$. Por otra parte, la entrada escalón es del 100 % del PWM, lo que representa 36 VCD.

Se obtiene la constante de tiempo de la planta que se está caracterizando, y el tiempo muerto del sistema,

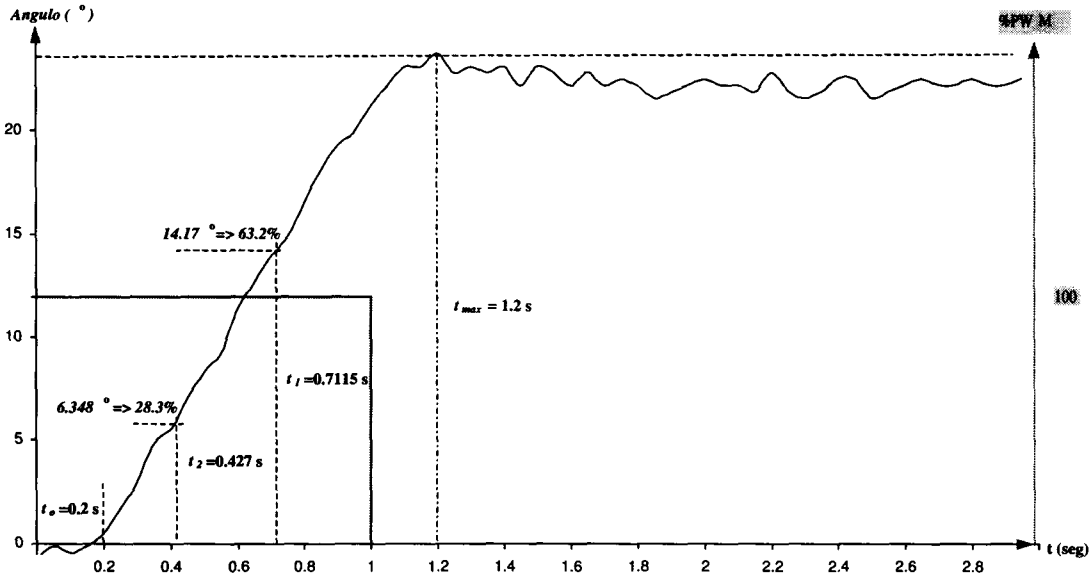


Figura 3.14: Respuesta de la planta ante un entrada escalón

$$T_{me} = 1.5(t_1 - t_2) \tag{3.9}$$

$$t_0 = t_1 - \tau \tag{3.10}$$

Por lo tanto, para el sistema de dirección del VA,

$$T_{me} = 1.5(0.7115 - 0.427) = 0.42645\ seg$$

$$t_0 = 0.7115 - 0.42645 = 0.28505\ seg$$

Finalmente, se obtiene la función de transferencia, en transformada de Laplace, del sistema electromecánico para el control de dirección del VA,

$$\frac{\Theta(s)}{E_a(s)} = \frac{0.2875}{s(0.42645s + 1)} \tag{3.11}$$

La sintonización del controlador es una tarea delicada, debido a que el funcionamiento del control depende de la correcta selección de las constantes del controlador. Según se mencionó, una de las técnicas más utilizadas en la actualidad por su

facilidad y eficacia es la técnica de sintonización de *Ziegler-Nichols*, la cual se acota a la aplicación de las fórmulas de sintonización, mostradas en la Tabla 3.7 [Corripio 90].

Tabla 3.7: Fórmulas para sintonización por el método Ziegler-Nichols

	Ganancia	Tiempo Integral	Tiempo Derivativo
P	$K_c = \tau/K_{t_0}$	-	-
PI	$K_c = 0.9\tau/K_{t_0}$	$T_I = 3.33t_0$	-
PID	$K'_c = 1.2\tau/K_{t_0}$	$T'_I = 2.0t_0$	$T'_D = 0.5t_0$

Debido a que la acción de control será implementada en un microprocesador Atmel (161Mega), la acción corresponderá a un algoritmo representado por ecuaciones de diferencias. El tipo de controlador seleccionado es un PD, definido por la ecuación 3.6, que al aproximarlo a una ecuación de diferencias tenemos,

$$\Delta M_k = K_c[E_k - E_{k-1} + (T_D/T)(E_k - 2E_{k-1} + E_{k-2})] \tag{3.12}$$

donde, $M_k = M_{k-1} + \Delta M_k$

Para comprobar la estabilidad del sistema de control, previo a su implementación física, se realizó una simulación en un programa computacional (*MatLab*) para obtener el lugar geométrico de las raíces del sistema de control ante una entrada transitoria. Este método gráfico permite evaluar los parámetros del sistema como la ganancia, debido a que un simple aumento del valor de este parámetro puede modificar el comportamiento del sistema y hacerlo inestable. Por ello, es importante saber como se desplazan lo polos de lazo cerrado al variar la ganancia en todo su rango.

La Figura 3.15 muestra el lugar geométrico de las raíces. Esta técnica establece que si los polos de lazo cerrado se encuentran dentro del circulo unitario en el plano z, el sistema de control será estable. Por lo tanto, se concluye que el sistema es estable [Ogata 95]. La simulación se realizó alimentando la función de transferencia (3.4), con $G_c(s) = K_c(1 + T_D s)$ en el dominio z.

3.3.4 Implementación y Pruebas

Una vez comprobada la estabilidad del sistema de control de forma teórica, se implementó en el microprocesador y se comprobó su funcionamiento real a través del cambio del ángulo de referencia a lo largo del rango total de trabajo, establecido de 30° a −30°. La gráfica de la Figura 3.16 muestra el comportamiento del sistema de control ante entradas escalones. En esta gráfica podemos observar que el ángulo real sigue al ángulo de referencia con un error mínimo, sin embargo en las zonas de los extremos el control no logra alcanzar al valor de referencia y este error puede ser muy perjudicial en el comportamiento del VA, en trayectorias largas.

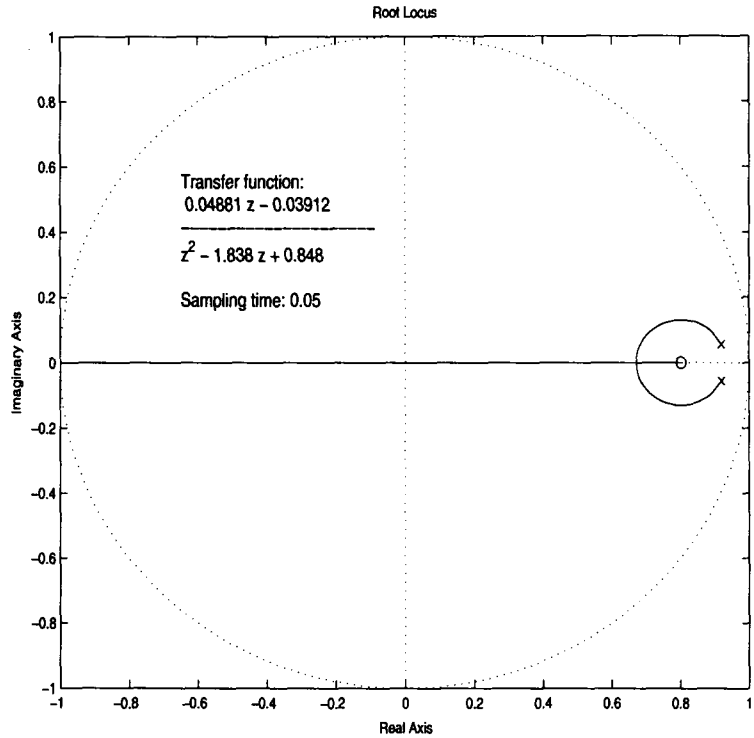


Figura 3.15: Ubicación de los polos de lazo cerrado en el plano z

Para realizar un mejor análisis del sistema de control, la gráfica de la Figura 3.17 muestra el comportamiento del error entre el ángulo de referencia y el ángulo de salida de las llantas del vehículo de la Figura 3.17. Al analizar esta gráfica se puede observar que el error se incrementa al acercarse a sus límites de operación. Por ejemplo, en el rango de $-20°$ a $-30°$, se genera un error de $4.29°$. De igual manera, en el rango de $20°$ a $25°$ se genera un error máximo de $3.59°$. Además, se presenta un sobre tiro en el rango de $-30°$ a $-10°$ y en el rango de $22°$ a $12°$. Este sobre tiro se puede apreciar mejor en la gráfica 3.16. Finalmente el error promedio del barrido completo fue de $2.05°$.

Correcciones y Modificaciones

El problema principal en esta técnica de control, basada en el modelo matemático del sistema dinámico, son los parámetros no modelados. Por ejemplo, los engranes de la transmisión que introducen zonas muertas (*backlash*), histéresis o fricciones que son difíciles de modelar y repercuten en el desempeño del controlador. Estas características representan por lo general sistemas no lineales. Por lo tanto, si deseamos aumentar la exactitud de este modelo, la complejidad inherente aumentará. Por otra parte, existen técnicas que aunadas al control lineal, permiten mejorar el desempeño del controlador y su implementación tiene un grado de complejidad menor en comparación a la complejidad que significaría aumentar el número de ecuaciones para describir el

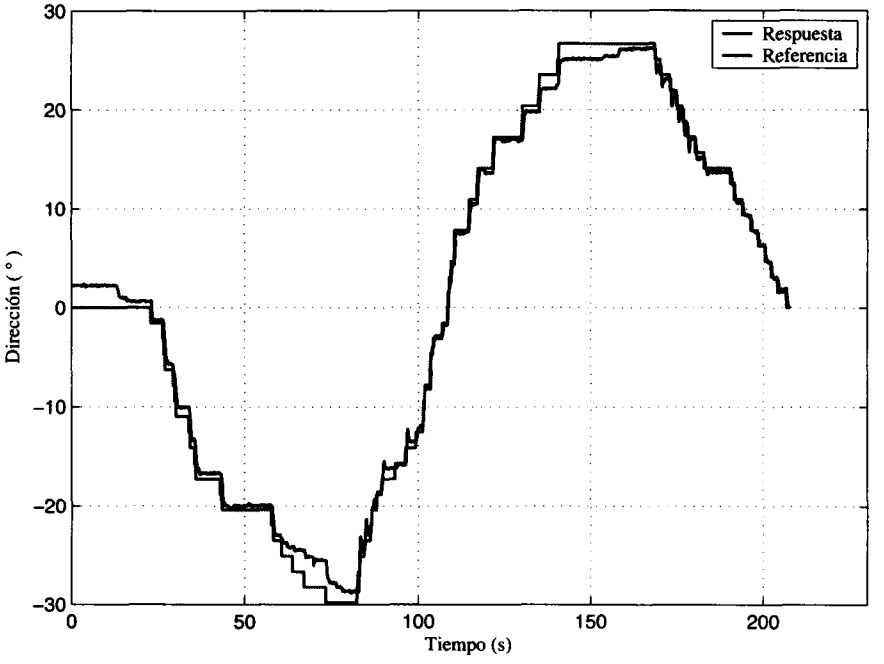


Figura 3.16: El control de dirección presenta sobre impulsos y errores considerables en los extremos del sistema de control de dirección

sistema dinámico completo. Por lo tanto, se propone utilizar la técnica de control adaptable con el objetivo de incrementar la precisión del sistema automático de control de la dirección del VA.

El enfoque del control adaptable es modificar dinámicamente los parámetros del controlador, en función del punto de trabajo de la planta. Estos parámetros se almacenan dentro del controlador y con base en reglas de adaptación, previamente establecidas, se modifica el comportamiento del controlador. El diagrama del control adaptable se muestra en la Figura 3.18, donde se observa la manipulación del controlador en función de ϕ_{salida} y de las reglas de adaptación, las cuales determinan el ajuste requerido [Ollero 01].

Se requiere además determinar los parámetros de control respecto a la posición y sentido de giro de la dirección de las llantas. Con este objetivo se realizaron una serie de pruebas donde se barrió todo el rango de operación de la dirección en ambos sentidos. La prueba consistió en determinar la potencia requerida del PWM para romper el momento de inercia del sistema de dirección. Los resultados se muestran en la Figura 3.19, donde se observa que el comportamiento del sistema no es lineal y el momento de inercia esta en función a la posición y sentido de giro de la dirección.

Para determinar los parámetros del sistema del control adaptable, el espacio de trabajo se dividió en regiones y se determinó un valor de referencia para cada zona. Los patrones más visibles son en los extremos y el área central de la gráfica, donde

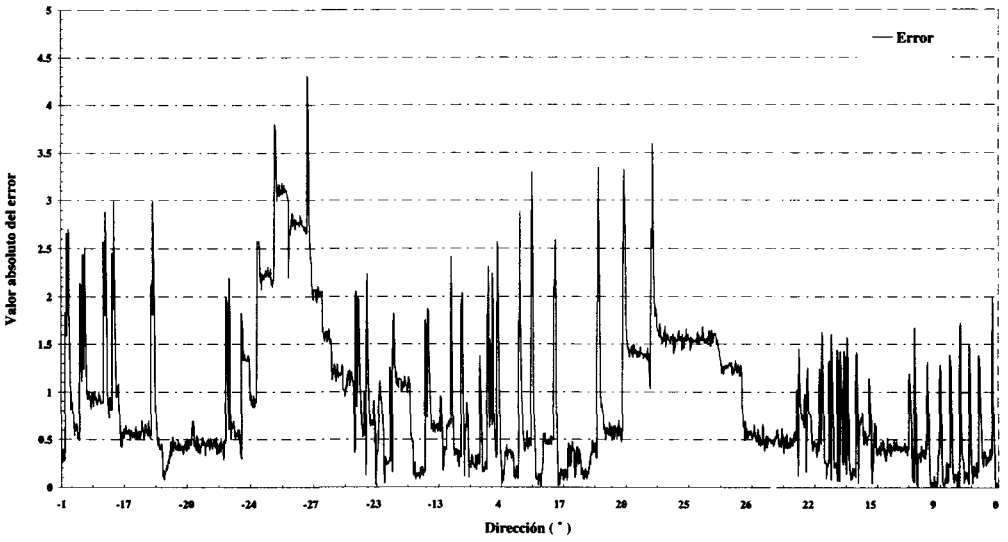


Figura 3.17: Error del sistema de control entre el ángulo de referencia y el ángulo de las llantas, durante una señal escalonada a lo largo del rango de dirección

observa que al aproximarse a un extremo se requiere una mayor potencia, mientras que sucede lo contrario al alejarse. Con base en este comportamiento del sistema se identificaron 14 zonas de comportamiento diferentes, como se muestran en la Figura 3.19. Las zonas de operación se determinan mediante reglas de adaptación que permiten, al controlador, modificar sus parámetros de potencia en función a la zona de operación donde se encuentre.

El comportamiento del controlador adaptable se muestra en la Figura 3.20, donde se observa que los sobre tiros se minimizaron. Se observa además que el control alcanza los extremos de la dirección, a diferencia del comportamiento basado en control clásico donde no lograba alcanzar los valores de referencia de los extremos.

La Figura 3.21 muestra el comportamiento del error entre el ángulo de referencia y el ángulo obtenido de las llantas del vehículo de la Figura 3.20; se obtiene un error máximo de 2.384° y un error promedio de 0.2823°; se observa además, un ruido por debajo de 0.5 de error absoluto, este comportamiento se debe al error de ± 1 *bit* del convertidor análogo a dital utilizado en sensor de dirección . Por lo tanto, la mejora del sistema de control de la dirección para el VA es notable, donde el máximo error obtenido fue el 50 % menos que al usar sólo control clásico.

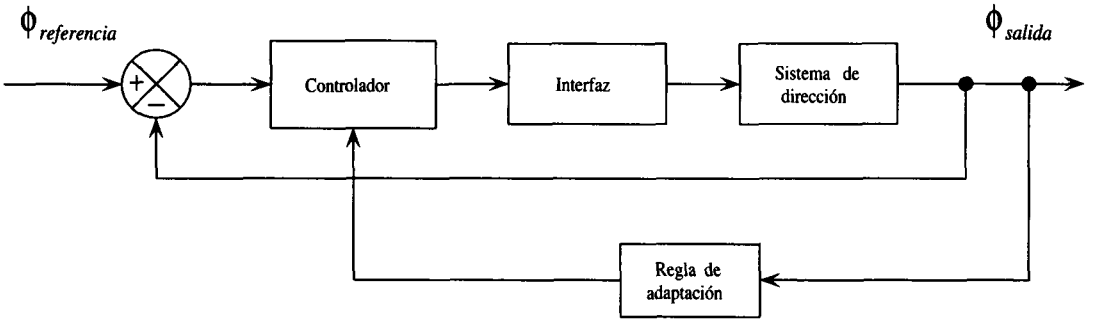


Figura 3.18: Diagrama del control adaptable; el módulo de reglas de adaptación modifica dinámicamente el valor de referencia del controlador

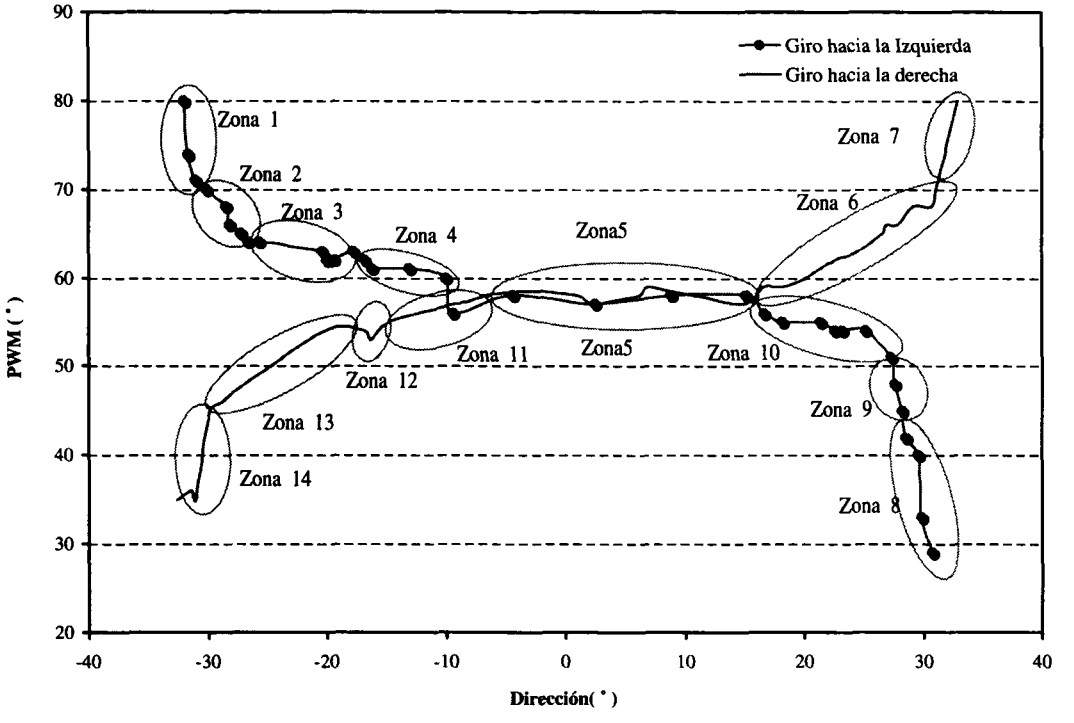


Figura 3.19: Comportamiento del sistema de dirección del vehículo dividido en 14 zonas operacionales

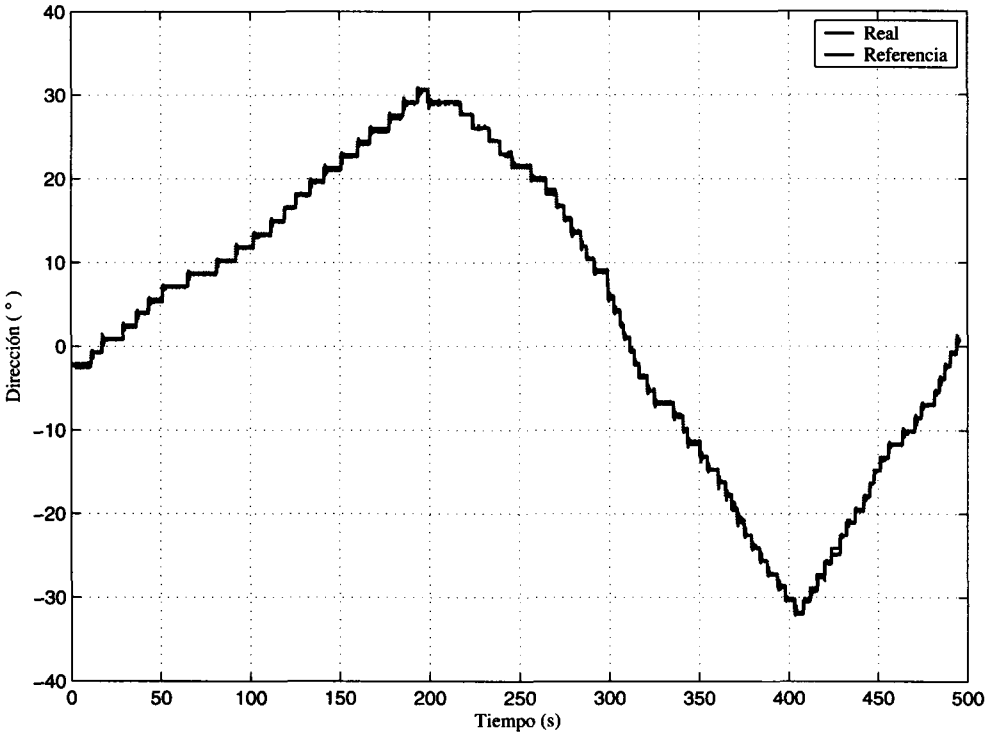


Figura 3.20: Respuesta con control adaptable

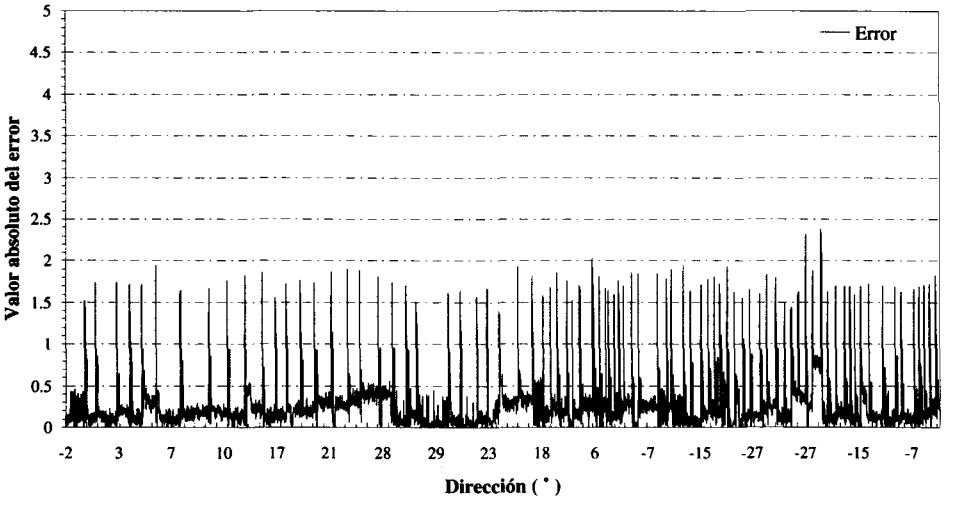


Figura 3.21: Error del sistema de control adaptable

Capítulo 4

Implementación y Resultados

Este capítulo describe las implementaciones y los resultados del desarrollo de automatización de la dirección de un vehículo para su guía autónoma.

Los resultados del sistema en general del VA, se muestran dentro del capítulo. La evaluación del VA consistió en el seguimiento de una serie de trayectorias, especificadas previamente, a través del control de la dirección (ϕ) y la velocidad (v).

4.1 Vehículo utilitario

El vehículo utilizado en este desarrollo fue un vehículo utilitario eléctrico de la compañía *Johnson Industries Inc.* el cual se sometió a una serie de adecuaciones e implementaciones para convertirlo en un vehículo autónomo con base en la metodología propuesta. El vehículo en su versión original se muestra en la Figura 4.1.

Este vehículo originalmente fue creado para realizar trabajos diversos en minas; posee los sistemas básicos de un automóvil convencional, tales como dirección, velocidad y freno. El sistema de dirección es mecánica tipo *Ackermann.* El sistema de velocidad es automático con dos velocidades y desarrolla una velocidad máxima de 23 Km/h. El sistema de frenado es convencional tipo tambor, accionados por palanca en las ruedas traseras. La energía es provista por un banco de seis baterías de 6 V cada una, conectadas en serie. En el Apéndice A se pueden encontrar las principales especificaciones mecánicas del vehículo.

El vehículo utilitario consta de dos plazas y posee una caja para carga con capacidad de 545 kg; tiene un peso vehicular de 635 kg, de los cuales el 35 % corresponde a las baterías. La tracción del vehículo es proporcionada por un motor de CD de 5 hp de potencia, controlado por el operador a través del pedal de aceleración. El pedal tiene acoplado un potenciómetro que varía su resistencia de acuerdo a la presión aplicada al acelerador, la cual es directamente proporcional a la velocidad del vehículo. El sistema eléctrico del carro posee otras funciones, tales como el encendido y apagado del sistema; cambio de dirección de tracción: atrás o adelante; encendido

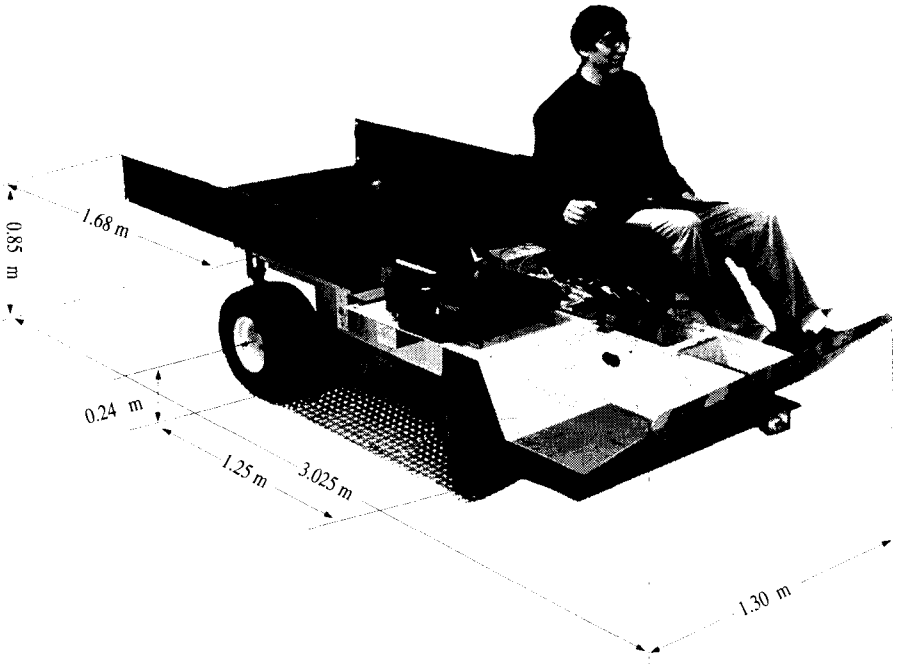


Figura 4.1: Vehículo utilitario eléctrico utilizado en el desarrollo de un VA

de luces: trasera o delantera; interruptor de pánico y claxon. Todas las funciones son controladas por el usuario mediante un panel de control integrado por interruptores.

4.2 Mecanismo de dirección

El sistema electromecánico para la manipulación de la dirección del VA se construyó de acuerdo a las especificaciones del diseño desarrollado en el Capítulo 3.

Con el objetivo de sujetar al sistema electromecánico, el chasis del vehículo sufrió algunas modificaciones, tales como perforaciones y roscas.

El electromecanismo está integrado por un motor de CD, sujeto a través de tornillos a una placa de hierro, la cual se montó sobre un par de baleros modelo 6001 que rotan sobre un eje de acero de 12 mm, implementados sobre el chasis del vehículo.

Con el propósito de permitir el funcionamiento manual y automático, el sistema electromecánico se montó al chasis mediante dos soportes, sobre los cuales descansa el eje de acero. Gracias al sistema de baleros el electromecanismo adquiere un movimiento rotacional de 40°, para acoplar en su operación automática y desacoplar en su operación manual, de forma rápida y precisa al mecanismo con el volante. El acoplamiento y desacoplamiento del montaje lo debe realizar el usuario del VA de

forma manual. La facilidad de acoplamiento se debe al uso de engranes tipo "bevel", cuyos únicos requerimientos consisten en mantener un ángulo de 90° entre sus ejes de rotación. La Figura 4.2 muestra el sistema electromecánico implementado, donde se observa, el sistema acoplado al eje del volante; una vez acoplado, el mecanismo se ajusta mediante dos tornillos $1/4'' - 20$. Cuando el VA opera en forma manual un resorte mantiene la posición desacoplada del sistema, para evitar que los engranes sufran daño.

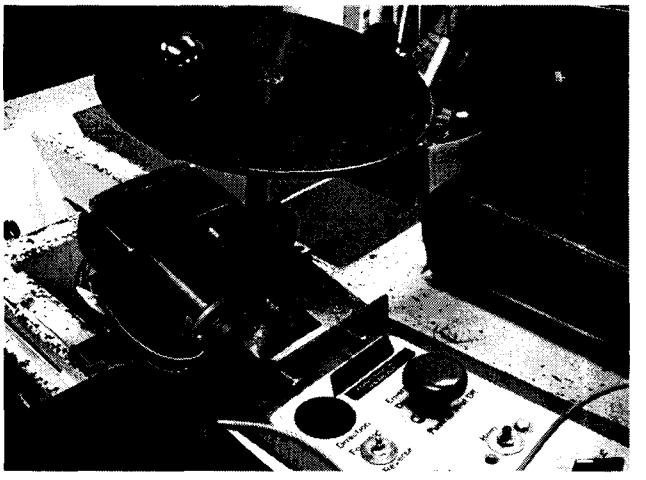


Figura 4.2: Sistema electromecánico para el control de dirección, en modo automático

4.3 Sensado

Los dispositivos que permiten cerrar los lazos de control tanto de dirección como de velocidad se presentan enseguida, ambos sensores se desarrollaron e implementaron en el vehículo utilitario. Según el esquema general de la Figura 2.13. Además se incluyó un sensor de límite para los extremos de la dirección.

4.3.1 Sensor de dirección

El sensor de dirección desarrollado, se basó en un potenciómetro rotacional de precisión marca *Spectrol*, modelo 533 de 10 $k\Omega$ $\pm 5\,\%$ con una linealidad de $0.1\,\%$. Este transductor posee un rango total de operación de 1080°. Debido a que el rango total a medir es de 0 a 80°, el voltaje total producido se encuentra en el orden de mV, dentro del rango de voltaje de 1.617 mV a 2.378 mV, teniendo una escala completa de 0.761 mV. Dado que el convertidor analógico a digital (ADC, por sus siglas en inglés) es de 8 *bits* con un rango de entrada de 0 a 5 VCD, es necesario escalar los niveles de voltajes suministrados por el potenciómetro al ADC. La Figura 4.3 muestra la escala completa del voltaje análogo de entrada, requiriendo el ajuste del nivel de referencia del convertidor a la mitad de la escala completa o *span*. Con este ajuste se escalan los

voltajes del sensor, obteniendo 0 *bits* para 1.617 *Volts* y 255 *bits* para 2.378 *Volts*, siendo así posible trabajar la escala digital completa de 0 a 255 *bits*.

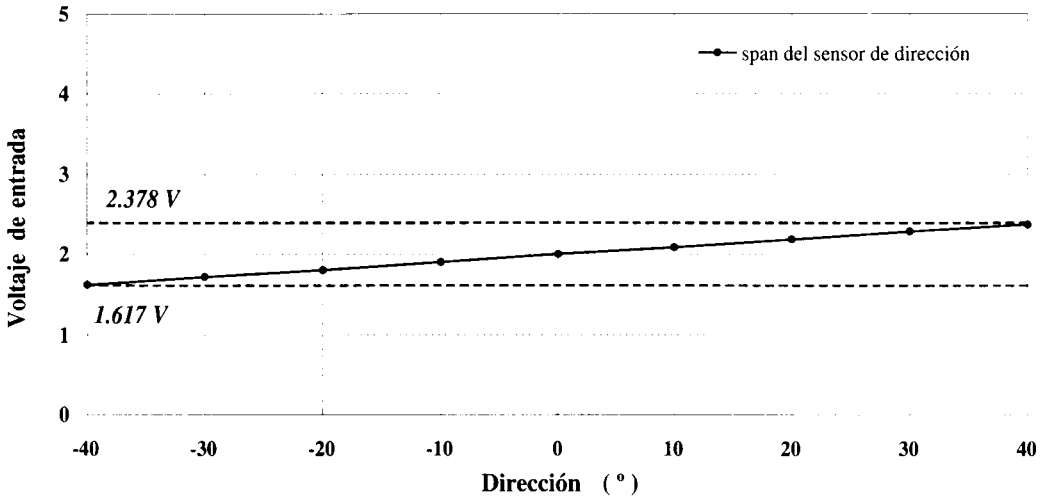


Figura 4.3: Rango total de operación del sensor de dirección (*span*)

El sensor de dirección se montó en el eje de rotación del vehículo, debido a que la rotación de la dirección de la llanta tiene a esta bota como eje. Así, el movimiento sensado no sufre otra transformación, sólo una translación, respecto al eje. El potenciómetro se fijó a la bota derecha del vehículo, mediante tornillos, la cual se modificó con un par de orificios roscados, para implantar un soporte en forma de "U"; asegurándolo mediante dos tornillos. El montaje permite sostener el cuerpo del potenciómetro, unido al cuerpo de la bota, con el objetivo de acoplar el eje del potenciómetro al eje de rotación de la bota, permitiendo así medir la dirección de la llanta.

El sensor se acopló al eje de rotación de la bota a través de dos acoplamientos: el primero, es un acople rígido, que se une al eje del balero, generando una extensión de diámetro igual al eje del potenciómetro; mientras que el segundo, es un acople flexible que une la extensión del acople rígido con el eje del potenciómetro. El acople flexible, mostrado en la Figura 4.4, permite corregir un desalineamiento de hasta 5°, con un torque de torsión de 2.5 Nm, suficiente para contrarrestar el esfuerzo requerido para hacer girar el potenciómetro. Además, este acople presenta un momento inercial bajo, evitando un retardo en el sensado.

La calibración del potenciómetros se fijó a 0°, cuando las llantas estan alineadas al frente, siendo este punto el centro del rango del sensor; fijado en 1.992 V. En $-40°$, las llantas estan completamente a la izquierda, teniendo una lectura de 1.617 V. Finalmente, cuando las llantas se encuentran a 40°, se obtiene la lectura máxima del sensor de 2.378 V. La relación entre la dirección, valor de resistencia, voltaje generado y valor digital se muestra en la Tabla 4.1.

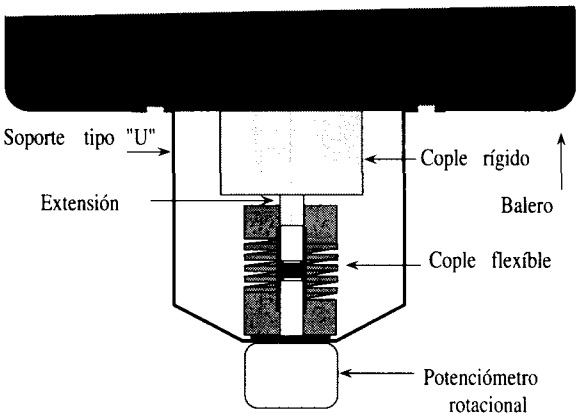


Figura 4.4: Acoplamiento del transductor (potenciómetro), a través de un acople rígido y un acople flexible de aluminio, serie W de la Cia. Helical

Tabla 4.1: Rango de operación del sensor de dirección

Dirección (°)	Resistencia (Ω)	Voltaje (mV)	Lectura digital ($bits$)
-40	1617	1.617	0
0	2000	1.992	128
40	2378	2.378	255

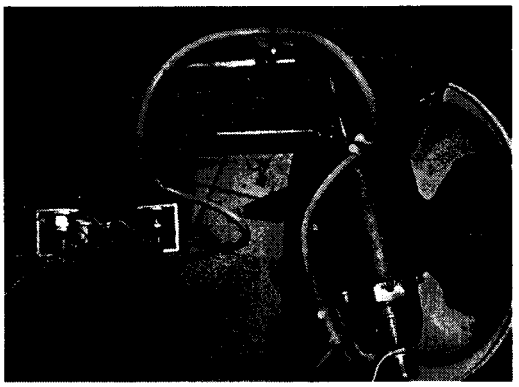
El montaje final del sensor y el transductor se muestran en las Figuras 4.5, donde se observa (en la Figura A.3) el sensor implementado, tanto el circuito electrónico como el montaje del transductor. En la Figura 4.5(b) se observa el acoplamiento mediante el acople flexible, entre los ejes del potenciómetro y la extensión del acople rígido en roscado el eje de rotación de la bota derecha del VA.

Como se mencionó en el Capítulo 3, el sistema de medición de la dirección consta de un filtro pasa bajo, para contrarrestar el ruido analógico. Sin embargo, el comportamiento en la lectura no fue el deseado, ya que al realizar la adquisición de la dirección en estado estable, la medición presentó una desviación estándar de 0.1795. La gráfica de la Figura 4.6, muestra el comportamiento del sensor en la lectura de una dirección específica, donde la variación del medidor es de $\pm$ 0.5°. Esta variación es debida a errores de conversión de la señal de entrada, errores por redondeo y ruido del transductor. Buscando mejorar el desempeño del sensor de dirección se incluyó un filtro digital, de primer orden,

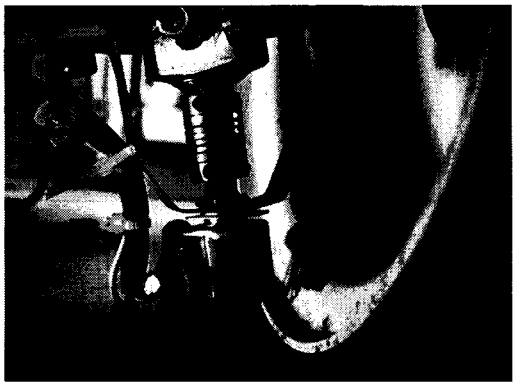
$$y[k] = (W_c T y[k] + y[k-1]) \frac{1}{(1 + W_c T)} \tag{4.1}$$

donde $y(k)$ es la señal de salida filtrada, $y[k-1]$ es la señal en un tiempo anterior, W_c es la frecuencia de corte, T es el tiempo de muestreo.

Una vez implementado el filtro digital se realizó la adquisición de la dirección en estado estable. La Figura 4.7, muestra el comportamiento del filtrado digital del sensor.



(a) Tarjeta de acondicionamiento y conversión digital



(b) Potenciómetro acoplado al eje de rotación de la llanta

Figura 4.5: Sensor de dirección, integrado por un potenciómetro y un tarjeta electrónica, de acondicionamiento y conversión digital de la señal

La variación máxima disminuyó a $\pm$ 0.1° con una desviación estándar de 0.0390. El filtro responde sólo a los cambios pequeños ignorando los cambios drásticos de posición.

4.3.2 Sensor de límite

El rango total del sistema de dirección es de $\pm 40°$; sin embargo, operar el sistema en todo su rango, coloca en riesgo a los mecanismo de actuación, debido a que los límites de giro son topes mecánicos, que las piezas del sistema pueden sufrir un daño severo al momento de alcanzar su máximo límite, con determinada velocidad. Por lo tanto, se implementó un sensor de límite de operación, con el objetivo de ajustar el rango de operación de la dirección. Detectando los límites de operación, como se muestra en la Figura 4.8 y Figura 4.9 detectanto $-30°$ y 30°. Esto con el objetivo de tener un margén de seguridad de 10°.

El sensor de límite se compone por un sensor magnético y dos imanes permanentes, que activan al sensor a una distancia de 3 *mm*. El rango total de operación se ajustó a $\pm 30°$. Cuando las llantas del vehículo se orientan hacia enfrente, de manera que su ángulo de dirección es 0°, el estado del sensor es apagado. La Figura 4.8, muestra la dirección de las llantas a $-30°$. El imán activa al sensor enviando un pulso de subida al microcontrolador, indicando fuera de rango. La Figura 4.9, muestra las llantas a 30°. El imán activa al sensor enviando un pulso de subida al microcontrolador, indicando fuera de rango. El microcontrolador, al recibir la señal de activación del sensor, envía a cero el ciclo de trabajo de la señal del motor de CD, deteniendo el giro del controlador de dirección.

La Figura 4.10 muestra la implementación del sensor de límite de rango. El

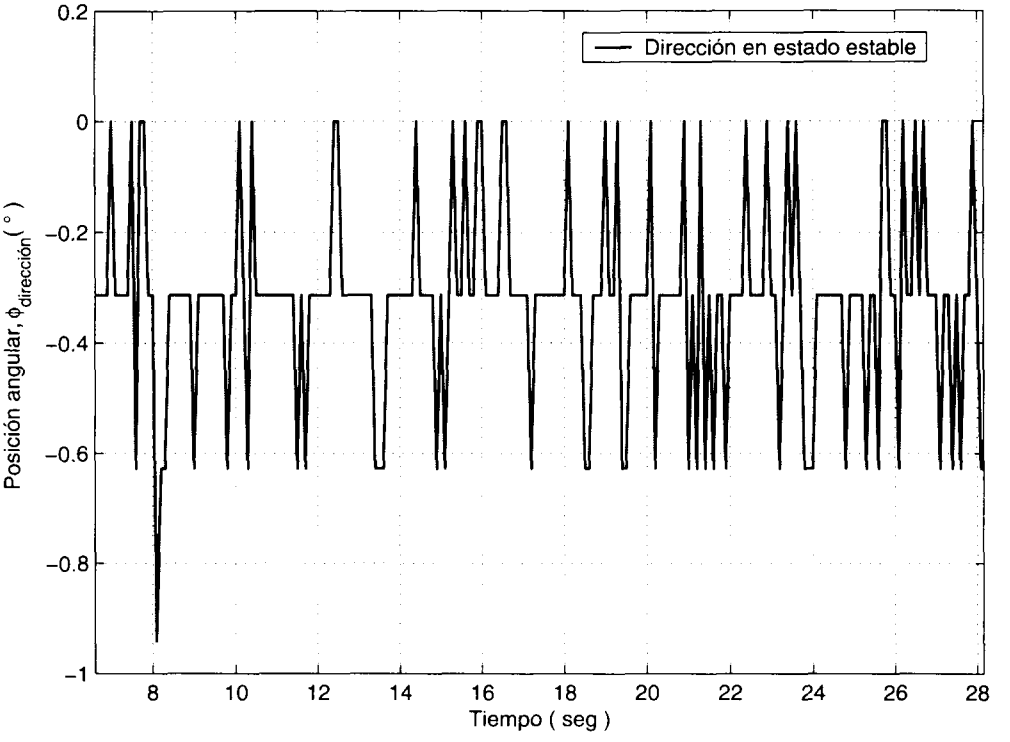


Figura 4.6: Medición de la dirección en estado estable, con filtrado analógico

sensor magnético es sujeto, a través de dos tornillos, al eje delantero del vehículo. De manera complementaria, los límites se establecen a 10 ° antes del tope mecánico de la dirección, colocando dos imanes permanentes sobre la barra de *Ackermann*, en ambos sentidos. Este sensor tiene como propósito prevenir que el sistema automático no sobrepase los límites de operación establecidos, evitando así un sobre torque del sistema electromecánico, cuyo efecto causaría un daño permanente a los componentes del mecanismo.

4.3.3 Sensor de velocidad

Para la medición del desplazamiento y velocidad del vehículo, se desarrolló un codificador óptico relativo, basado en un foto sensor Omron de la serie EE-SX670 con salida de colector abierto, NPN.

Los elementos que integran al sensor de velocidad, se muestra en la Figura 4.11, donde se observa una cinta ranurada utilizada para generar las transiciones de luz a oscuro, así como un foto sensor óptico que permite detectar dichas transiciones. La salida del sensor se alimenta a un puerto de entrada del microcontrolador utilizado para llevar el conteo de los pulsos. También se observa la gráfica, en el tiempo, de la señal de salida.

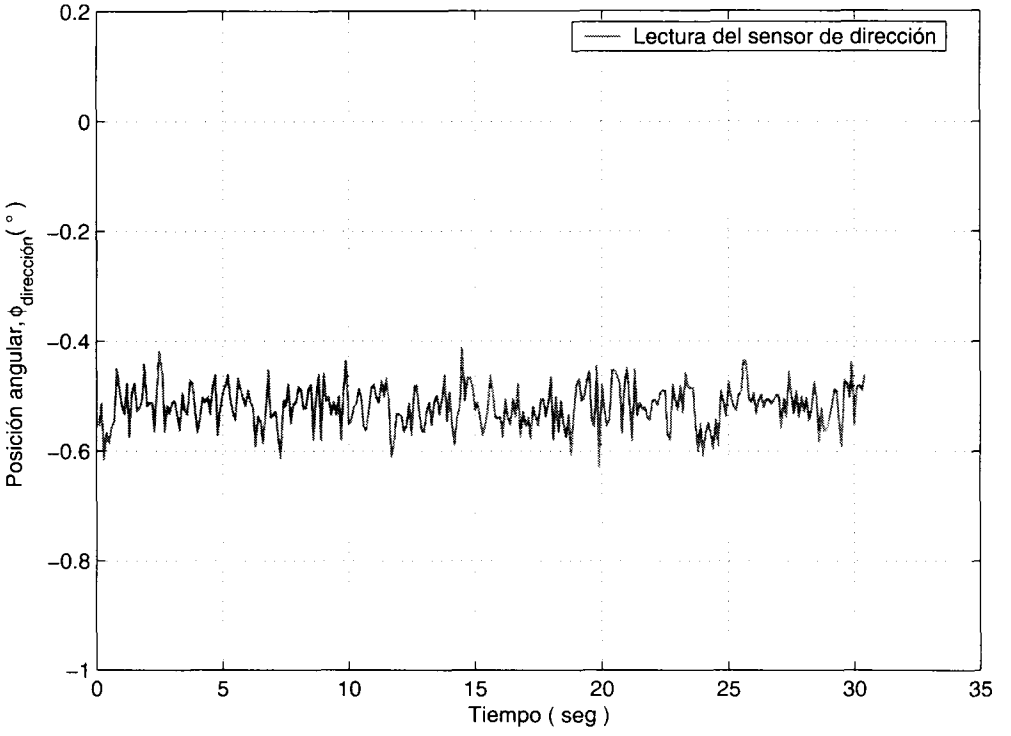


Figura 4.7: Medición de la dirección en estado estable, con filtrado digital

La salida del sensor es un tren de pulsos con frecuencia directamente proporcional a la velocidad del aparato. Es importante recordar que la señal producida por este sensor es digital, por lo que se puede retroalimentar directamente al control digital de velocidad. La velocidad es medida a través de la cantidad de pulsos generados por la distancia de cada pulso entre la unidad de tiempo. Mientras el desplazamiento, lineal, recorrido por el vehículo es función directa del número de ranuras leídas por el sensor,

$$d = \frac{P}{N_r} \tag{4.2}$$

donde d es el desplazamiento lineal del vehículo, P es el perímetro de la llanta y N_r en su caso es el número de ranuras del disco del sensor,

El sensor de velocidad se implantó en ambas llantas, sobre el filo de los tambores. La velocidad del VA resulta del promedio del número de ranuras, con base a la distancia equivalente por ranura, dada por la ecuación (4.2). Este sensor es capaz de medir una velocidad máxima de 63.14 Km/h, con una resolución de 0.005847 m. Además, su operación presenta un bajo consumo de corriente y un rango de voltaje de operación de 5 a 24 VCD.

El sensor de velocidad y desplazamiento implementado se muestra en la Figura 4.12, donde se observa la ubicación del sensor de velocidad, colocado sobre un soporte

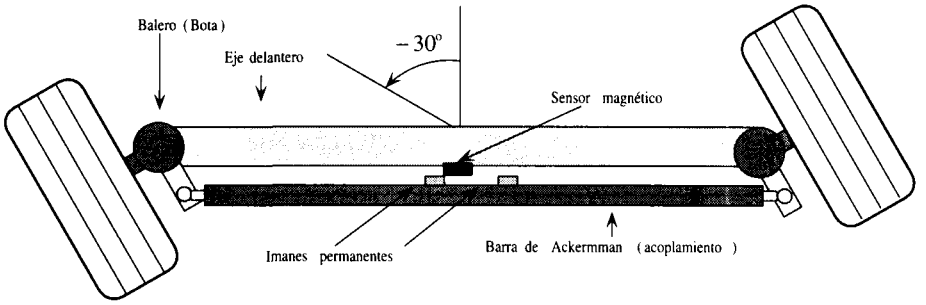


Figura 4.8: Límite izquierdo, calibrado en $-30°$

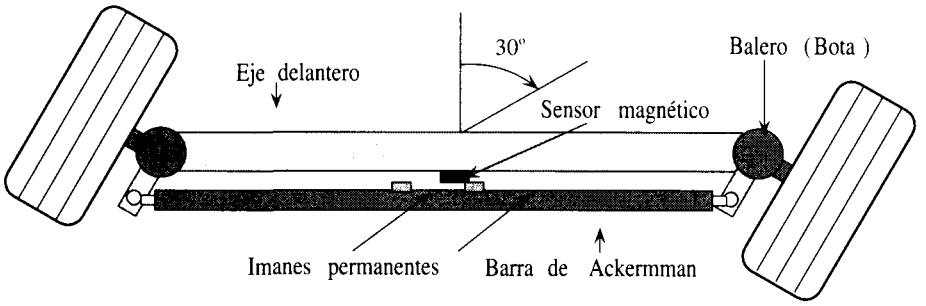


Figura 4.9: Límite izquierdo, calibrado en $30°$

a las muelles del vehículo.

4.4 Control

El sistema de control digital se implementó en un microcontrolador marca Atmel, modelo ATmega161, familia RISC AVR. El microcontrolador aloja los algoritmos de control adaptable de dirección; se trata de un microcontrolador de tipo industrial, cuyas características lo hacen adecuado para esta aplicación. Entre las características del microcontrolador destacan el manejo de dos reloj con contadores, configurables como moduladores de ancho de pulso; el bajo consumo de corriente; así como la capacidad de 16 *kb* de memoria flash con una velocidad de 8 MIPS.

4.4.1 Implementación

El algoritmo del controlador PD, implementado para la manipulación de la dirección se representa por la ecuación de diferencias,

$$M_k = M_{k-1} + k_p\left(e_k - e_{k-1} + k_d(e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2})\right) \tag{4.3}$$

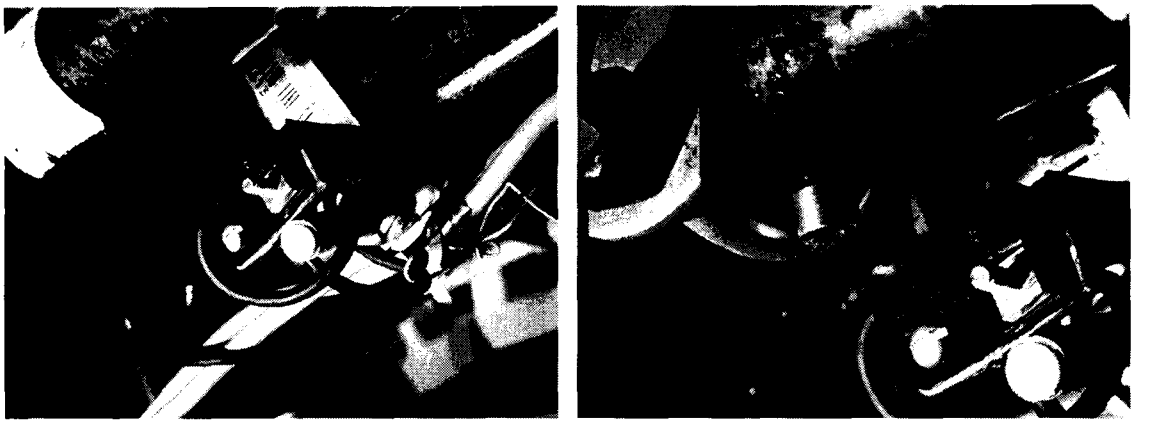


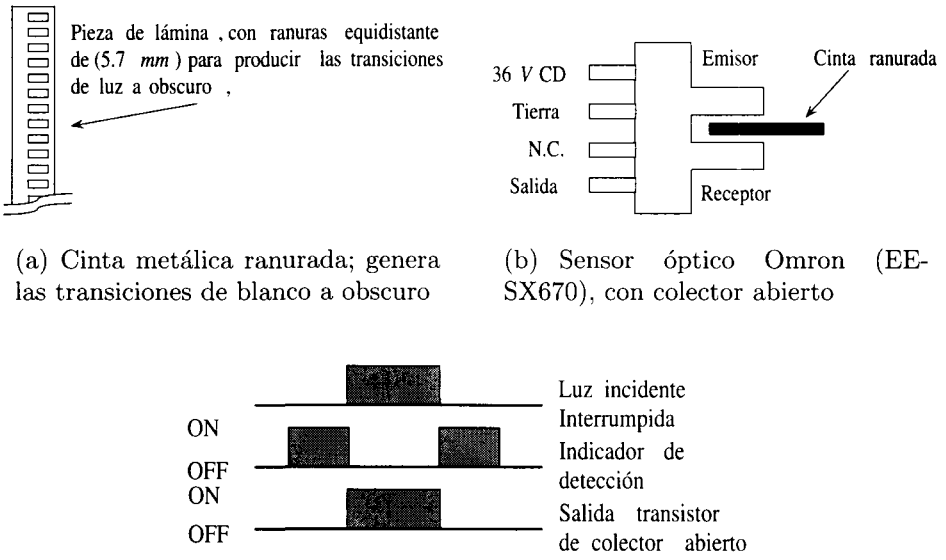
Figura 4.10: Sensor de límite, implementados sobre la barra de Ackermann

donde M_k es la variable manipulada, k_p y k_d son las constantes proporcional y derivativa, respectivamente. La variable manipulada representa el ciclo de trabajo proporcionado por el registro del PWM. Por lo tanto, el valor de esta variable varía entre 0 y 255, equivalente un rango de 0 a 100 % de ciclo de trabajo de la señal. El signo del error e, se utiliza para determinar la dirección del giro del actuador.

La potencia demandada por el actuador de dirección, compuesto por un motor de CD de imán permanente, es suministrada por una interfaz de potencia llamada puente H, cuyo objetivo es controlar la velocidad y sentido de rotación del motor de CD. En la Figura 4.13 se observa el circuito electrónico del puente H, así como la etapa lógica de control que consta de dos entradas: la primera *habilita* la operación del circuito, mientras que la segunda, determina el sentido de *giro* del motor. Ambas entradas son habilitadas por el microcontrolador, que resulta de la implementación del algoritmo de control. Gracias a la inclusión de opto aisladores, se mantiene protegida la etapa lógica, 5 $Volts$, de la etapa de potencia, 36 $Volts$.

Analizando el comportamiento del circuito, mostrado en la Figura 4.13, y suponiendo que HAB=1 y DIR=1 (1 se considera un nivel alto de 5 $Volts$ y 0 es 0 $Volts$), tendríamos en la base de Q_A un nivel bajo de voltaje, al igual que en Q_B, por lo que ambos transistores se encuentran en las zonas de saturación y corte, respectivamente. Al mismo tiempo, en las bases de Q_C y Q_D hay un nivel alto de voltaje provocando que los transistores se encuentren las zonas de saturación y corte, respectivamente. Estos estados permiten que la corriente de la fuente de energía, fluya a través del arreglo Darligton Q_A y Q_C, haciendo rotar al motor en el sentido de las manecillas del reloj. La rotación en sentido contrario, se logra al invertir la lógica de la entrada DIR a 0.

La potencia del circuito es provista por la etapa de transistores Darligton, mientras los BJT: Q_1, Q_2, Q_3 *y* Q_4, funcionan como una etapa preamplificadora de corriente, con el objetivo de excitar a los transistores de potencia del puente H, debido a que la



(a) Cinta metálica ranurada; genera las transiciones de blanco a obscuro

(b) Sensor óptico Omron (EE-SX670), con colector abierto

(c) Salida del sensor en el tiempo

Figura 4.11: Elementos del sensor de velocidad

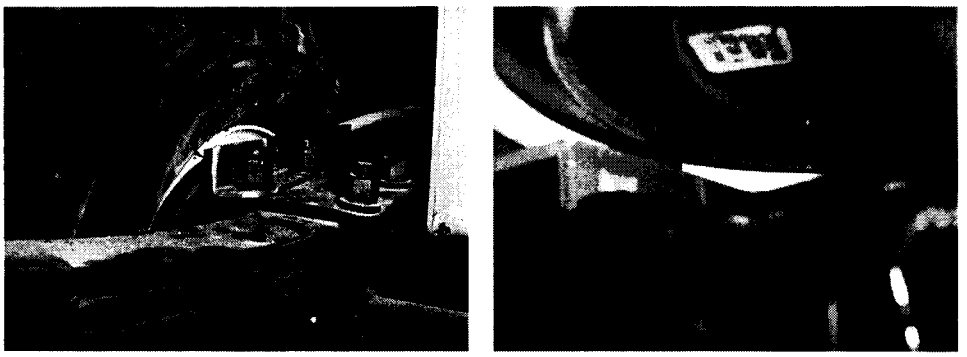
potencia demanda por el motor de CD es de 280 *Watts*. Los transistores utilizados en el puente funcionan con potencia nominal de 300 *Watts*, a temperatura ambiente de 25^oC. Por lo tanto, fue necesario el uso de disipadores de calor, con una baja resistencia térmica, al igual que un sistema de enfriamiento por flujo de aire, con el objetivo de operar estos transistores a su máxima potencia. El circuito tiene un consumo de corriente de 0.4 *Amp.* en modo de espera, mientras que a plena carga tiene un consumo de hasta 10 *Amp.* El circuito cuenta con fusibles para proteger los componentes.

El motor es activado por el control de dirección alojado en el microcontrolador. El valor de la variable manipulada M_k es modificada con base a las reglas de adaptación del sistema adaptable de control. Esta señal se aplica a la entrada HAB del puente H, mientras la entrada de dirección DIR se controla en función del signo del error.

4.5 Experimentos y resultados

Esta sección presenta los experimentos realizados al Vehículo Autónomo, con el objetivo de obtener una medida de desempeño del sistema en general, así como del control de dirección del VA. El VA desarrollado se observa en la Figura 4.14, donde se muestran los módulos que integran el sistema del VA.

El Vehículo Autónomo de escala real, se integra por un sistema de control jerárquico, mecanismos y sensores, y gracias a una interfaz gráfica con el usuario



(a) Códificador de llanta Izquierda (b) Códificador de llanta derecha

Figura 4.12: Implementación del sensor de velocidad y desplazamiento sobre ambas llantas; sensor implementado sobre las muelles, mientras la cinta ranurada se implemento al borde del tambor del freno

(GUI, por sus siglas en inglés) alojada en una computadora, es posible interactuar con él. Una de las principales funciones capaz de desarrollar el VA, es el seguimiento de una trayectoria establecida mediante la GUI, esto sin la intervención del hombre.

Los experimentos realizados se desarrollaron en ambientes exteriores, debido a las dimensiones del VA de escala real. El área de trabajo utilizada en los experimentos es un plano (x, y) de 50 x 80 m. En esta primera fase, el VA no cuenta con el módulo de evasión de obstáculos dinámicos, motivo por el cual el área utilizada se encuentra libre de obstáculos. Además, por la magnitud del área requerida, sólo se obtuvo acceso a un área con cierta pendiente; pendiente que perturbo los resultados de los experimentos. Por lo tanto, las pruebas se realizaron en ambos sentidos de la pendiente y los resultados se interpretaron en función del sentido de la pendiente.

4.5.1 Comportamiento simple y respuesta al impulso

Los experimentos iniciales consistieron en la especificación y seguimiento de una trayectoria simple, experimentos que permitieron evaluar cada sistema del VA. Los resultados obtenidos de esta primera etapa experimental, tuvieron como objetivo principal realizar el ciclo de corrección, refinamientos y modificaciones al prototipo del VA. La etapa tuvo una duración de tres meses aproximadamente, mientras el estado actual del VA se reporta en este documento.

La siguiente etapa de experimentación se enfocó en obtener el desempeño del control de dirección implementado. Aquí, la primera prueba consistió en la aplicación de una entrada escalón al sistema. Dado un sistema de control cuya salida deseada y salida real son $r(t)$ y $c(t)$ respectivamente, se calcula el error absoluto,

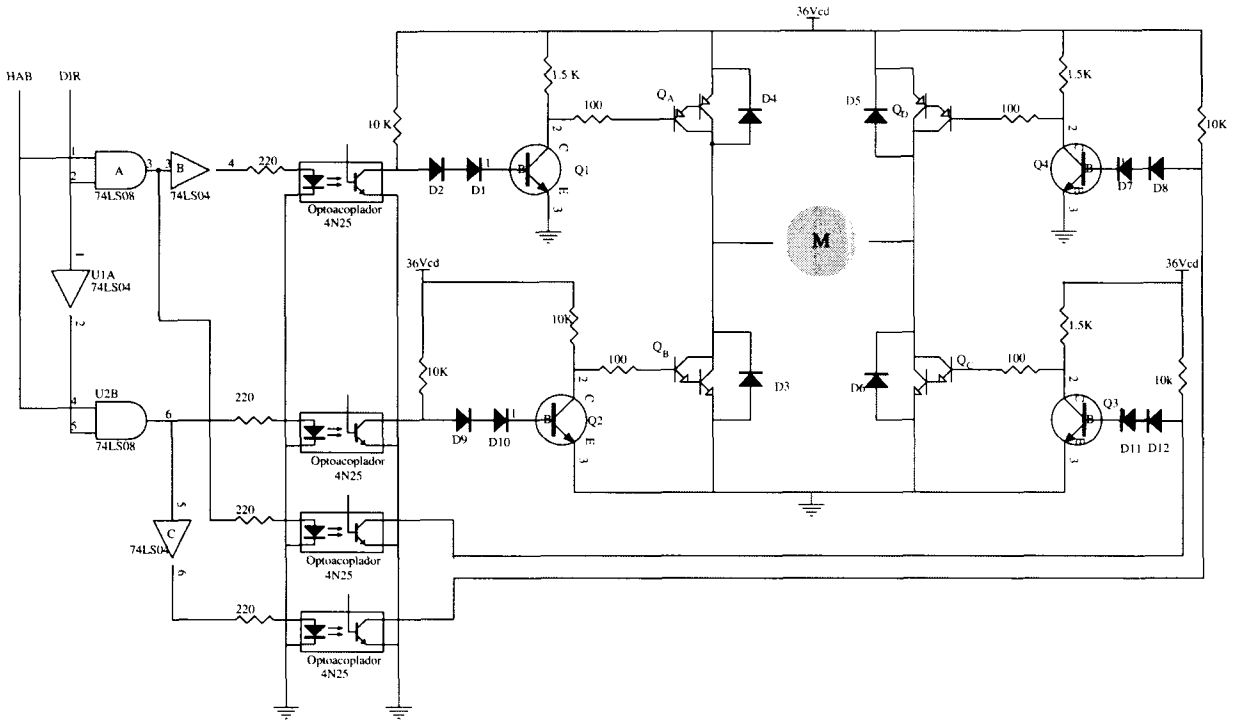


Figura 4.13: Circuito interfaz de potencia y control del motor de CD, mediante un puente H.

$$e(t) = |r(t) - c(t)| \tag{4.4}$$

Por lo tanto, el desempeño del control se puede evaluar en función de este error. La Figura 4.15 muestra el comportamiento del error absoluto del sistema ante una entrada escalón, donde se observa que en un segundo se tiene un error de 2° y en 2 segundos el error se encuentra, por de debajo de 0.5°, con lo que de muestra que el sistema cuenta con un periodo corto de estabilización.

Al analizar los resultados de una serie de pruebas se obtuvo un error promedio, en estado estable, de 0.2 ° y un tiempo promedio de estabilización de 2.3 *seg*. El error cuantificado se atribuye principalmente a la inestabilidad del sensor por efectos de conversión y al ruido por el manejo de niveles de voltajes muy pequeños.

4.5.2 Seguimiento de una línea recta

Las siguientes etapas de experimentación consistieron en evaluar la bondad de los elementos involucrados en la automatización del VA, además de continuar con la evaluación del control de dirección. Para cuantificar el desempeño del VA, se realizó una serie de experimentos consistentes en el seguimiento de una trayectoria

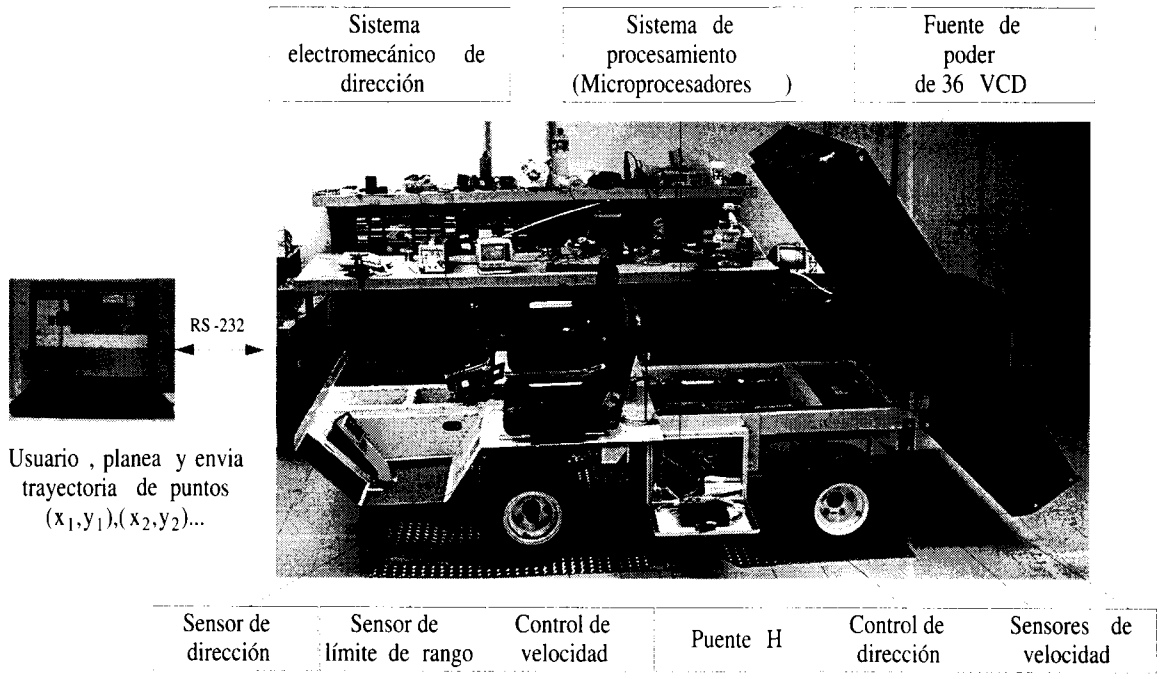


Figura 4.14: Módulos de la arquitectura jerarquíca que integran al VA

definida por una secuencia de puntos dentro del área de trabajo.

La primera trayectoria evaluada consistió en una línea recta compuesta por dos puntos que constituyen el punto de partida $(0,0)$ y el punto meta $(50,0)$. En la Figura 4.16 se observa la trayectoria descrita por el VA. Es importante destacar que la posición inicial del VA es determinante para el correcto seguimiento de la trayectoria, debido a que el algoritmo toma la posición inicial como primer punto a evaluar.

Los resultados obtenido, de los experimentos en línea recta, muestran un error promedio en el eje x de 2.68 m y en el eje y de 1.3 m. El error global presentado esn estas pruebas, es de 2.0 m, que representa el 4.0 % de error a 50 m. Este resultado es alentador debido a que, por definición, la odometría genera un error acumulado inherente a la técnica, siendo el error reportado bajo considerando la longitud de la trayectoria recorrida.

4.5.3 Trayectorias

Enseguida se realizaron pruebas consistentes en el seguimiento de trayectorias con formas geométricas básicas. Dichas pruebas sirvieron para sintonizar, finamente, los parámetros de los controladores de *Trayectoria* y de *Punto*. Por lo tanto, una de las pruebas que permite evaluar a fondo todas las capacidades del vehículo es el seguimiento de una trayectoria en forma de "8", ya que es particularmente difícil,

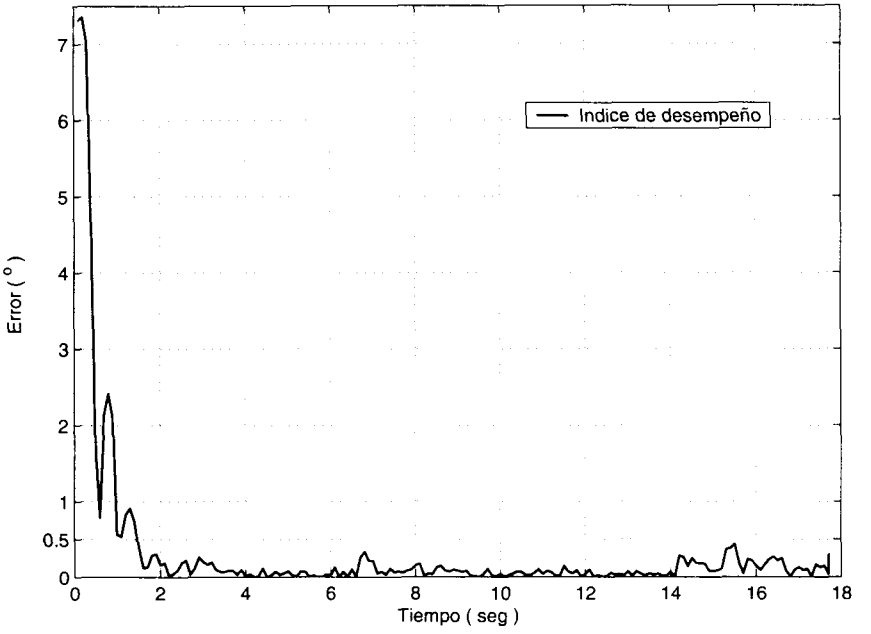


Figura 4.15: Desempeño del control de dirección; ante un señal de prueba escalón

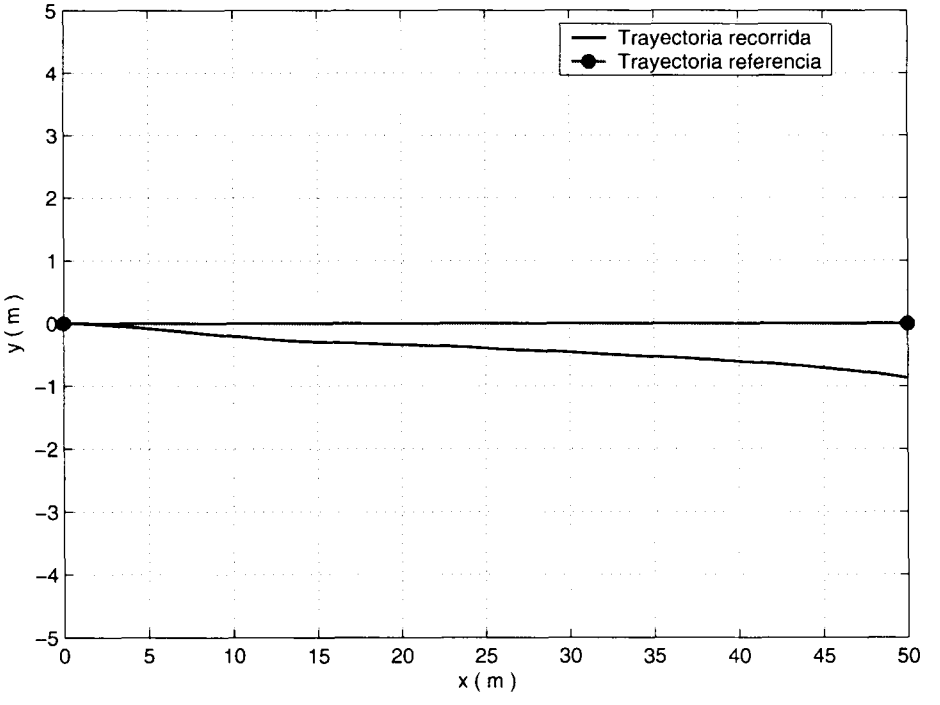


Figura 4.16: Seguimiento de una recta de 50 m.

debido que el vehículo tiene que maniobrar rápidamente en un periodo muy corto. Esta trayectoria permite evaluar tanto giros a la izquierda como a la derecha, además de líneas rectas, representando todas las posibles evoluciones del VA.

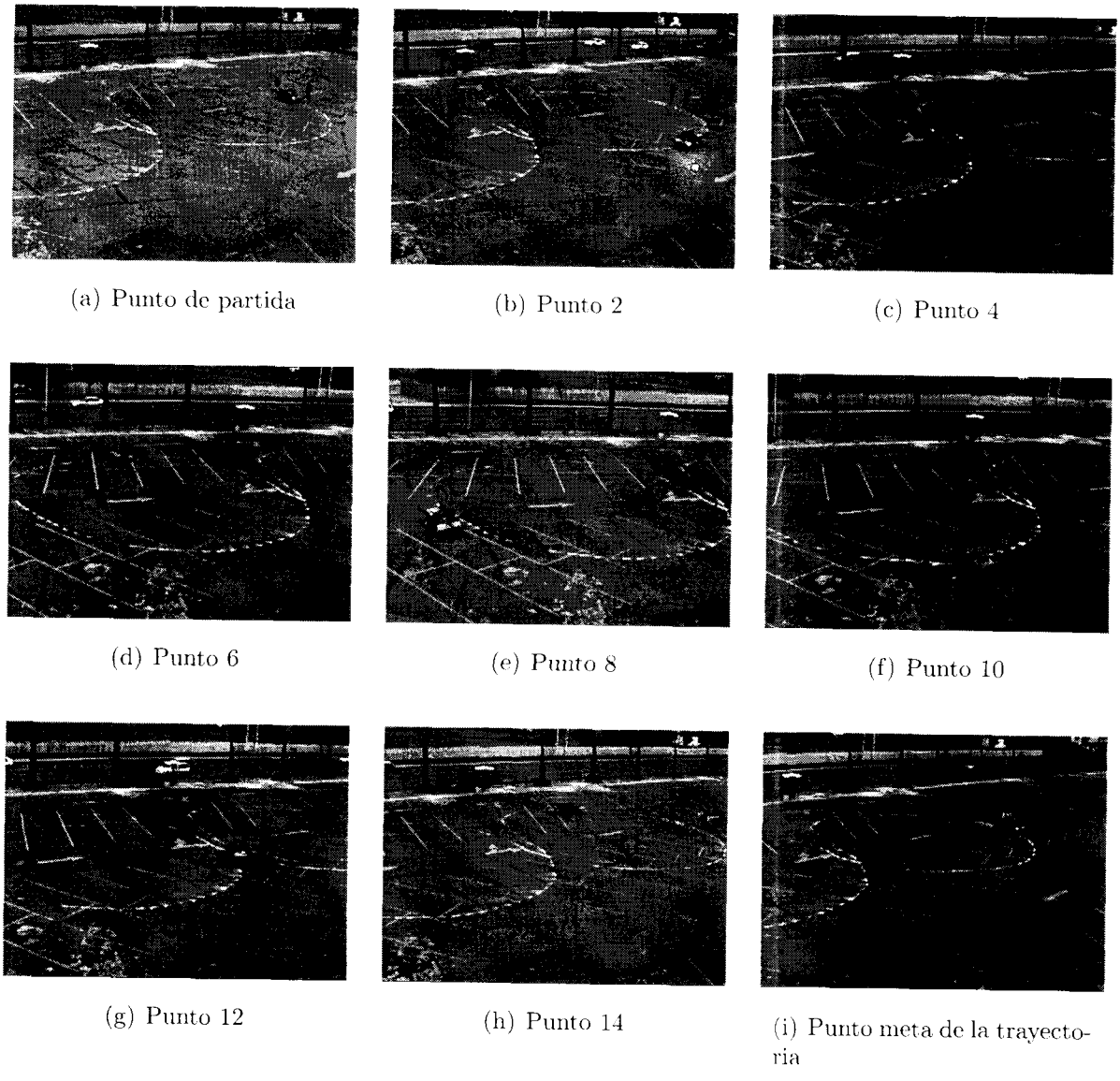
La trayectoria asignada al VA, en forma de "8", se integra por una secuencia de 16 puntos en el plano x, y, donde el primero es el inicio de la trayectoria, mientras que el punto meta es el último. Al unir estos puntos mediante rectas forman una figura en forma de "8". El objetivo del VA, es alcanzar cada uno de los puntos de la trayectoria definida por: (x_1, y_1),$(x_2, y_2) \ldots (x_{16}, y_{16})$, de forma autónoma. La diferencia entre el punto establecido y el punto alcanzado por el VA se establece como el error del seguimiento en la trayectoria. Los errores reportados en estas pruebas se obtuvieron al comparar los puntos generados en el plano x, y y el recorrido estimado por el sistema.

En la Figura 4.17 se observa una secuencia de imágenes, donde se muestra la evolución del VA realizando el seguimiento de la trayectoria en forma de "8", de manera autónoma. La Figura 4.17(a), muestra el punto de partida de la trayectoria; el VA, toma este punto como el punto 0, siendo el primer punto a alcanzar el punto siguiente P_1. En las Figuras 4.17(b) a la 4.17(h), se muestra la trayectoria recorrida por el VA. Mientras, que en la Figura 4.17(i) se observa la llegada al punto meta. La trayectoria se realizó cuatro veces en favor y en contra de la pendiente del terreno, con el objetivo de analizar los efectos de la pendiente del espacio de configuración.

En la Tabla 4.2, se presenta la trayectoria de referencia en forma de lista de puntos x, y. Además de la trayectoria recorrida por el VA. Se observa todos y cada unos de los puntos de la trayectoria fueron cubiertos por el VA.

En la Figura 4.18, se muestra la evolución de la trayectoria en forma de "8", donde se observa las trayectorias planeada y la recorrida por el VA, compuesta por 16 puntos en el plano x, y. En está gráfica el punto inicial es el punto $(18, 27)$, mientras el segundo es (24,24); por lo tanto, el recorrido es hacia la derecha hasta llegar al punto (18,9), que es el punto central de la trayectoria. La gráfica muestra un error mayor en los puntos 5 y 14; este error es debido a que el VA maniobra en contra de la pendiente del terreno, convirtiéndose la pendiente en una perturbación de par, provocando que el sistema de control de dirección requiera un mayor esfuerzo para contrarrestar el efecto de la pendiente, en el terreno de prueba. Mientras, que en la Tabla 4.3 se presenta el error estimado en el seguimiento de la trayectoria asignada, en forma de "8", donde se observa que el VA genera su máximo error en el punto 14, pasando a 2.84 m de la coordenada y.

La Figura 4.19, muestra el error que presentó el VA durante la evolución de la trayectoria, obteniéndose un error promedio, en todos los puntos, de 0.03 m en el eje x y 0.3 en el eje y. El error en el punto meta fue de 0.250 m. Considerando que la trayectoria recorrida es de 113 m, obtenemos un error en el punto meta de 0.22 % y 0.265 % de error promedio en el resto de los puntos de la trayectoria. Así como un error máximo de 2.84 m, en el eje y.



(a) Punto de partida (b) Punto 2 (c) Punto 4

(d) Punto 6 (e) Punto 8 (f) Punto 10

(g) Punto 12 (h) Punto 14 (i) Punto meta de la trayectoria

Figura 4.17: Evolución de la trayectoria tipo "8". recorrida por el VA. integrada por 16 puntos en el espacio de configuración x, y

Tabla 4.2: Lista de puntos que definen la trayectoria de referencia y recorrida

Lista de puntos coordenados	Trayectoria de referencia		Trayectoria recorrida	
	x	y	x	y
0	18.00	27.00	18.00	27.00
1	24.00	24.00	24.05	24.34
2	26.00	18.00	26.22	18.01
3	24.00	11.00	24.13	11.02
4	18.00	9.00	17.96	8.64
5	11.00	6.00	10.64	5.97
6	9.00	0.00	8.79	0.14
7	11.00	-6.00	11.09	-6.39
8	18.00	-9.00	18.11	-9.18
9	24.00	-7.00	24.12	-7.13
10	27.00	0.00	27.16	0.06
11	24.00	6.00	24.00	6.27
12	18.00	9.00	18.01	9.12
13	11.00	12.00	11.24	11.80
14	9.00	17.00	9.00	14.16
15	11.00	24.00	11.08	24.32
16	18.00	27.00	18.20	27.25

Además de obtener el desempeño en el seguimiento de la trayectoria, esta prueba permitió obtener el comportamiento del control adaptable durante el recorrido.

La Figura 4.20, muestra el comportamiento del control de dirección, del VA. En la gráfica se aprecia que la posición angular ϕ, sigue a la posición angular determinada por el control a punto. Asimismo se observa un mínimo retrazo entre el ángulo de referencia de la trayectoria y el ángulo real del control de dirección. Sin embargo, para obtener el desempeño del controlador, la Figura 4.21 muestra el error absoluto del controlador durante el seguimiento. Esta gráfica muestra 16 picos, que representan la lista de puntos enviada al VA, en el inicio del seguimiento el error en la dirección es cero, mientras que, al dirigirse al primer punto, el error aumenta hasta 15°, mismos que disminuyen cuando el VA alcanza este punto. Posteriormente, el VA alcanza los siguiente puntos que integran la trayectoria, hasta llegar al último. El error promedio del control de dirección, durante el recorrido es 2.09°, con un tiempo de estabilización de 2.1 *seg*.

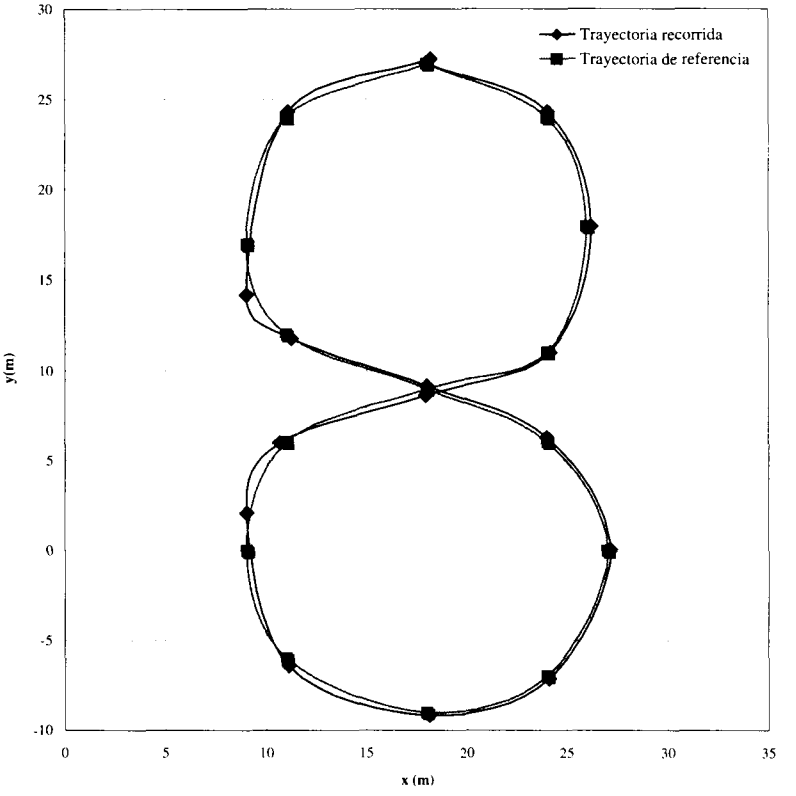


Figura 4.18: Ejecución de la trayectoria tipo "8", por el VA

Tabla 4.3: Error estimado en el recorrido de la trayectoria tipo "8"

Puntos	x	y
0	0.00	0.00
1	-0.05	-0.34
2	-0.22	-0.01
3	-0.13	-0.02
4	0.04	0.36
5	0.36	0.03
6	0.21	-0.14
7	-0.09	0.39
8	-0.11	0.18
9	-0.12	0.13
10	-0.16	-0.06
11	0.00	-0.27
12	-0.01	-0.12
13	-0.24	0.20
14	0.00	2.84
15	-0.08	-0.32
16	-0.20	-0.25

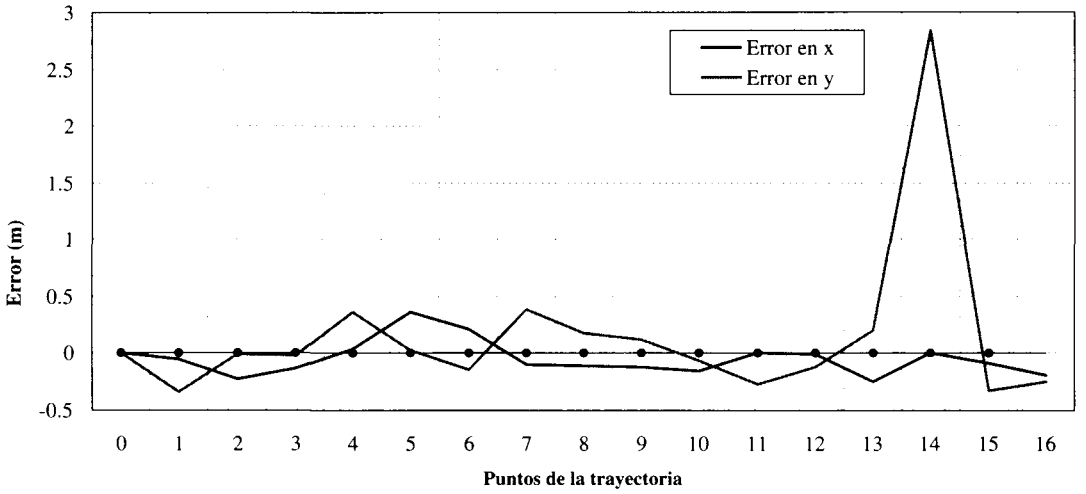


Figura 4.19: Error en el recorrido de la trayectoria en forma de "8".

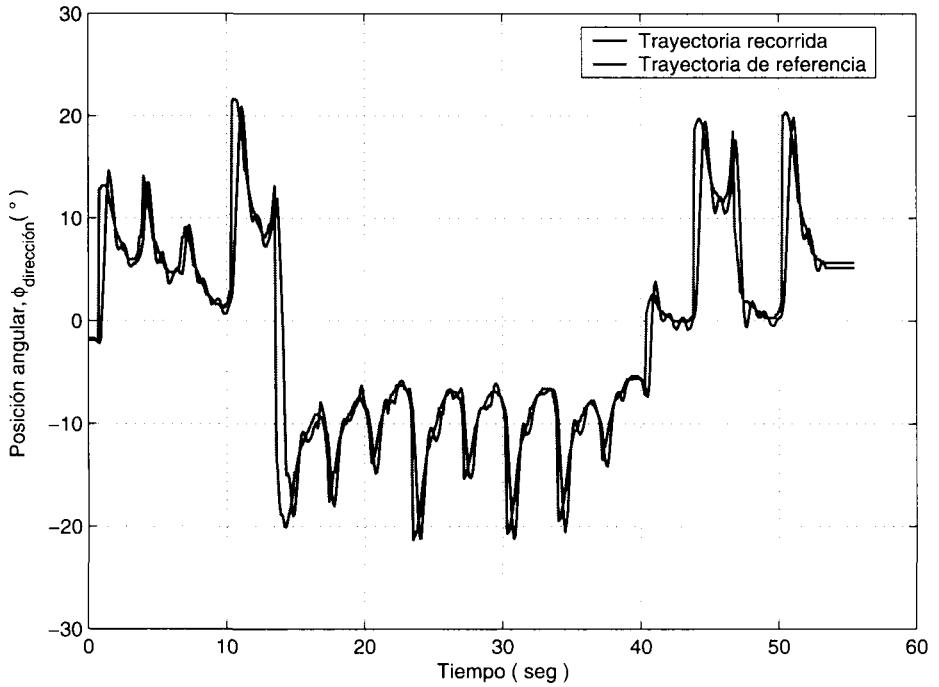


Figura 4.20: Desempeño del control de dirección, en la evolución de trayectoria tipo "8"

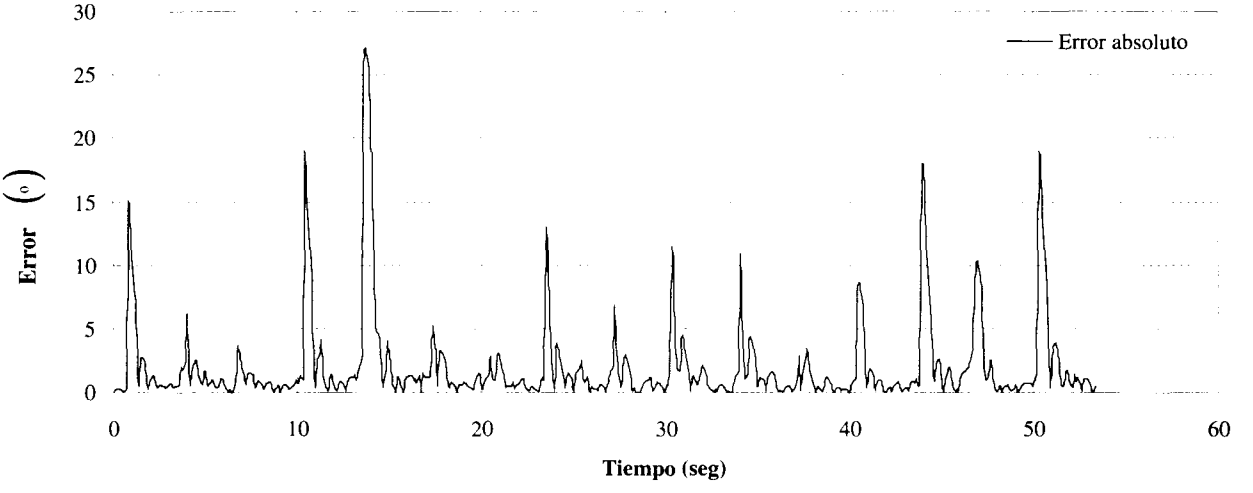


Figura 4.21: Error del control de dirección, en operación

Capítulo 5

Conclusiones

Esta tesis describe una metodología confiable para el desarrollo de un vehículo autónomo (VA) de escala real, a partir de un vehículo móvil utilitario. El propósito es que el vehículo sea capaz de seguir una trayectoria establecida y enseguida realizar una tarea. El énfasis en este trabajo radicó en la automatización del sistema de dirección e instrumentación del control de velocidad, con base en una arquitectura jerárquica de control.

El vehículo móvil utilizado para la comprobación de la metodología propuesta, fue un vehículo utilitario eléctrico, originalmente diseñado para trabajos diversos en la minería y en la industria. El vehículo no contaba con preparaciones o instrumentos que permitieran manipularlo de forma automática. Surgió entonces la necesidad de hacer algunas adecuaciones con el objetivo de automatizar e instrumentar algunos sistemas de acuerdo a la arquitectura de control. Los sistemas que integran al vehículo móvil son el de velocidad, dirección y frenado, entre los principales. El desarrollo del sistema de control para la dirección presentó una mayor complejidad en su automatización, en comparación al resto, debido a que no contaba con ningún mecanismo o actuador para su manipulación. Este trabajo se enfoca en la automatización de la dirección del vehículo móvil, los demás sistemas que permiten controlarlo fueron desarrollados utilizando la misma metodología de desarrollo, que es la razón de esta tesis.

La arquitectura de control que gobierna al VA se estableció con base en el modelo cinemático del vehículo móvil. Gracias a este modelo, fue posible definir los parámetros que rigen su comportamiento, como es el caso de la velocidad y dirección (v) y (ϕ) respectivamente. Mientras que la posición y orientación del vehículo, (x, y) y (θ), se calculan a través de la técnica de odometría (*dead reckoning*), mediante las mediciones obtenidas de los sensores colocados en los ejes de movimiento del vehículo y su modelo. Esta arquitectura permite al vehículo utilitario adquirir un grado de autonomía en la ejecución de una tarea, tal como en el seguimiento de una trayectoria dentro del espacio de configuración.

La operación del sistema se puede separar fundamentalmente en dos subsistemas.

En el primero, el usuario planea y envía a la memoria del VA, la trayectoria generada en una interfaz gráfica con el usuario (GUI), alojada en una computadora. Ahí la trayectoria se transforma en una serie de puntos, sobre el plano de trabajo. El segundo, consiste en el seguimiento de la trayectoria almacenada en la memoria del VA; la evolución inicia con la activación del controlador de velocidad que alcanza y mantiene una velocidad constante, mientras el control de dirección es comandado por el control a punto. El vehículo avanza al ir variando la dirección de referencia para llevar el vehículo al siguiente punto, hasta alcanzar al último punto de la trayectoria. En ese momento el control de trayectoria al dar por terminada la tarea, deshabilita a todos los controladores para detener el movimiento del VA.

La automatización del sistema de dirección del VA, se desarrollo básicamente en cuatro etapas, además de un ciclo de corrección, modificaciones y pruebas. La primera etapa, consistió en conocer las capacidades y limitaciones del sistema, así como los elementos que integran la dirección y al vehículo mismo. En la segunda, se obtuvieron los modelos tanto de los elementos mecánicos y electrónicos que integran al vehículo. En la tercera, se construyeron los sistemas mecánicos y electrónicos, que permitieron automatizar, con base en los diseños realizados en la etapa anterior. En la cuarta etapa, se implementaron los sistemas de control digital desarrollados para el control de velocidad y dirección, además de los módulos de comunicación de la arquitectura. Finalmente, se inició un ciclo de mejora a través de pruebas y validaciones, permitiendo detectar y corregir fallas regresando a la etapa de evaluación. El resultado de la aplicación de esta metodología es un prototipo de un Vehículo Autónomo de escala real.

Para el desarrollo del electromecanismo de actuación, primeramente se seleccionó el actuador de manipulación, con base en un análisis del sistema, resultando en un motor de CD con una transmisión capaz de generar el torque necesario para manipular al mecanismo de dirección. Aunque existen en el mercado servomotores con una alta precisión, se optó por un motor simple debido a que los elementos mecánicos que unen el volante con las llantas producen efectos no deseado tales, como: inercias, histéresis, tiempo muerto, entre otros efectos que harían perder la precisión del servomotor. Además, un servomotor tiene un costo y tiempo de entrega muy elevados, en comparación con el motor de CD de imán permanente implementado. El mecanismo adoptado se diseñó con determinada tolerancia en los ejes (x, y y z), para hacer ajustes al momento de acoplarlo con los engranes. Finalmente, el sistema implementado cumple con los requerimientos de actuación, por lo que se concluye que es completamente funcional.

El circuito de potencia, para el control del actuador, se divide en dos partes: la primera es la etapa de control que permite generar los niveles de polarización de los dispositivos de conmutación; la segunda es la etapa de potencia integrada por un puente H. Uno de los mayores problemas experimentados fue el manejo de potencia, para lo cual se instalaron disipadores de potencia a los dispositivos de conmutación, así como un sistema de enfriamiento por flujo de aire para mantener la temperatura de los dispositivos del puente H en rangos seguros. Finalmente, la interfaz de control

del motor soporta la potencia del sistema manteniendo un bajo consumo de corriente de operación.

El sensor de dirección desarrollado para retroalimentar la dirección del vehículo, tuvo un gran desempeño, a pesar de los problemas inherentes al tipo de transductor empleado tales, como ruido y los errores de conversión. El comportamiento presentado fue de 1.5° % de histéresis, resolución de 0.3 ° y una exactitud de 0.3%. Estos parámetros cumplen con los requerimientos del sistema. Considerando que el sensor se desarrolló a bajo costo, y a pesar del los problemas experimentados, el comportamiento del sensor de dirección fue completamente satisfactorio.

Respecto al sistema de control de dirección, se evidenció que el comportamiento de la planta no es lineal; lo cual produce errores en el funcionamiento del controlador, ya que la función de transferencia supone un modelo lineal. Sin embargo, la aproximación utilizada es bastante aceptable ya que se obtuvieron errores pequeños observados principalmente en los extremos de la dirección. Para mejorar el desempeño se utilizaron técnicas avanzadas de control, tal como control adaptable para reducir los errores ocasionados por los parámetros no modelados, como en la mayoría de los sistemas reales. El resultado obtenido fue una gran mejoría, lo que justifica el uso de este tipo de técnicas. Además la utilización de microcontroladores facilita la implementación de este tipo de técnicas. Finalmente, se concluye que se logró un buen desempeño en la automatización de la dirección del vehículo autónomo con errores de 0.2 ° ante un escalón y un error de 1.29 ° en el seguimiento del valor de referencia. Además, el tipo de arquitectura de control utilizada permitió descomponer el problema principal de control en pequeños módulos, donde cada módulo es independiente y tienen como objetivo recibir, ejecutar y reportar resultados de las tareas asignadas. Así, la descomposición en tareas del problema general presenta grandes ventajas y reduce significativamente la complejidad inicial del problema.

Se concluye además, que la metodología utilizada es funcional y confiable en el desarrollo de un VA, a partir de un vehículo existente, por lo que el método queda comprobado.

Los resultados globales obtenidos muestran un comportamiento del sistema en general satisfactorio con errores del 4 % en el seguimiento de una línea recta y del 2% en trayectorias tipo "8". Sin embargo, el sistema es perfectible ya que los errores obtenidos pueden ser minimizados con la inclusión de sensores globales como Sistema de Posicionamiento Globlal (GPS, por sus siglas en inglés) y brújulas, debido a que la estimación por odometría tiene el problema de acumulación de errores. Además, se podría aumentar la confiabilidad en la evolución de una trayectoria al dotarlo con una mayor cantidad de información del ambiente a través de cámaras de video, sensores de barrido como sonares, láser e incluso radar lo que permitirá tener un mayor conocimiento del ambiente. Sin embargo, para que un vehículo posea una completa autonomía es necesario resolver los problemas, no solamente de sensado,

sino también de: navegación, representación del ambiente, incertidumbre, control y rediseño de mecanismos. Una vez resueltos cada uno de estos problemas se podrán tener VA's navegando en las calles y autopistas de las ciudades. Sin embargo, estas expectativas son aún a largo plazo, ya que una competencia organizada en el 2004 por el pentágono (DARPA) de E.U. consistente en que un VA recorra una distancia de 227 km a lo largo del desierto, ninguno de los vehículos participantes finalizó la prueba. Este proceso nos presenta las áreas de oportunidad en la investigación y desarrollo de los diferentes sistemas que integran a un vehículo autónomo.

Apéndice A

Sistemas Mecánicos

Este Apéndice muestra las especificaciones del vehículo utilitario, además de los elementos mecánicos desarrollados para la automatización de la dirección. Los elementos diseñados fueron hechos en el paquete de diseño mecánico Mechanical Desktop.

A.1 Especificaciones

Las primeras etapas del método aplicado, para la conversión de un vehículo utilitario a un Vehículo Autónomo, permitió obtener las especificaciones de los sistemas mecánico, eléctrico, así como las dimensiones y parámetros dinámicos del vehículo utilitario eléctrico. En la tabla A.1 se muestran las principales especificaciones y parámetros del vehículo utilitario, de la compañía *Jhonson Industries*, modelo *SuperTruck*.

A.2 Diseños mecánicos

La automatización de la dirección de un Vehículo Autónomo, requirió el diseño de un mecanismo que permite manipular la dirección del vehículo en dos modos: manual y automático. En el dibujo A.1 se muestra el sistema mecánico diseñado para la manipulación del sistema de dirección a través de un actuador de CD.

Debido a que el actuador originalmente fue utilizado en sistemas de posicionamiento de antenas parabólicas fue necesario rediseñar el eje de la transmisión del motor, el que se muestra en la Figura A.2.

Tabla A.1: Especificaciones: mecánicas, eléctricas y dinámicas del vehículo utilitario eléctrico

Especificaciones Mecánicas, eléctricas y dinámicas del vehículo	
Dirección	Mecánica
Tipo	KingPins
Caja reductora	6 vueltas(límite)
Radio de Giro (m)	
Derecha	1.17
Izquierda	1.76
Ángulo de llantas (^{o})	
Derecha	51.99
Izquierda	39.99
Motor	C.D. Motor montado en el eje trasero
Potencia (hp)	5
Sistema de Alimentación	Eléctrico 36 Vcd.
Diferencial	Dana Spicer with 1800# rating relación:12.25:1
Suspensión	
Delantera	6 Muelles elípticas de trabajo rudo
Trasera	6 Muelles elípticas de trabajo rudo
Frenos	
Tipo	Tambor estándares, accionados por palanca.
Traseros	Sí
Delanteros	No
Dimenciones (m)	
Largo	3.2
Ancho	1.27
Distancia entre ejes	1.21
Peso (kg	
Peso total	635
Capacidad de Carga	545
Llantas	
Trasera	18-9.50-8 2
Delanteras	
Refacción	No
Sistema Eléctrico (Vcd)	36
Motor de tracción (Amp.)	40, 100(p)
Controlador (Amp.)	400. Estado Solído
Luces	Frontal, trasera
Alarma (^{o}C)	100
Claxón	1
Dirección de Avance	Delante, Reversa
Delante	Sí
Reversa	Sí
Interruptor de pánico	Sí
Cargador de baterías (Amp.)	25
Alambrado	#4 AWG, 14 ga. alambrado de control
Baterías	seis de 6 V. @175 Amph (capacidad máxima de las baterías)
Rendimiento (min.)	25 Amp @ 478 min. 75 Amp @ 115 *min.*
Parámetros dinámicos del Vehículo	
Velocidad (km/h)	
Delante	21
Reversa	22
Aceleración máx.(m/s)	
Delante	2.3
Reversa	2.5
Tiempo de frenado (s)	2 (22-0 Km/h)

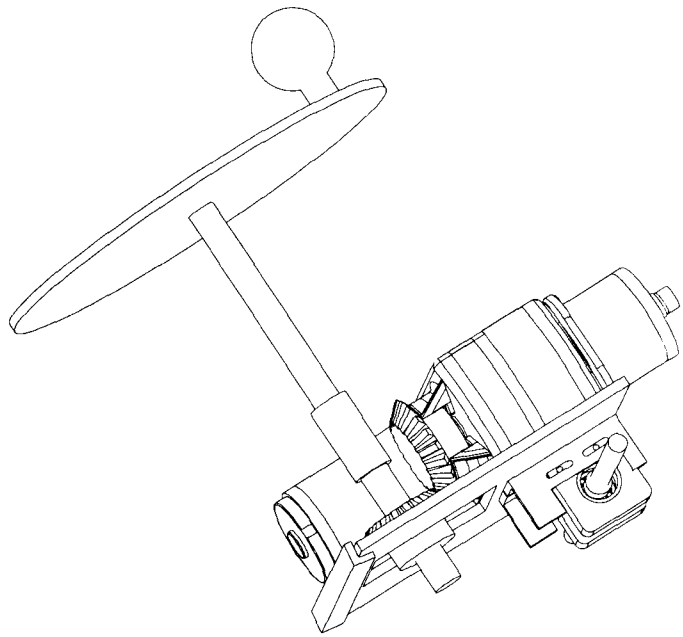


Figura A.1: Sistema electromecánico para el control de dirección del VA; se integra por una plataforma rotacional, engranes "bevel"y un motor de CD con transmisión

A.3 Instrumentación

Para el control de la dirección, fue necesario el diseño e implementación de un sensor de dirección, el cual retroalimenta la dirección de la llanta derecha del vehículo. La Figura A.3 muestra la implementación simulada del sensor del dirección sobre el eje de la bota del vehículo.

La Figura A.4, muestra el cople utilizado para montar el potenciómetro, utilizado como transductor en el sensor de dirección, a la terminación de la bota derecha del vehículo, donde se toma la lectura de la dirección del vehículo. Así mismo, la Figura A.5 muestra un soporte que permitió completar la sujeción del potenciómetro de precisión sobre la bota.

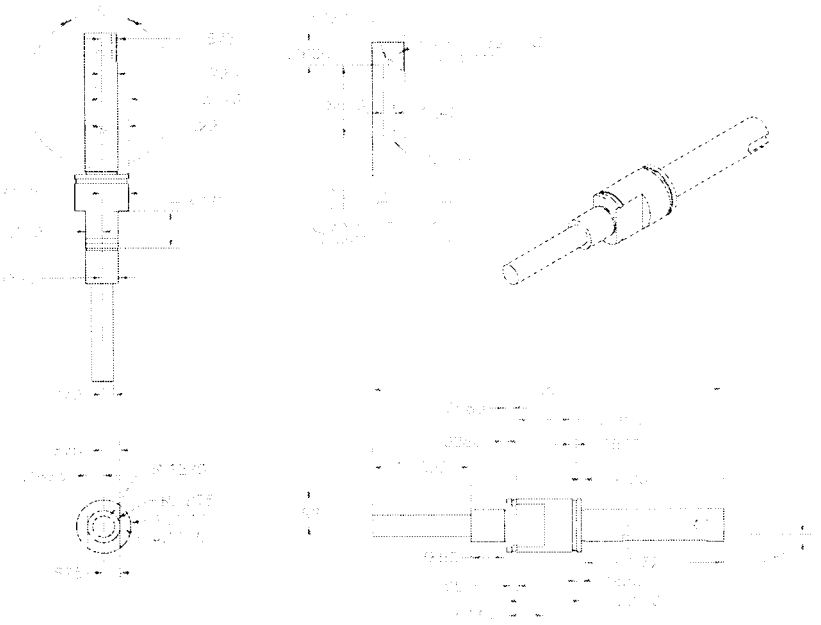


Figura A.2: Rediseño de flecha de transmisión para montaje de engranes "bevel"

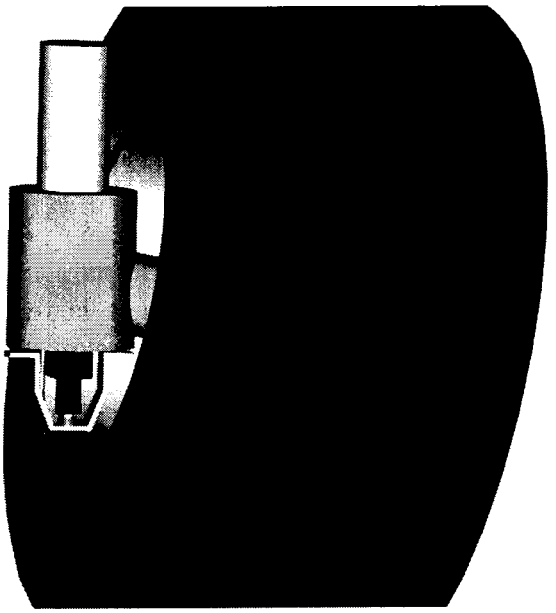


Figura A.3: Acoplamiento del sensor de dirección a la dirección

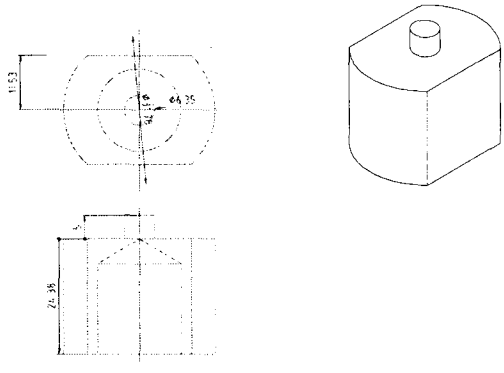


Figura A.4: Diseño de cople rígido para el montaje del sensor de dirección

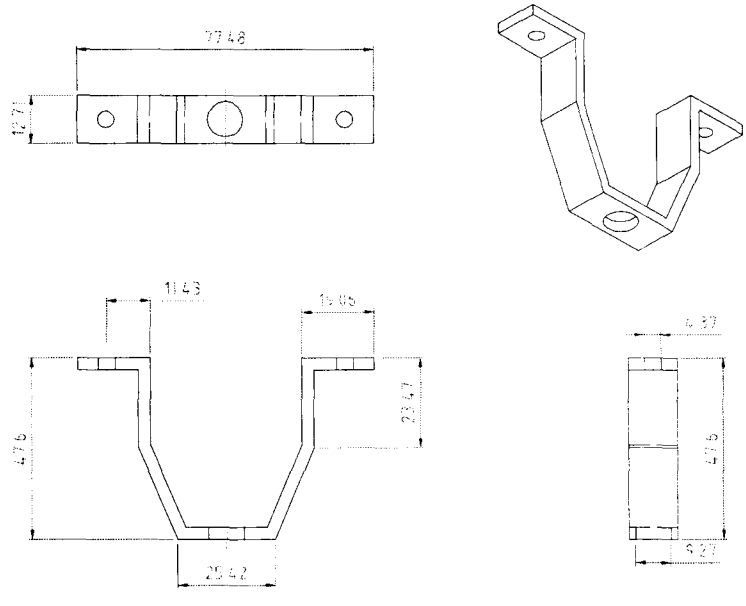


Figura A.5: Diseño del soporte de sujeción de transductor, potenciómetro

Apéndice B

Cálculo de x, y, θ del VA

El cálculo de la posición y orientación del vehículo se realiza con base en las mediciones de los sensores colocados en los ejes de movimiento del vehículo y en el su modelo cinemático, esta técnica es conocida también como conteo interno o *dead reckoning*. La figura B.1 muestra el modelo en términos geométricos, donde se observa la posición actual x, y y el incremento en un periodo de muetreo $\Delta x, \Delta y$, mientras la orientación se obtiene por los cambios de dirección de las llantas, $\Delta\phi$.

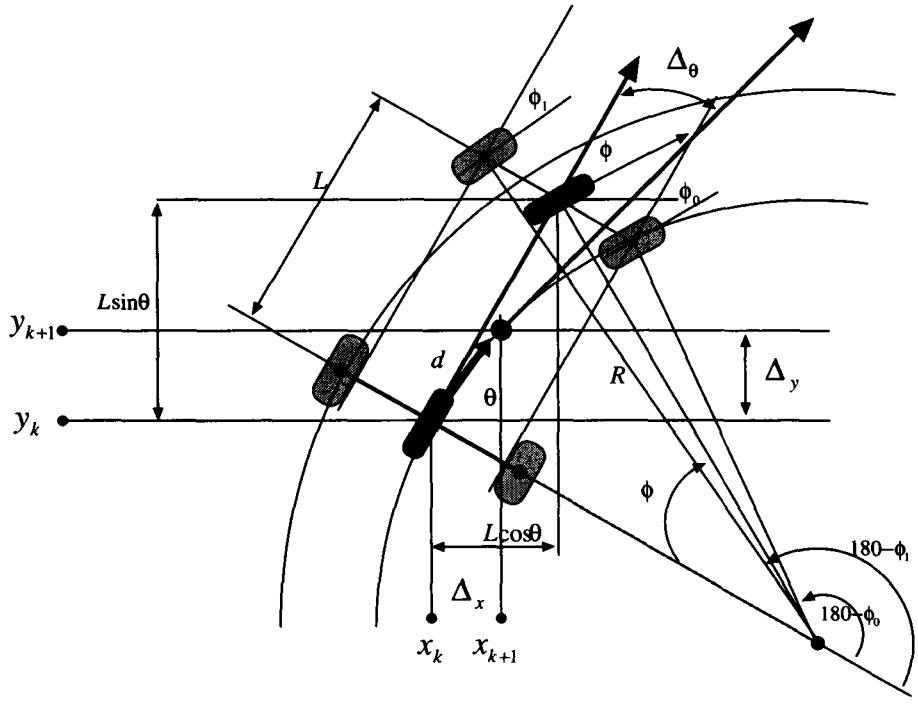


Figura B.1: Modelo geométrico del modelo bicicleta

Los incrementos Δx, Δy y $\Delta\theta$ dependen de la orientación de las llantas delanteras y de la distancia entre los ejes del vehículo. Para el cálculo de estos parámetros se hace la suposición que entre dos instantes de muestreo, k y $k+1$, el ángulo de giro se mantiene constante y el avance describre una línea recta. El radio de giro descrito por

el vehículo se obtiene por la siguiente ecuación,

$$R = \frac{L}{tan\phi} \tag{B.1}$$

Considerando que el desplazamiento entre los dos instantes de muestreo es representado por el vector d, que tiene una inclinación $\theta + \Delta\theta$, con origen en la posición anterior. El incremento de ángulo esta dado por la siguiente ecuación,

$$\Delta\theta = \frac{d}{R} = \frac{d \tan\phi}{L} \tag{B.2}$$

donde L es la longitud entre los ejes del vehículo, R es el radio de la trayectoria descrita por el desplazamiento del vahículo mientras ϕ es el ángulo actual de la dirección. Por lo tanto el incremento en x y y se obtienen mediante las siguientes relaciones,

$$\Delta x = d[cos(\theta + \Delta\theta)] \tag{B.3}$$

$$\Delta y = d[sen(\theta + \Delta\theta)] \tag{B.4}$$

La estimación de los parárametros es una tarea crítica, ya que de ella depende la correcta evolución del VA.

Apéndice C

Dinámica y control de la dirección

El control aplicado al sistema de dirección está basado en su modelo dinámico representado por el actuador de CD de imán permanente con transmisión, engranes de acoplamiento y el reductor, como se observa en la Figura C.1. La cantidad de dientes, de los engranes de la transmisión, son n_1, n_2. Asimismo, los dientes de los engranes del acoplamiento al volante son n_3, n_3 (misma cantidad de dientes) y el reductor de dirección n_4, n_5. Por facilidad en esta formulación, se considerara que la salida, después del reductor, es la carga final del sistema, debido a que no existe otra transformación de movimiento, sólo un cambio de eje.

C.1 Análisis de la planta a controlar

El sistema equivalente de la planta a controlar se muestra en la Figura C.2, donde se observa el sistema electromecánico. Los desplazamientos angulares de los ejes del motor, transmisión, volante y reductor, corresponden a: $\theta_m, \theta_{m_1}, \theta_{m_2}, \theta_{out}$, respectivamente. Por ende, $\theta_{m_1}/\theta_m = n_1/n_2$, $\theta_{m_2}/\theta_{m_1} = n_3/n_3$ y $\theta_{out}/\theta_{m_2} = n_4/n_5$. Siendo, J_m, b_m; J_{m_1}, b_{m_1}; J_{m_2}, b_{m_2}; J_{m_3}, b_{m_3}; los momentos de inercia y los coeficientes de fricción viscosa para cada elemento de la cadena, es importante mencionar que la fricción de las llantas contra el piso está considerada en b_{m_3}, al igual que el momento de inercia de las llantas en J_{m_3}.

Analizando desde el torque aplicado al eje del motor (T_m), hasta el torque de salida de carga (T_{out}), se obtienen las siguientes ecuaciones de equilibrio. Sobre el eje del motor,

$$T_m = J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m + T_1 \tag{C.1}$$

donde T_m es el par proporcionado por el motor de CD y T_1 es el par de la carga referida al engrane n_1. T_2 es el torque en el eje de la transmisión del actuador,

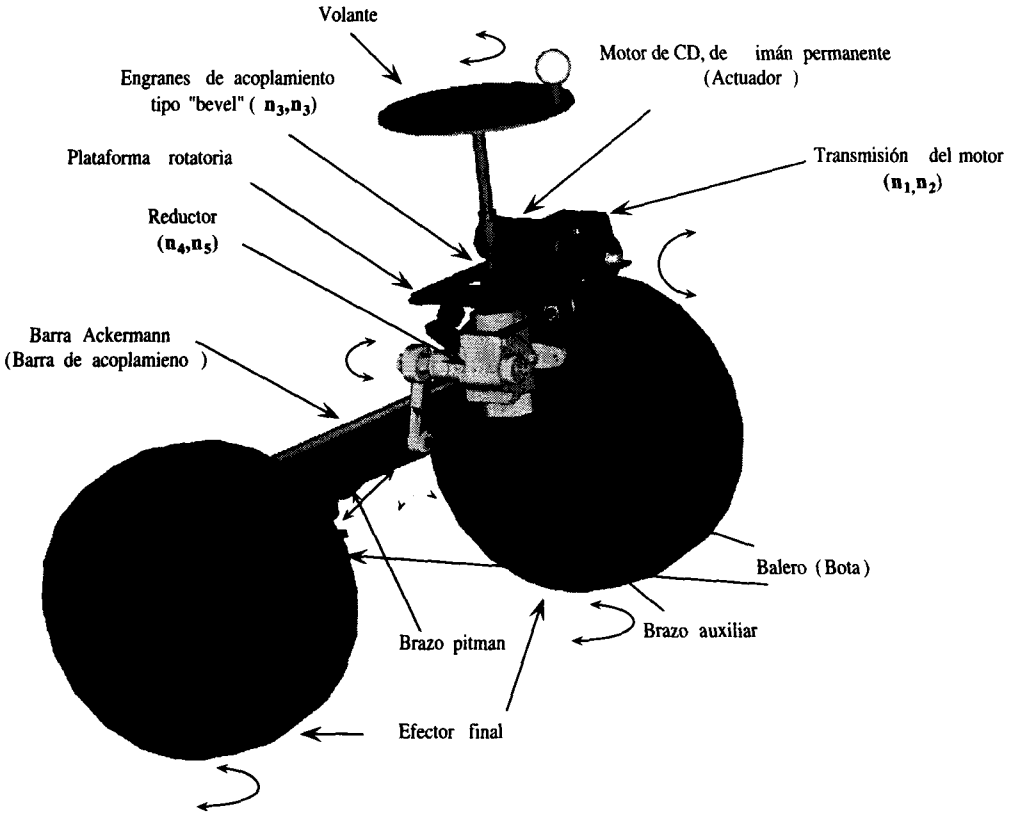


Figura C.1: Sistema de dirección, integrado por motor de CD, transmisión, plataforma rotatoria, reductor, brazos pitman y auxiliar, y sistema Ackermann

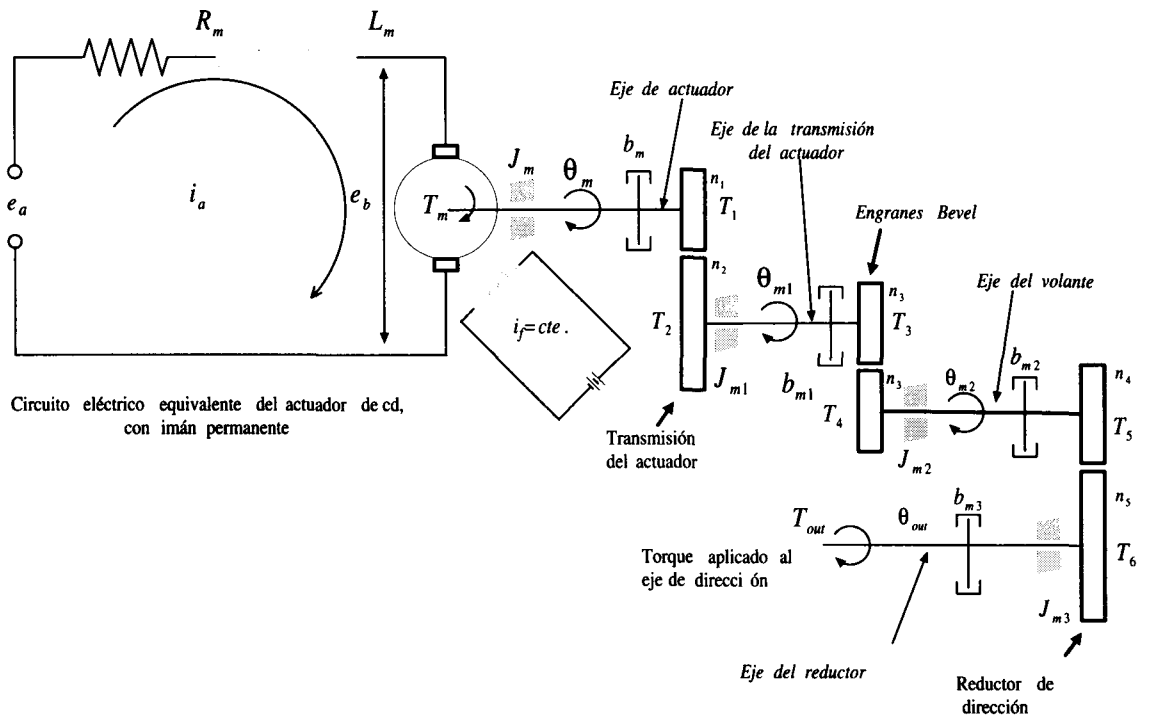


Figura C.2: Diagrama del sistema de dirección

$$T_2 = J_{m_1}\ddot{\theta}_{m_1} + b_{m_1}\dot{\theta}_{m_1} + T_3 \tag{C.2}$$

Así, T_2 es el par transmitido al engrane de la transmisión del actuador y T_3 es el par de la carga debido al resto de los engranes. Si tomamos en cuenta que los engranes de acoplamiento, entre el eje de la transmisión del actuador y el eje del volante del vehículo, son engranes con una relación 1 : 1, es posible extraerlos del modelo debido a que el desplazamiento angular $\theta_{m_1} = \theta_{m_2}$. Además, conociendo que el trabajo realizado por los engranes de la transmisión es el mismo,

$$T_2 = T_1\frac{n_2}{n_1} \tag{C.3}$$

donde $\frac{n_1}{n_2} < 1$, cuya relación representa un reductor de velocidad y un multiplicador de torque en la salida del eje del volante,

$$T_5 = J_{m_3}\ddot{\theta}_{out} + b_{m_3}\dot{\theta}_{out} + T_6 \tag{C.4}$$

T_6 es el torque de la carga (llantas), mientras el T_5 es el par transmitido al último de los engranes del reductor. El trabajo de T_5 y T_6 es el mismo,

$$T_6 = T_5\frac{n_5}{n_4} \tag{C.5}$$

mientras el desplazamiento angular de salida θ_{carga} se relaciona con θ_m,

$$\theta_{out} = \theta_{m_2}\frac{n_4}{n_5} \tag{C.6}$$

dado que $\theta_{m_2} = \theta_{m_1}$,

$$\theta_{carga} = \theta_{m_1}\frac{n_4}{n_5} = \theta_m\frac{n_1}{n_2}\frac{n_4}{n_5} \tag{C.7}$$

Sustituyendo a T_1,T_2, T_3 y T_4 de las ecuaciones (C.1), (C.2) y (C.4),

$$T_m = J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m + \frac{n_1}{n_2}(J_{m_1}\ddot{\theta}_{m_1} + b_{m_1}\dot{\theta}_{m_1}) + \frac{n_1}{n_2}\frac{n_4}{n_5}(J_{m_3}\ddot{\theta}_{out} + b_{m_3}\dot{\theta}_{out} + T_6) \tag{C.8}$$

Al rescribir la ecuación anterior en términos de θ_m y sus derivadas respecto al tiempo,

$$T_m = \left[J_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 J_{m_1} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{n_4}{n_5}\right)^2 J_{m_3}\right]\ddot{\theta}_m$$

$$+ \left[b_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 b_{m_1} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{n_4}{n_5}\right)^2 b_{m_o ut}\right]\dot{\theta}_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)\left(\frac{n_4}{n_5}\right)T_{out} \tag{C.9}$$

Se obtienen expresiones referentes al momento de inercia y el coeficiente de fricción viscosa equivalentes, de los engranes referidos a la flecha del actuador de CD,

$$J_{m_{EQ}} = J_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 J_{m_1} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{n_4}{n_5}\right)^2 J_{m_3} \tag{C.10}$$

$$b_{m_{EQ}} = b_m + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 b_{m_1} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2\left(\frac{n_4}{n_5}\right)^2 b_{m_o ut} \tag{C.11}$$

Las ecuaciones (C.10), y (C.11) representan el momento de inercia equivalente y el coeficiente de fricción viscosa equivalente del sistema mecánico de dirección, haciendo las siguientes consideraciones $J = J_{m_{EQ}}$ y $b = b_{m_{EQ}}$, tenemos la ecuaciones de equilibrio resultante de la carga referida al eje del motor, [Ogata 95].

$$T_m = J_{m_{EQ}}\ddot{\theta}_m + b_{m_{EQ}}\dot{\theta}_m + nT_{out}$$

donde, $n = \frac{n_1}{n_2}\frac{n_3}{n_4}$

Finalmente, en la Figura C.3 se muestra el modelo equivalente del sistema electromecánico para el control de dirección del VA.

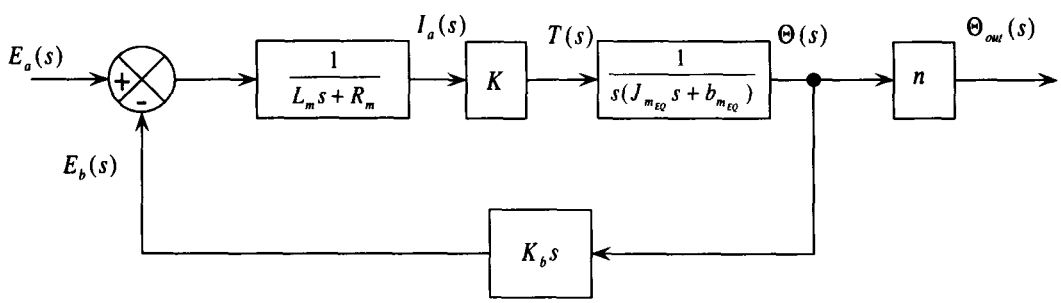


Figura C.3: Diagra a bloques de la unidad de corrección para el control de la dirección del VA.

Bibliografía

[Albores 06] Carlos Albores. *Análisis y Arquitectura para la Automatización de Vehículos, Disertacion en proceso.* PhD thesis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2006.

[Beer 93] Ferdinand P. Beer y Johnston E. Russel Jr. Mecánica vectorial para ingenieros. McGrawHill, México, 1993.

[Bolton 01] W. Bolton. Mecatrónica : sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Marcombo Alfaomega, México, 2da. edition, 2001.

[Corripio 90] Armando Corripio. Tunning of control systems. Instrument Society of America, Lousiana, U.S.A., 1990.

[Dudek 00] Gregory Dudek y Michael Jenkin. Computational principles of mobile robotics. Cambreidge University Press, 2000.

[Everett 95] H.R. Everett. Sensors for mobile robots theory and aplication. A. K. Peters, Ltd, E.U, 1995.

[Kelly 98] Alonzo Kelly y Anthony Stentz. *An Analysis of Requirements for Rough Terrain Autonomous Mobility.* Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA E.U. 15213, 1998.

[Latombe 91] Jean Claude Latombe. Robot motion planning. Kluwer Academic, 1991.

[Laumond 97] Jean-Paul Laumond, editor. Robot motion planning and control. Springer, LAAS-CNRS, Toulouse, France, 1997.

[Milliken 95] William F. Milliken y Douglas L. Milliken. Race car vehicle dynamics. SAE International, U.S., 1995.

[Ogata 93] Katsuhiko Ogata. Ingeniería de control moderna. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México, 1993.

[Ogata 95] Katsuhiko Ogata. Discrete-time control systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. E.U, 2da. edition, 1995.

[Ollero 01] Aníbal Ollero. Robótica manipuladores y robots móviles. Alfa Omega, España, 2001.

[Palacios 00] Gerardo Javier Palacios. Control de dirección de un vehículo autónomo. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2000.

[Rehg 00] James Rehg. Introduction to robotics in cim systems. Prentice-Hall, Inc., EE.UU., 2000.

[Smith 02] Carlos Smith. Automated continuous process control. John Wiley & Sons, Inc., New York U.S.A., 2002.

Centro de Información-Biblioteca
3000200663231 9