



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN
VEHÍCULO QUE EVADE COLISIONES A
TRAVÉS DE LOS SISTEMAS STEER BY WIRE
Y DIFFERENTIAL DRIVE.**

T E S I S

Que para optar por el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA
MECÁNICA - DISEÑO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

ING. EDUARDO ULISES GONZÁLEZ ZAVALA

TUTOR:

Dr. VÍCTOR JAVIER GONZÁLEZ VILLELA



MÉXICO D.F.

MARZO 2011

JURADO ASIGNADO.

Presidente: Dr. López Parra Marcelo
Secretario: Dr. Borja Ramírez Vicente
Vocal: Dr. González Villela Víctor Javier
1er. Suplente: Dr. Ramírez Reivich Alejandro Cuauhtémoc
2do. Suplente: M.I. Díaz Hernández Octavio

Ciudad Universitaria, México, D.F.

TUTOR DE TESIS:

Dr. González Villela Víctor Javier

FIRMA

Agradecimientos.

A Dios por permitirme terminar con vida y salud una etapa más en mis estudios.

A mis padres Jaime González Bolaños y Lilia Zavala Vargas por brindarme a lo largo de mi vida todo el apoyo con el que un hijo puede contar y gracias por su confianza depositada en mí en esta nueva etapa. A mis hermanos Liliana Esmeralda y Jaime Alejandro por estar a mi lado a lo largo de mi vida.

A mi novia María Guadalupe Nieto Gutiérrez por todo su apoyo y paciencia a lo largo de mis estudios de maestría. Gracias por ser un pilar importante en mi vida. Te amo preciosa.

A mi tutor el Dr. Víctor Javier González Villela, por el ánimo y el apoyo constante durante la realización de mi maestría. Más que un tutor, lo considero mi amigo.

A CONACYT por todo ese apoyo económico que facilitaron mis estudios y mi estancia en la ciudad de México. Gracias por brindarnos a los becarios apoyo económico aún en los periodos vacacionales, recursos que los destiné a la mitad de mi proyecto. De verdad muchas gracias.

Agradezco el apoyo brindado por la DGAPA, UNAM, a través del proyecto PAPIIT IN108308, con título: "Investigación y desarrollo en robótica móvil, robótica paralela y sistemas mecatrónicos" durante la realización de este trabajo.

Al Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich por despertar en mí la capacidad de diseñar en bien de la Sociedad.

A los profesores de mi Jurado, por las correcciones oportunas y pertinentes.

A la UNAM y a la Facultad de Ingeniería por todos esos valores y conocimientos brindados en sus instalaciones.

Índice.

Resumen.

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Aspectos generales.....	1
1.2 Trabajos previos.....	1
1.3 El siguiente paso.....	2
1.4 Objetivos.....	2
1.5 Justificación.....	2
1.6 Metodología.....	3
2. SISTEMAS DE DIRECCIÓN Y TREN PROPULSOR DE UN AUTOMÓVIL.....	4
2.1 Sistema de dirección.....	4
2.2 Sistema tren propulsor.....	7
3. SISTEMAS <i>DRIVE BY WIRE</i>	10
3.1 Sistema <i>Steer By Wire</i>	10
3.2 Sistema <i>Differential Drive</i>	12
4. SISTEMAS DE EVASIÓN.	13
4.1 Sistemas de evasión de obstáculos.....	13
4.2 Sistemas de evasión de colisiones.....	13
5. DESARROLLO DEL PROTOTIPO.....	15
5.1. Vehículo piloto experimental.....	16
5.2. Tablero de control.....	16
6. EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO.....	18
6.1 Desarrollo del sistema <i>Steer By Wire</i>	18
6.2 Desarrollo del sistema <i>Differential Drive</i>	24
6.3 Desarrollo del sistema de evasión de colisiones.....	27
6.3.1 Detección de obstáculos.....	27
6.3.2 Implementación en el vehículo piloto.....	31
6.3.2.1 Colisión frontal.....	31
6.3.2.2 Colisión lateral izquierda.....	36
6.3.2.3 Colisión lateral derecha.....	41

6.4 Resultados.....	41
7. CONCLUSIONES.....	50
Referencias.....	52
Apéndice A. Diagrama de bloques de las ecuaciones Ackerman y de las ecuaciones obtenidas por González-Villela.....	55
Apéndice B. Programa en C para el desarrollo de los sistemas <i>Steer By Wire</i> , <i>Differential Drive</i> y evasión de colisiones para un microcontrolador Arduino Mega.....	55

Índice de figuras.

Figura 1. Ángulo de inclinación del eje del brazo de dirección. Tomada de Ellinger y Hathaway, 1980.

Figura 2. Convergencia (*Toe-in*) y divergencia (*Toe-out*). Tomada de Ellinger y Hathaway, 1980.

Figura 3. Formulación cinemática de la dirección Ackerman. Tomada de Giles, 1968.

Figura 4. Formulación cinemática de la dirección Ackerman con una rueda virtual. Tomada de Edzko y Cheok, 2004.

Figura 5. Tracción diferencial trasera. Tomada de González Villela V. y Guadarrama Liho J., 1997.

Figura 6. Velocidad angular de la rueda.

Figura 7. Formulación cinemática del vehículo 4WS/4WD. Tomada de Min Wan Choi y colaboradores, 2008.

Figura 8. Formulación cinemática del vehículo con doble eje de dirección. Tomada de Mu Chunyan y colaboradores, 2010.

Figura 9. Sistemas *Drive By Wire*: sistema de aceleración (*Throttle By Wire/TBW*), sistema de frenos (*Brake By Wire/BBW*), sistema de transmisión (*Shift By Wire*), sistema de embrague (*Clutch By Wire/CBW*), sistema de dirección (*Steer By Wire/SBW*). Tomada de Doriben y Klaus, 2002.

Figura 10. Sistema *Steer By Wire* con un solo actuador. Tomada de Geng y Wang, 2010.

Figura 11. Sistema *Steer By Wire* con dos actuadores, uno por rueda. Tomada de Lei-yan y Ping-li, 2009.

Figura 12. Sistema *Steer By Wire* Volvo. Tomada de www.volvokoncernen.se.

Figura 13. Automóvil con las cuatro ruedas direccionables. Tomada de Bertoluzzo, 2004.

Figura 14. Ejemplo de un actuador en un sistema *Steer By Wire*. Además esta rueda incorpora la tracción (*in-wheel engines*) y la suspensión en sí misma (SIEMENS VDO).

Figura 15. Sistema *Steer By Wire* de Mercedes Benz. Tomada de www.mercedes-benz.de.

Figura 16. Representación del método de Campos Potenciales. Tomada de Cameron, 1994.

Figura 17. Reconocimiento de obstáculos mediante visión. Tomada de www.vmalayalee.com/vm/article_images.

Figura 18. Reconocimiento de obstáculos mediante sensores infrarrojos y ultrasónicos.

Figura 19. Diagrama de bloques del prototipo.

Figura 20. Vehículo piloto con sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*.

Figura 21. Geometría del vehículo piloto.

Figura 22. Mandos de control.

Figura 23. Control proporcional.

Figura 24. Diagrama de flujo del sistema *Steer By Wire*.

Figura 25. Esquema del Robot tipo carro ubicado en un marco de referencia XY. Tomado de González-Villela, 2006.

Figura 26. Panel frontal del programa en *LabView*.

Figura 27. Desarrollo Ackerman con desplazamiento de rueda virtual.

Figura 28. Obtención de la ecuación lineal para el desplazamiento x de la rueda virtual.

Figura 29. Diagrama de flujo del sistema *Steer By Wire* con rueda virtual flotante.

Figura 30. Diagrama de flujo del sistema *Differential Drive*.

Figura 31. Sistema de tracción con desplazamiento de rueda virtual.

Figura 32. Diagrama de flujo del sistema *Differential Drive* con rueda virtual flotante en función de la velocidad.

Figura 33. Etapa de potencia para el sistema *Differential Drive*.

Figura 34. Caracterización de sensores infrarrojos.

Figura 35. Sensor SHARP GP2Y0A21YK0F.

Figura 36. Sensor SHARP GP2Y0A02YK0F.

Figura 37. Esquema de la evasión de colisión frontal.

Figura 38. Diagrama de flujo del de sensor SHARP GP2Y0A02YK0F para conocer la distancia a un obstáculo.

Figura 39. Obtención de la ecuación lineal para el límite.

Figura 40. Obtención de la ecuación lineal para la línea de influencia.

Figura 41. Obtención de la velocidad calculada del vehículo (v_{alc}) en el área de proporcionalidad.

Figura 42. Diagrama de flujo para la evasión de colisión frontal.

Figura 43. Esquema de la evasión de colisión lateral izquierda.

Figura 44. Diagrama de flujo del de sensor SHARP GP2Y0A21YK0F para conocer la distancia a un obstáculo.

Figura 45. Obtención de la ecuación lineal para el límite lateral.

Figura 46. Obtención de la ecuación lineal para la línea de influencia lateral.

Figura 47. Obtención de la orientación calculada del vehículo (θ_c) en el área de proporcionalidad lateral.

Figura 48. Diagrama de flujo para la evasión de colisión lateral izquierda.

Figura 49. Apreciación visual de la orientación de las ruedas de dirección. Primer imagen paralelas, segunda imagen 20° de orientación del vehículo. Radio de dirección 1:0.633.

Figura 50. Apreciación visual de la orientación de las ruedas de dirección. Primer imagen 30° de orientación del vehículo, segunda imagen 40° . Radio de dirección 1:0.633.

Figura 51. Experimentación en la evasión frontal.

Figura 52. Experimentación en la evasión lateral.

Figura 53. Obtención de los errores finales.

Índice de gráficos.

Gráfica 1. Caracterización del potenciómetro.

Gráfica 2. Comportamiento del sistema de dirección del vehículo piloto el cual arroja un radio de dirección de 1:0.633.

Gráfica 3. Comportamiento del sistema de tracción para el vehículo piloto.

Gráfica 4. Curva Distancia-Voltaje.

Gráfica 5. Sección 90-20 cm $y = -56.27x + 92.982$.

Gráfica 6. Sección 20-10 cm $y = -9.38x + 32.165$.

Gráfica 7. Sección 10-6 cm $y = -5.55x + 23.114$.

Gráfica 8. Curva Distancia-Voltaje.

Gráfica 9. Sección 130-60 cm $y = -75.268x + 132.257$.

Gráfica 10. Sección 60-13 cm $y = -27.647x + 86.541$.

Gráfica 11. Variación del radio de dirección debido al desplazamiento de la rueda virtual en función de la velocidad para la geometría $l=0.135\text{m}$ y $d=0.175\text{m}$ del vehículo piloto.

Gráfica 12. Variación del radio de dirección debido al cambio de la geometría del vehículo con velocidad constante de 0 m/s.

Gráfica 13. Variación de la diferencia de velocidades de las ruedas de tracción debida al desplazamiento de la rueda virtual.

Gráfica 14. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 161 m/s.

Gráfica 15. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 113 m/s.

Gráfica 16. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 81 m/s.

Gráfica 17. Variación de la orientación del vehículo en la evasión lateral a 10° de orientación del vehículo.

Gráfica 18. Error final del sensor SHARP GP2Y0A21YK0F a lo largo de su radio de alcance.

Gráfica 19. Error final del sensor SHARP GP2Y0A02YK0F a lo largo de su radio de alcance.

RESUMEN

En México, existen cerca de 14,000 muertes al año debido a accidentes automovilísticos por conducir en estado de ebriedad. Una forma de reducir este número, es evitando que los conductores manejen en estado de ebriedad, pero aún con campañas de concientización y alcoholímetros en las avenidas no se ha podido reducir el número notablemente. La solución propuesta en este trabajo es hacer que el automóvil evada las colisiones aún si el conductor no las evade por sí mismo, reduciendo grandemente las posibilidades de colisionar contra algún obstáculo.

En este trabajo se investiga la evasión de colisiones de un vehículo piloto equipado con el sistema de dirección por cable *Steer By Wire* y con el sistema de tracción diferencial *Differential Drive* para su uso futuro en los automóviles comerciales. Se llamará vehículo piloto a un vehículo a escala de un vehículo de transporte personal, el cual servirá para realizar los experimentos correspondientes de una manera económica. Los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive* se desarrollan a partir de la cinemática del vehículo piloto. Se experimenta el sistema *Steer By Wire* usando la formulación Ackerman. Además, se extrapolan las ecuaciones Ackerman para poder desplazar la rueda virtual, esto con la finalidad de modificar el radio de dirección del vehículo en función de la velocidad. Se logró aumentar el radio de dirección a velocidades altas, logrando con esto tener un mejor control del vehículo. El sistema de evasión de colisiones se conforma de sensores infrarrojos, el parámetro seleccionado para evadir las colisiones es la distancia, dejando el tiempo como complemento para otras acciones. El vehículo logró evadir las colisiones lateral y frontal a distancias cercanas a las proporcionadas por las ecuaciones de evasión programadas en el microcontrolador. La fusión del sistema de evasión de colisiones con los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive* derivan en el desarrollo de un vehículo semiautónomo, el cual evade colisiones automáticamente sin ningún tipo de intervención por parte del conductor.

La tesis se conforma de 7 secciones. La sección 1 brinda los aspectos generales así como los trabajos previos en esta área de investigación. La sección 2 trata con la teoría para el desarrollo de sistemas de dirección y de tracción. Los sistemas *Drive By Wire*, *Steer By Wire* y *Differential Drive* se describen en la sección 3. La sección 4 muestra los tipos de sistemas de evasión. En la sección 5 se muestra el desarrollo general del proyecto. El desarrollo y la experimentación de los sistemas de evasión de colisiones, *Steer By Wire*, y *Differential Drive* se realizan en la sección 6, además se analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas durante el proyecto. Por último la sección 7 muestra las conclusiones a las que se llegaron al final del proyecto así como el trabajo futuro.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Aspectos generales.

En años recientes, requerimientos más estrictos en términos de control de emisiones, manejabilidad, y seguridad en los automóviles han guiado al desarrollo del concepto de conducir por cable o *Drive By Wire*, cuyas siglas son DBW. En los sistemas DBW no existe un enlace directo o mecánico entre el conductor y el elemento final en el automóvil. Los sistemas DBW generalmente son sistemas mecatrónicos los cuales recopilan las necesidades de operación del conductor, las transforman en señales eléctricas, son procesadas, analizadas y enviadas a los actuadores finales, los cuales interactúan mecánicamente con el automóvil. En los sistemas DBW se sustituyeron los enlaces mecánicos entre el conductor y el automóvil por cables. El sistema DBW de mayor interés en la actualidad es el sistema de dirección por cable o *Steer By Wire*.

En cuanto a su operación, los automóviles se pueden clasificar de tres formas: autónomos, semiautónomos y comerciales. Los automóviles autónomos operan de forma automática, mediante cámaras de video, sensores y actuadores, sin necesitar la intervención de algún conductor. En los automóviles comerciales, los automóviles que se venden hoy en día en nuestro país, la operación general del automóvil la realiza completamente el conductor. La operación de los automóviles semiautónomos la realiza el conductor y existen intervenciones, según el diseño del sistema, que automatizan la conducción.

El desarrollo de automóviles autónomos y semiautónomos en México es muy escaso, debido a las grandes inversiones económicas que se necesitan para realizar dichos proyectos. En la actualidad, se han desarrollado todo tipo de robots autónomos con fines muy específicos, en donde no es fácil apreciar un fin de aplicación automotriz, quedando los proyectos a escala de robots.

México es un país en donde es complicada la implementación de automóviles autónomos, esto debido a la mala infraestructura civil de nuestro país. Las calles y avenidas de este país se encuentran llenas de baches y topes, los cuales son elementos muy difíciles de detectar y sobrellevar en un vehículo autónomo. Esto hace que los proyectos de investigación de automóviles autónomos no tengan su aplicación en un futuro cercano en nuestro país, dejando esta área de investigación cerca del olvido.

El desarrollo de tecnología automotriz en nuestro país es muy escasa, esto es debido a que no existen en Universidades departamentos o carreras especializadas en el ramo automotriz, tal como es el caso de países como Alemania y China, en donde año con año egresan especialistas automotrices dispuestos a convertirse en tecnólogos de este ramo.

1.2. Trabajos previos.

Hoy en día, se pueden encontrar una gran cantidad de trabajos publicados sobre los sistemas *Drive By Wire*. Los primeros artículos publicados en introducir este concepto se remontan a los comienzos de este siglo. En el 2001 se analiza un vehículo con cuatro ruedas de tracción y direccionables al mismo tiempo, operado mediante sistemas mecatrónicos llamados sistemas *Drive By Wire* [Spark e Ibrahim, 2001]. Un año después se describen cada sistema *By Wire* [Doriben y Klaus, 2002].

En el 2004, se desarrolla un vehículo con sistemas *Drive By Wire*, las entradas de dirección, tracción y el frenado por parte del conductor se realizan a través de un joystick [Kelber y colaboradores, 2004]. Con esta publicación demuestran la alta flexibilidad de diseño que tienen los sistemas *Drive By Wire*.

El sistema de dirección por cable *Steer By Wire*, cuyas siglas son SBW, es el más crítico en cuanto a seguridad de todos los sistemas [Bertoluzzo, 2005]. A partir de este año, se publicaron muchos trabajos

relacionados al estudio del sistema *Steer By Wire*, a finales del mismo año se desarrolla un completo sistema *Steer By Wire* [Yih y Gerdes, 2005].

Durante el 2007 se realiza un vehículo con el sistema *Steer By Wire* y con el sistema de tracción diferencial *Differential Drive* [Brown y colaboradores, 2007]. Con los cuales controlan totalmente la dinámica del vehículo. Ese mismo año se desarrolla un diagnóstico de fallas para el sistema *Steer By Wire* [Gadda y colaboradores, 2007].

En el 2010, se incluyen todas las entradas por parte del conductor al volante de dirección [Messaoudène, 2010]. Teniendo en el volante de dirección todo el control del vehículo. En este trabajo, se toma la ventaja de la flexibilidad de diseño de los sistemas *Drive By Wire* para proporcionar a la gente parapléjica la opción de conducir de una manera fácil.

1.3. El siguiente paso.

Existen cerca de 200 publicaciones acerca del estudio de los sistemas *Drive By Wire*, desde el modelado dinámico de los sistemas, hasta el control de los mismos. Por lo cual, surge la necesidad de realizar más investigación sobre las aplicaciones de estos sistemas. Una forma de encontrar una aplicación eficiente a un sistema, es conocer sus ventajas, características que otros sistemas no tienen. La ventaja que se tomará para este trabajo es que estos sistemas se pueden automatizar. Se implementarán el sistema *Steer By Wire* y el sistema *Differential Drive* en un vehículo piloto y trabajarán en paralelo con un sistema de evasión de colisiones. Con esta configuración se reducen las posibilidades de colisiones entre automóviles y obstáculos, aumentando la seguridad activa del automóvil.

1.4. Objetivos.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un vehículo piloto semiautónomo el cual evada colisiones laterales y frontales aún si el conductor no las evade por sí mismo, implementando los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive* en los sistemas de dirección y tracción respectivamente. Como objetivos particulares tenemos:

- Desarrollar un vehículo piloto con los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*.
- Desarrollar un sistema de evasión de colisiones mediante sensores infrarrojos.
- Desarrollar algoritmos los cuales trabajen todos los sistemas del vehículo en paralelo, para obtener un vehículo semiautónomo y no un vehículo en momentos autónomo y en momentos no.

1.5. Justificación.

Se experimentarán las colisiones más comunes, con esto se logrará demostrar la evasión de éstas a través de los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*. Los sistemas *Drive By Wire* son innovadores en sí, pero la fusión de éstos con los sistemas de evasión de colisiones lo es aún más. Este tipo de fusión es de las cosas más novedosas en el ramo automotriz en todo el mundo.

1.6. Metodología.

La metodología de este trabajo se basó en la solución de problemas asignados. Se tuvo primero un objetivo general, el cual surgió de una idea original e innovadora, que se llevó a cabo con la integración de tres sistemas. Se asignó un problema a cada función de cada sistema, seleccionando la solución más sencilla y económica. La mayoría de los problemas asignados ya tenían solución, por lo cual se recurrió a bibliografía para resolverlos. En los problemas en donde no existían soluciones (incisos e, i, k, l), se empleó el método científico para obtener la solución a dicho problema. Entre paréntesis se encuentra la sección en la que se resolvió dicho problema asignado.

Objetivo general: Evadir colisiones lateral y frontal mediante los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*.

- Construir un sistema *Steer By Wire*.

Conocer las funciones principales de los sistemas *Steer By Wire* (3.1).

- a) Resolver cómo leer la posición del volante (6.1).
- b) Resolver cómo tener retroalimentación hacia el conductor (6.1).
- c) Resolver cómo hacer que el volante se mantenga en posición vertical (6.1).
- d) Resolver cómo hacer que las ruedas de dirección se orienten a su respectivo ángulo (6.1).
- e) Resolver cómo hacer que el radio de dirección del vehículo cambie en función de la velocidad en la formulación Ackerman (6.1).

- Construir un sistema *Differential Drive*.

Conocer las funciones principales de los sistemas *Differential Drive* (3.2).

- f) Resolver cómo leer la posición del acelerador (6.2).
- g) Resolver cómo tener retroalimentación hacia el conductor (6.2).
- h) Resolver cómo hacer que las ruedas de tracción giren a sus respectivas velocidades (6.2).
- i) Resolver cómo reducir la diferencia de velocidades de las ruedas de tracción debido al cambio del radio de dirección (6.2).

- Construir un sistema de evasión de colisiones.

Conocer las funciones principales de los sistemas de evasión de colisiones (4.2).

- j) Resolver cómo medir la distancia a los obstáculos (6.3.1).
- k) Resolver cómo generar acciones de evasión para las colisiones frontales (6.3.2.1).
- l) Resolver cómo generar acciones de evasión para las colisiones laterales (6.3.2.2).

Una vez resueltos los problemas se procedió a desarrollar el prototipo (5.0). El cual consta de un vehículo piloto y un conjunto llamado mandos de control que emula el tablero de un automóvil y aloja el hardware necesario para los sistemas. Se realizaron diversas pruebas obteniendo resultados satisfactorios (6.4), los cuales sirvieron de base para las conclusiones (7.0).

2. SISTEMAS DE DIRECCIÓN Y TREN PROPULSOR DE UN AUTO+MÓVIL.

Existen varias definiciones de automóvil, para este trabajo se definirá como sigue: Un automóvil es un vehículo automotor de cuatro ruedas el cual transporta de un lugar a otro. Existen automóviles de todos los tamaños y para todos los usos, por ejemplo los especializados de alto desempeño para carreras. Todos los automóviles, o la mayoría, se componen por siete sistemas principales: 1) Motor, 2) Tren propulsor, 3) Rines, llantas y frenos, 4) Suspensión, 5) Dirección, 6) Sistema eléctrico y 7) Carrocería y chasis. A continuación se analizarán los sistemas de dirección y tren propulsor, ya que estos sistemas son los necesarios para desplazar un automóvil.

2.1. Sistema de dirección.

El propósito principal del sistema de dirección es dar al conductor control direccional del automóvil. Este sistema comprende desde el volante hasta las ruedas de dirección. El volante es una palanca pequeña (su radio es de sólo unos 17 centímetros), por lo que se necesita una ventaja mecánica para vencer la inercia del automóvil y la fricción entre las llantas y el camino. Esta ventaja es el llamado radio de dirección: las vueltas del volante necesarias para mover las ruedas cierta cantidad de giro (como máximo los automóviles tienen de tope a tope entre 60° y 80°). Por ejemplo, un radio de dirección de 15:1 significa que por cada 2 ½ vueltas completas del volante (900°), las ruedas se mueven 60°; por tanto, el radio de dirección es $900:60 = 15:1$. Con una relación baja (10:1) las ruedas responden con más rapidez al volante, pero se requiere más fuerza para moverlo. La flecha de la dirección está dentro de la columna de dirección y, a través de la coraza, llega hasta la caja de la dirección, situada en el compartimiento del motor. Las flechas actuales de dirección, se comprimen en caso de colisión protegiendo al conductor. La caja de dirección convierte el movimiento rotatorio del volante en el movimiento lateral de las ruedas. Los engranes de la caja reducen los movimientos grandes del volante a movimientos pequeños de las ruedas, para proporcionar la ventaja mecánica necesaria. El varillaje de la dirección consiste en una serie de varillas y barras transversales que conectan las ruedas delanteras entre sí y la caja de la dirección. La máxima economía en cuanto a llantas y combustible se logra si las ruedas giran paralelas y verticales; sin embargo, una ligera inclinación mejora la estabilidad de la dirección y la suavidad del rodamiento.

Para lograr que cada rueda gire a su correspondiente ángulo, a lo largo del tiempo se han desarrollado diversos sistemas mecánicos de dirección, en un comienzo se tenían errores de hasta 10° en la orientación de las ruedas. Los mecanismos convencionales de los sistemas de dirección son el de piñón y cremallera y el de paralelogramo. Para mayor información sobre estos sistemas mecánicos consultar Reader's Digest México, 1983. Un aspecto importante en los sistemas convencionales de dirección es que las ruedas de ambos lados tomarán una posición paralela al soltar el volante con el auto en movimiento. Esto es debido al ángulo de inclinación del eje del brazo de dirección mostrado en la Figura 1, visto el automóvil desde el frente. Los mangos permanecen horizontales cuando las ruedas están verticales. Al girar éstas, los extremos externos de los mangos tienden a bajar, y los extremos internos levantan el automóvil. Al soltar el volante, baja el automóvil debido a su peso y las ruedas se alinean paralelas [Ellinger y Hathaway, 1980].

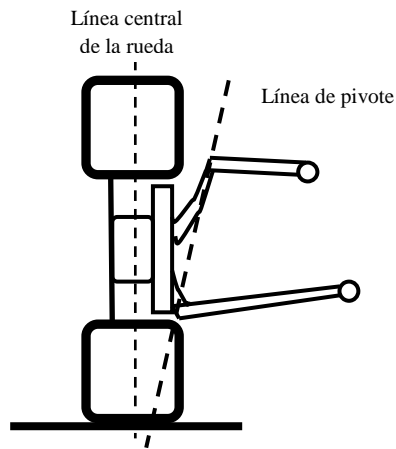


Figura 1. Ángulo de inclinación del eje del brazo de dirección. Tomada de Ellinger y Hathaway, 1980.

Los sistemas de dirección de automóviles con tracción trasera se diseñan para tener una ligera convergencia inicial, esto es para contrarrestar la tendencia a divergir al aplicar potencia. En los automóviles con tracción delantera, los sistemas de dirección se diseñan para tener una ligera divergencia inicial, evitando que las ruedas converjan al recibir potencia. La Figura 2 muestra ambos casos, sin embargo las ruedas giran paralelas entre sí a velocidades considerables.

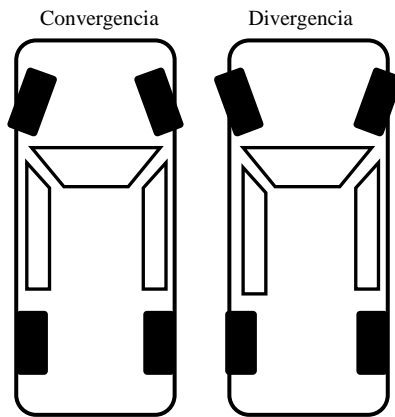


Figura 2. Convergencia (*Toe-in*) y divergencia (*Toe-out*). Tomada de Ellinger y Hathaway, 1980.

Como es sabido, cuando un automóvil entra en una curva, las ruedas delanteras no giran paralelamente, debido a que cada rueda tiene diferente radio respecto al centro instantáneo de giro, Figura 3. La ecuación 2.1 relaciona los dos ángulos de las ruedas delanteras:

$$\cot \theta_o - \cot \theta_i = \frac{d}{l} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

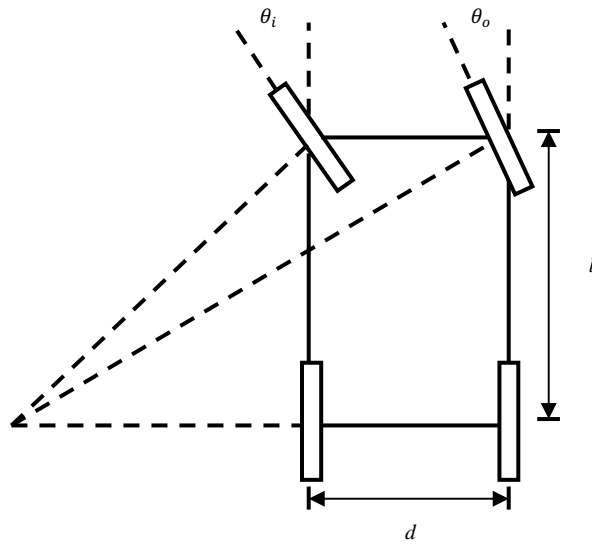


Figura 3. Formulación cinemática de la dirección Ackerman. Tomada de Giles, 1968.

En donde d es el ancho entre ruedas y l la distancia entre ejes. Sin embargo, la ecuación anterior no es suficiente para conocer el comportamiento del sistema de dirección y ni la relación entre el ángulo del automóvil con el ángulo de cada rueda. Para obtener esto, es necesario implementar una rueda direccional virtual [Edzko y Cheok, 2004], sin masa, pero con efectos cinemáticos, Figura 4.

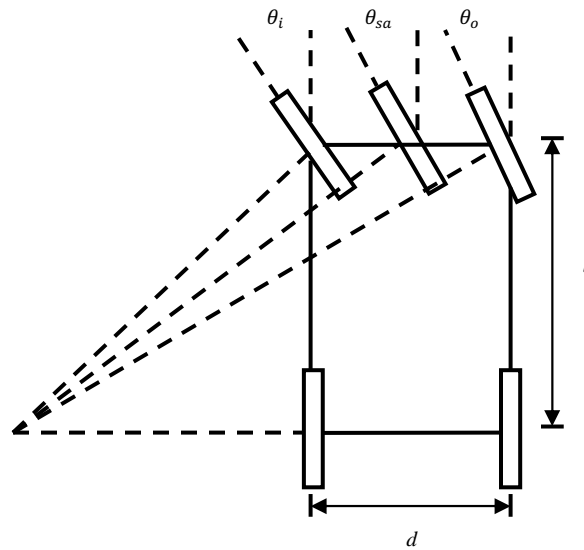


Figura 4. Formulación cinemática de la dirección Ackerman con una rueda virtual. Tomada de Edzko y Cheok, 2004.

Con lo anterior, se pueden obtener ecuaciones que relacionen al ángulo de giro del automóvil θ_{sa} con el ángulo respectivo de cada una de las ruedas, θ_i y θ_o . Las ecuaciones 2.2 y 2.3 muestran estas relaciones:

$$\cot \theta_i = \cot \theta_{sa} - \frac{d}{2l} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$\cot \theta_o = \cot \theta_{sa} + \frac{d}{2l} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Con estas ecuaciones es posible saber a qué ángulo se debe posicionar cada rueda con respecto al ángulo de giro del automóvil. Como ya se ha mencionado, en un comienzo se tenían errores de hasta 10° en la orientación de las ruedas, pero en la actualidad se han estado optimizando los sistemas mecánicos de dirección para minimizar este error, como es el caso del sistema de paralelogramo [Yao Kai y colaboradores, 2008], además se han utilizado métodos de optimización basados en el software ADAMS [Hou Zhongming y colaboradores, 2009] y se han utilizado también métodos basados en algoritmos genéticos para optimizarlos [Bing Zhou y colaboradores, 2009].

2.2. Sistema tren propulsor.

El tren propulsor transmite la potencia del motor a las ruedas, y éstas impulsan el automóvil. En el automóvil con motor delantero y tracción trasera, el motor hace girar las flechas de la transmisión, manual o automática, que por medio de la flecha propulsora (cardán), transmiten potencia al eje trasero, el cual contiene un diferencial. Cuando el automóvil toma una curva, los engranes del diferencial del eje trasero hacen girar más rápidamente la rueda exterior que la interior, ya que recorren diferentes distancias, y las uniones universales (crucetas) de la flecha cardán permiten que el eje trasero se mueva verticalmente. El automóvil con tracción delantera o con el motor atrás, no tiene flecha cardán. El motor mueve una transmisión combinada con el diferencial llamada transeje, que hace girar las dos flechas laterales que impulsan las ruedas. Las uniones universales de estas flechas (juntas homocinéticas) permiten que la suspensión se mueva verticalmente y que las ruedas se direccionen al mismo tiempo que transmiten potencia.

El motor del automóvil produce potencia útil cuando el número de revoluciones por minuto (rpm) es alto: para un motor común, entre 1500 y 3500 y hasta 5000 rpm. Si las ruedas dieran una vuelta por cada revolución del cigüeñal, el automóvil se desplazaría a una velocidad entre 80 y 435 km/h. Por lo tanto, la velocidad que transmite el motor a las ruedas debe reducirse por medio de engranes. Los engranes del diferencial hacen que las ruedas giren de dos a cuatro veces más despacio que la flecha propulsora. Otros engranes de la transmisión reducen aún más la velocidad de las ruedas motrices, haciendo que el motor produzca la potencia requerida, ya que cuanto más rápidamente gire el motor en relación con las ruedas, más torsión desarrolla. La transmisión funciona pues, como un multiplicador de torsión. Los engranes de primera y segunda desarrollan la máxima torsión. De tres a cinco engranes de avance proporcionan las rpm necesarias para cualquier condición de manejo.

Como es sabido, cuando un automóvil entra en una curva, todas las ruedas no giran a la misma velocidad, debido a que cada rueda tiene diferente radio respecto al centro instantáneo de giro, Figura 5. La velocidad lineal correspondiente de cada rueda de tracción, v_1 y v_2 , se obtienen del análisis cinemático. Para lo cual se necesita saber la velocidad lineal del automóvil v , el ángulo del mismo θ_{sa} , el ancho entre ruedas d y la distancia entre ejes l .

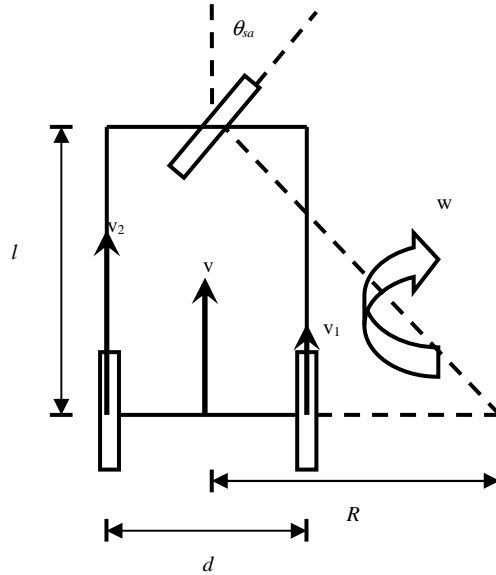


Figura 5. Tracción diferencial trasera. Tomada de González Villela V. y Guadarrama Liho J., 1997.

Resolviendo la cinemática tenemos:

$$\tan \theta_{sa} = \frac{l}{R} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$R = \frac{l}{\tan \theta_{sa}} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$v = wR \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$w = \frac{v}{R} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

$$v_1 = w \left[R - \frac{d}{2} \right] \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$v_2 = w \left[R + \frac{d}{2} \right] \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Donde R es el radio de giro de la velocidad del automóvil y w es la velocidad angular del automóvil. Si se quiere conocer la velocidad angular de cada rueda w_b , basta con dividir la velocidad lineal de la rueda entre su radio r_b , tal como se muestra en la Figura 6. Las ecuaciones 2.10 y 2.11 muestran las velocidades angulares de cada rueda.

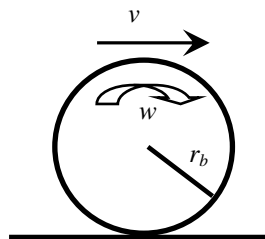


Figura 6. Velocidad angular de la rueda.

$$w_{1b} = \frac{v_1}{r_{b1}} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$w_{2b} = \frac{v_2}{r_{b2}} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Una vez conociendo el ángulo de cada rueda de dirección y conociendo la velocidad de cada rueda de tracción, es posible controlar un automóvil. Una vez conocido lo anterior, se podría especular con realizar pruebas con un vehículo de cuatro ruedas de tracción y dirección simultáneas (4WS/4WD), que sí se realizaron publicaciones en el 2001 [Spark e Ibrahim, 2001] y en el 2008 [Min Wan Choi y colaboradores, 2008]. Ambas publicaciones demuestran que un vehículo con estas características tiene un mayor grado de desempeño en cuanto a dirección y tracción sobretodo en condiciones severas debido a la superficie, que puede girar círculos de radios mucho más cortos y además demuestran que puede girar el vehículo en su propio centro geométrico. Como se aprecia en la Figura 7, ambas publicaciones demuestran matemáticamente que las ruedas delanteras tienen los mismos ángulos y las mismas velocidades que las ruedas traseras.

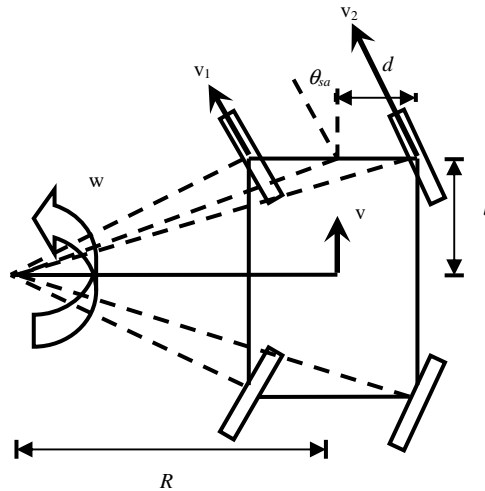


Figura 7. Formulación cinemática del vehículo 4WS/4WD. Tomada de Min Wan Choi y colaboradores, 2008.

Otras configuraciones se han estudiado, teniendo aplicaciones en vehículos de servicio pesado [Mu Chunyan y colaboradores, 2010]. En el 2010 se experimentó con un vehículo con doble eje de dirección, Figura 8. Los ángulos de cada rueda los obtienen de la misma forma arriba mencionada. Concluyen que con esta configuración se obtiene un giro puro, sin el deslizamiento que ocurría debido a la inercia provocada por el gran peso del vehículo.

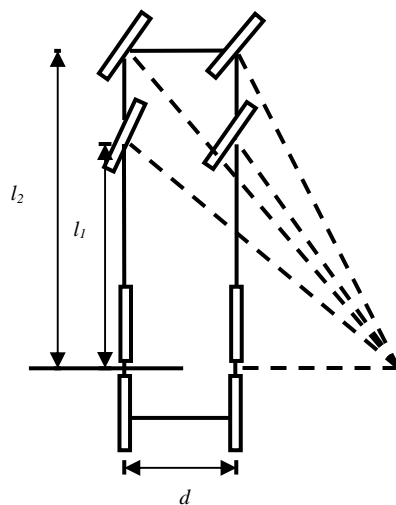


Figura 8. Formulación cinemática del vehículo con doble eje de dirección. Tomada de Mu Chunyan y colaboradores, 2010.

3. SISTEMAS *DRIVE BY WIRE*.

Los sistemas DBW son realizados para mejorar el confort, funcionalidad, seguridad de los pasajeros y del automóvil en sí. Su utilización ha sido implementada debido a los significantes beneficios al conducir gracias al remplazo de los tradicionales enlaces mecánicos e hidráulicos entre el conductor y el automóvil por enlaces eléctricos. Algunas de las ventajas de estos sistemas son:

- Mayor eficiencia.
- Menores requerimientos de mantenimiento.
- Mejor respuesta dinámica y mayor precisión.
- Mayor flexibilidad de diseño.
- Nuevos niveles de asistencia al manejar.
- Reducen peso y volumen del vehículo.
- Mejoran la seguridad y el desempeño del vehículo.
- Se pueden implementar sistemas de conducción autónoma.

En las cerca de 100 publicaciones sobre los sistemas *Drive By Wire* obtenidas para este trabajo no se enlistan las desventajas de estos sistemas, pero en base a lo realizado en este trabajo se concluyen algunas desventajas tales como si un cable llega a desconectarse debido a factores externos, los sistemas ya no trabajan igual o simplemente ya no trabajan. Además de que si hubiese un desabasto de energía eléctrica por parte del automóvil, los sistemas no se comportan igual o simplemente no se activan.

Los principales sistemas DBW que han ido implementándose en los automóviles se muestran en la Figura 9:

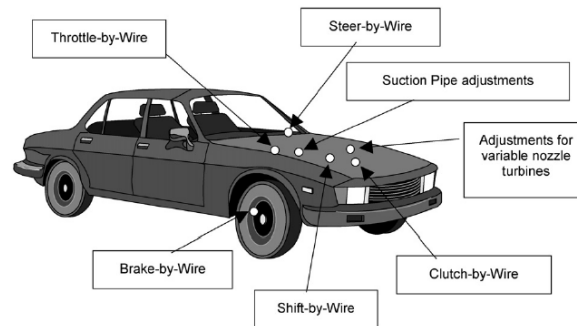


Figura 9. Sistemas *Drive By Wire*: sistema de aceleración (*Throttle By Wire/TBW*), sistema de frenos (*Brake By Wire/BBW*), sistema de transmisión (*Shift By Wire*), sistema de embrague (*Clutch By Wire/CBW*), sistema de dirección (*Steer By Wire/SBW*). Tomada de Doriben y Klaus, 2002.

3.1. Sistema *Steer By Wire*.

El sistema SBW es el más crítico en cuanto a seguridad de todos los sistemas *By Wire* [Bertoluzzo, 2005]. En el sistema SBW, los movimientos del volante son detectados por sensores, convirtiéndolos en señales eléctricas las cuales, son dirigidas a un procesador, el cual modifica las señales eléctricas y las transmite a los actuadores, los cuales giran las ruedas del vehículo. Algunas ventajas de los sistemas SBW son:

- Agradable sensación de giro en el volante.
- Puede automatizarse la dirección.
- Reduce el radio de giro.
- Mejora la estabilidad.
- No se experimenta la sensación desagradable que se tiene al golpear las ruedas contra un obstáculo.
- No se pierde la alineación de las ruedas con el paso del tiempo.

- La ausencia de un enlace mecánico como la columna de dirección, flecha de dirección y caja de dirección brinda mayor espacio debajo del cofre y reduce el riesgo de alguna herida debida a la columna de dirección en caso de colisión.
- Se puede variar el radio de dirección.

Como desventajas se pueden mencionar las mismas anteriormente mencionadas. Hay dos tipos de sistemas *Steer By Wire*: los que usan un solo actuador y los que usan dos actuadores (uno por rueda). La Figura 10 muestra el tipo de sistemas que usan un solo actuador, de los cuales se pueden encontrar una gran cantidad de publicaciones. La figura 11 muestra los sistemas con dos actuadores, habiendo escasas publicaciones sobre estos sistemas.

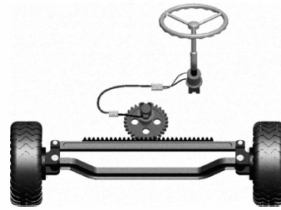


Figura 10. Sistema *Steer By Wire* con un solo actuador. Tomada de Geng y Wang, 2010.

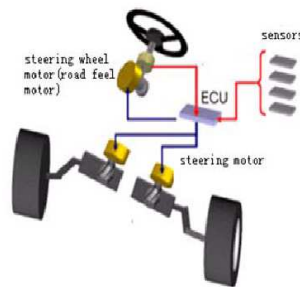


Figura 11. Sistema *Steer By Wire* con dos actuadores, uno por rueda. Tomada de Lei-yan y Ping-li, 2009.

A continuación se muestra el estado del arte de los sistemas *Steer By Wire*. En la Figura 12 se muestra la capacidad del sistema para guardar el volante en el tablero cuando no se esté usando. Este desarrollo conceptual lo hizo la empresa automotriz sueca Volvo, y es una de las ventajas de no tener enlaces mecánicos. La Figura 13 muestra un automóvil con las cuatro ruedas direccionables, esto es factible únicamente mediante sistemas *Steer By Wire*. En la Figura 14 se aprecia un ejemplo de instalación de un actuador en un sistema SBW. La Figura 15 muestra el concepto desarrollado por Mercedes Benz, en este sistema se prescinde del volante común y se instala un joystick para direccionar el automóvil, que puede ser operado por ambos lados.



Figura 12. Sistema *Steer By Wire* Volvo. Tomada de www.volvokoncernen.se.

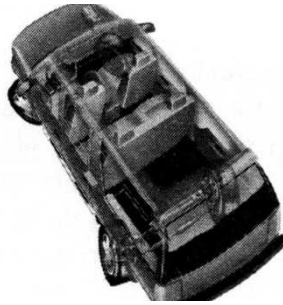


Figura 13. Automóvil con las cuatro ruedas direccionables. Tomada de Bertoluzzo, 2004.



Figura 14. Ejemplo de un actuador en un sistema *Steer By Wire*. Además esta rueda incorpora la tracción (*in-wheel engines*) y la suspensión en sí misma (SIEMENS VDO).



Figura 15. Sistema *Steer By Wire* de Mercedes Benz. Tomada de www.mercedes-benz.de.

3.2. Sistema *Differential Drive*.

Todos los automóviles híbridos, o la mayoría, y algunos vehículos eléctricos usan como sistema de propulsión un solo motor eléctrico conectado a un diferencial mecánico, el cual transmite el torque del motor hacia las dos ruedas de tracción. El sistema *Differential Drive* es el sistema de propulsión el cual prescinde del diferencial mecánico y utiliza un motor eléctrico en cada rueda de tracción. Con esto se cumple el objetivo de variar las velocidades de las ruedas de tracción variando las velocidades de los motores cuando el vehículo entra en una curva. Además, con este sistema se puede producir un momento adicional al vehículo para cambiar la dinámica del mismo variando los torques de cada motor. Cuando se combina con el sistema *Steer By Wire*, el sistema *Differential Drive* otorga al diseñador la capacidad de controlar de forma independiente el momento del vehículo en el eje vertical y la velocidad lateral del mismo. Además reduce las oscilaciones en el eje vertical de vehículo y proporciona un mejor centro de tracción sin que interfiera el conductor con el sistema de dirección [Brown y colaboradores, 2007]. El sistema *Differential Drive* al igual que el sistema *Steer By Wire* se pueden automatizar.

4. SISTEMAS DE EVASIÓN.

Existen dos tipos de sistemas de evasión: los sistemas de evasión de obstáculos y los sistemas de evasión de colisiones. Ambos sistemas tienen dos tareas principales, la identificación de los obstáculos a evadir y la generación de acciones para evadirlos.

4.1. Sistemas de evasión de obstáculos.

Este concepto generalmente se implementa en la Robótica Móvil. Primero se modela todo el espacio de trabajo, después se asignan fuerzas de atracción y repulsión debidas a la meta (posición a la que debe llegar el robot) y a los obstáculos respectivamente, se obtiene una trayectoria, por lo general la más eficiente, y se realizan acciones para evitar colisionar con algún obstáculo una vez el robot en movimiento (pudiendo ser obstáculos fijos o móviles). El método común para realizar el trabajo descrito anteriormente es el llamado Campos Potenciales mostrado en la Figura 16. Al día de hoy, la mayoría de los planeadores de trayectorias son variantes de la simple idea de campos potenciales.

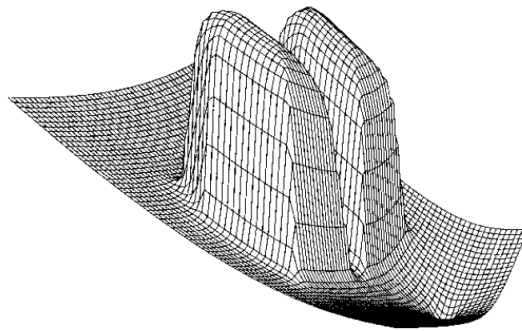


Figura 16. Representación del método de Campos Potenciales. Tomada de Cameron, 1994.

Con lo anterior descrito, se puede decir que el método de campos potenciales no es sólo un método de evasión de colisiones, sino que además, proporciona la gran ventaja de ser uno de los mejores métodos para trazar trayectorias entre dos puntos cualesquiera del área de trabajo.

4.2. Sistemas de evasión de colisiones.

Como su nombre lo indica, la implementación de estos sistemas sirve para evitar colisiones del automóvil con algún obstáculo, reduciendo así, la probabilidad de accidentes. En este trabajo, se llamará obstáculos a los objetos sólidos con los cuales no queremos que el vehículo tenga contacto alguno a ninguna velocidad. El reconocimiento de obstáculos se realiza de dos maneras diferentes: por visión mediante cámaras de video, Figura 17, y por electrónica usando sensores comúnmente infrarrojos o ultrasónicos, Figura 18.



Figura 17. Reconocimiento de obstáculos mediante visión. Tomada de www.vmalayalee.com/vm/article_images.

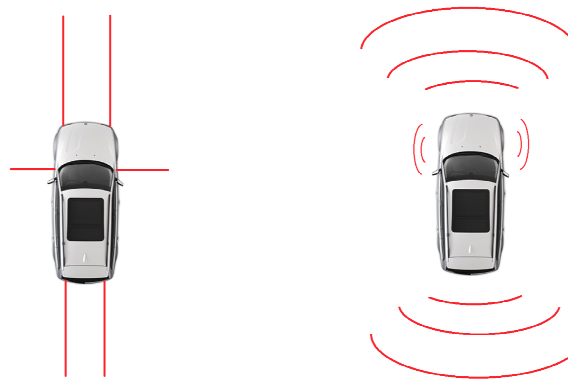


Figura 18. Reconocimiento de obstáculos mediante sensores infrarrojos y ultrasónicos.

En el reconocimiento por visión las imágenes de las cámaras se procesan en una computadora y se genera información sobre los obstáculos que detectan, esta información se transmite de manera digital a un microcontrolador el cual genera señales eléctricas para los actuadores de evasión. En el reconocimiento por electrónica, los sensores se conectan directamente a un microcontrolador, por lo general la información de los obstáculos son variaciones de voltaje, el cual se procesa en el microcontrolador y se generan señales eléctricas para los actuadores de evasión.

5. DESARROLLO DEL PROTOTIPO.

El prototipo consta de dos partes principales: los mandos de control y el vehículo piloto. El diagrama de bloques del prototipo se muestra en la Figura 19. Se construyó en dos partes debido a que no se contó con el presupuesto para desarrollar un vehículo de transporte personal, por eso se usó un vehículo piloto pequeño. Los motores, servomotores y sensores del vehículo piloto están unidos a la circuitería de los mandos de control mediante cables. Por ahora esto representa un problema debido a que los cables se interponen en el camino del vehículo piloto o se enredan entre sí debido al desplazamiento creando diversos conflictos, pero en un automóvil, como la distancia entre la circuitería y las ruedas permanece fija, no se tendrá este problema. La Figura 20 muestra el vehículo utilizado en este trabajo. Los mandos de control se muestran en la Figura 22.

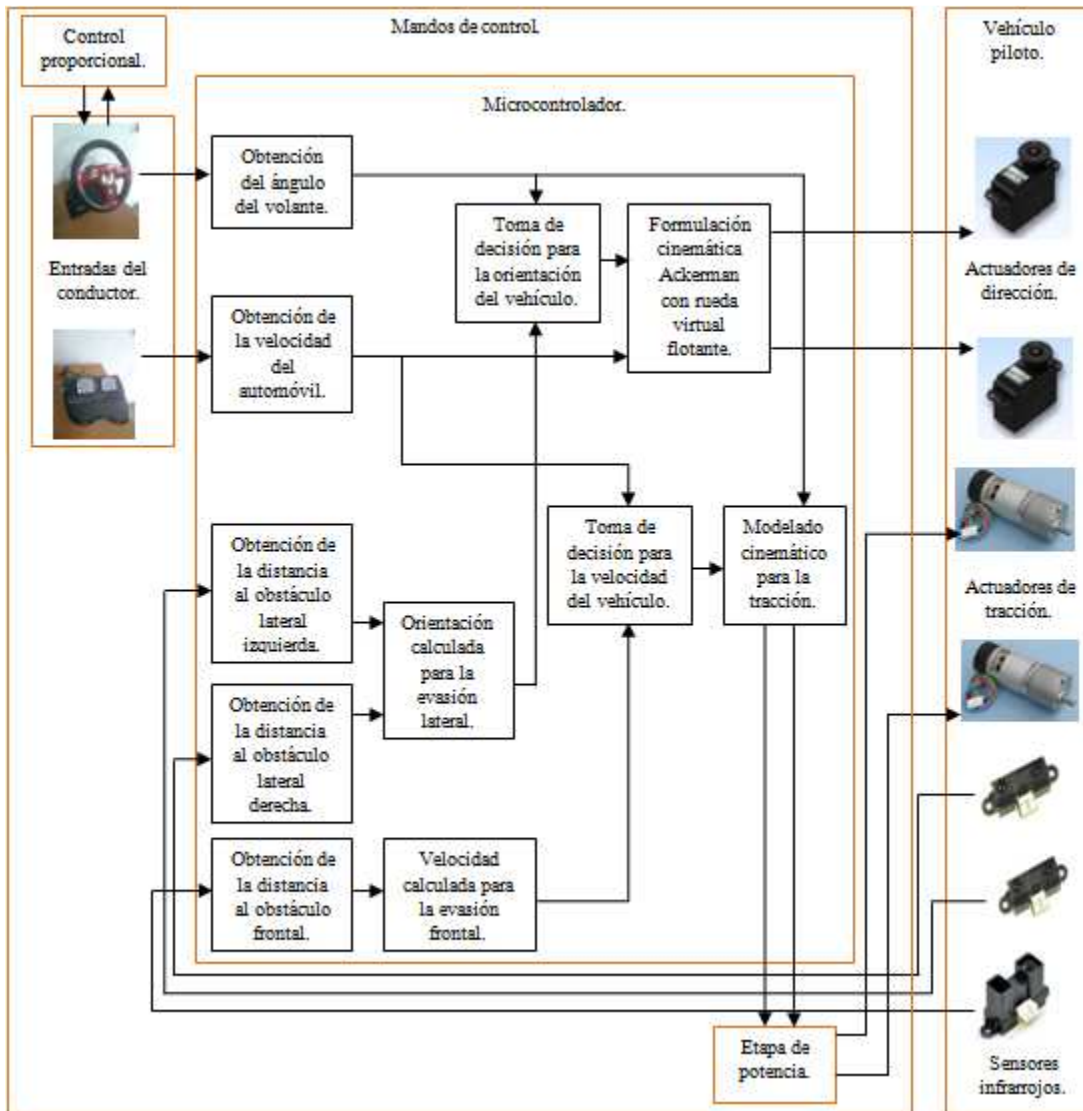


Figura 19. Diagrama de bloques del prototipo.

5.1. Vehículo piloto experimental.



Figura 20. Vehículo piloto con sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*.

El vehículo se fabricó de partes de aluminio. Cuenta con un servomotor de 5V en cada rueda frontal, siendo este un sistema SBW de dos actuadores. En la parte trasera cuenta con un motor de 12V de CD acoplado a cada rueda, teniendo así el sistema *Differential Drive*. La geometría del vehículo se muestra en la Figura 20.

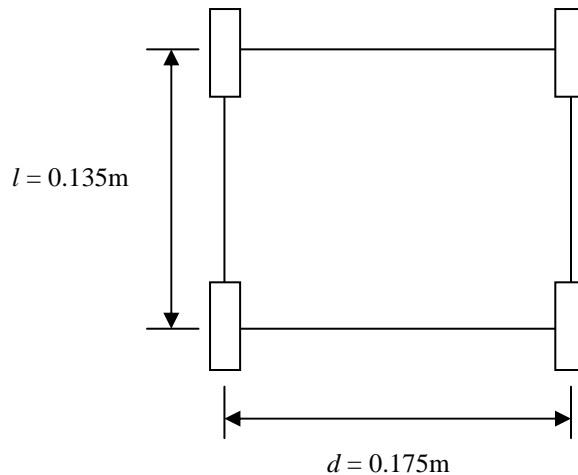


Figura 21. Geometría del vehículo piloto.

5.2. Tablero de control.

Consiste en una estructura hecha con largueros para estantes, los cuales son muy económicos y fáciles de ensamblar debido a los orificios que se encuentran a lo largo de los mismos, además cuentan con una resistencia mecánica alta. Se unió la estructura mediante tonillos de $\frac{1}{2}$ pulgada. El volante de dirección y los pedales se obtuvieron en conjunto, éstos se utilizan para videojuegos. El panel de control y el panel de instrumentos son refacciones automotrices, los cuales contienen indicadores e interruptores que se utilizaron para este proyecto. Cada pedal cuenta con un potenciómetro de $10k\Omega$, de los cuales se obtienen señales analógicas para conocer las entradas del conductor en cuanto a velocidad del vehículo. El volante contiene un potenciómetro doble de $10k\Omega$, el cual manda una señal analógica en función de la posición a la que se encuentra el volante. En la misma flecha del volante, se encuentra instalado un motor de CD de 12V, el cual brinda la retroalimentación necesaria en el volante y regresa éste a su posición vertical cuando se suelta el volante (función que realiza el ángulo de inclinación del eje del brazo de dirección en un sistema de dirección

mecánica). En el interior de la estructura se encuentra instalada toda la circuitería, así como el microcontrolador y una fuente de energía para CPU, que para fines del proyecto se alimenta de 127 VAC. Esta fuente proporciona los voltajes necesarios para el prototipo, 5V, 11V, -11V y GND.



Figura 22. Mandos de control.

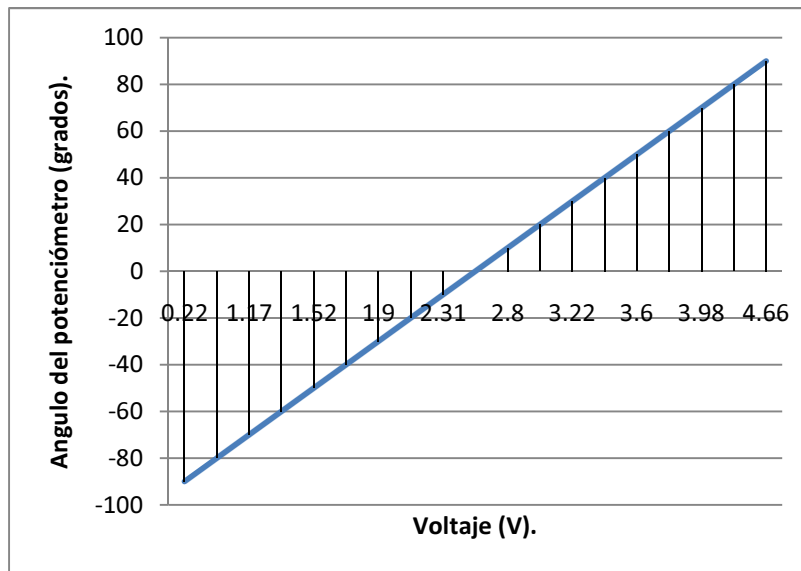
6. EXPERIMENTACIÓN CON EL PROTOTIPO.

6.1. Desarrollo del sistema *Steer By Wire*.

Para desarrollar el sistema *Steer By Wire* se resolvieron las siguientes actividades: conocer la posición del volante, tener una retroalimentación hacia el conductor y hacer que el volante regrese a su posición vertical al soltarlo, implementar en el microcontrolador la cinemática de la dirección Ackerman para conocer la orientación correspondiente de cada una de las ruedas, transformar estas orientaciones en señales eléctricas y dirigir las a cada servomotor para que realicen el giro de las ruedas.

Para conocer la posición del volante, se procedió a caracterizar el potenciómetro doble que se localiza en el volante. Para hacer esto, se retiró el potenciómetro del volante y se le instalaron dos transportadores, uno a la base del potenciómetro y otro a su flecha, se instaló una cámara web frente al potenciómetro para apreciar en la computadora el ángulo de giro de la flecha del potenciómetro con mayor exactitud. Se alimentó el primer circuito del potenciómetro con 5V (voltaje con el cual se operará) y se instaló un voltímetro en su salida, se midió el voltaje cada 10° de giro de la flecha. Se realizó una tabla en una hoja de cálculo y se graficaron los voltajes vs ángulos de giro, encontrándose la ecuación característica del potenciómetro. Con esto se sabe la posición del volante conociendo únicamente el voltaje de salida, Gráfica 1. La ecuación obtenida fue:

$$\text{Ángulo del potenciómetro [rad]} = 0.7075 * \text{voltaje} - 1.7264 \quad \text{Ecuación 6.1}$$



Gráfica 1. Caracterización del potenciómetro.

Ahora debemos de mandar el voltaje del potenciómetro a una entrada analógica del microcontrolador, para estar conociendo el ángulo del volante en todo momento y realizar los cálculos pertinentes.

El circuito secundario del potenciómetro controla la posición del volante debido a que se encuentra interactuando con el motor de CD en un control proporcional, esto con la finalidad de que se tenga una retroalimentación en el volante hacia el conductor y de que el volante se mantenga en la posición vertical cuando éste se suelte. El control proporcional se muestra en la Figura 23. El potenciómetro RV1 es la señal de referencia, es decir, la orientación a la que se encuentre este potenciómetro, es la orientación que tendrá el volante. Los amplificadores operacionales utilizados son UA741CP. Las resistencias son todas de 1kΩ. El transistor de la parte superior es un TIP 31 y el de la parte inferior TIP 32. El potenciómetro RV2 es el que se encuentra en el volante, su alimentación es de -11V y 11V.

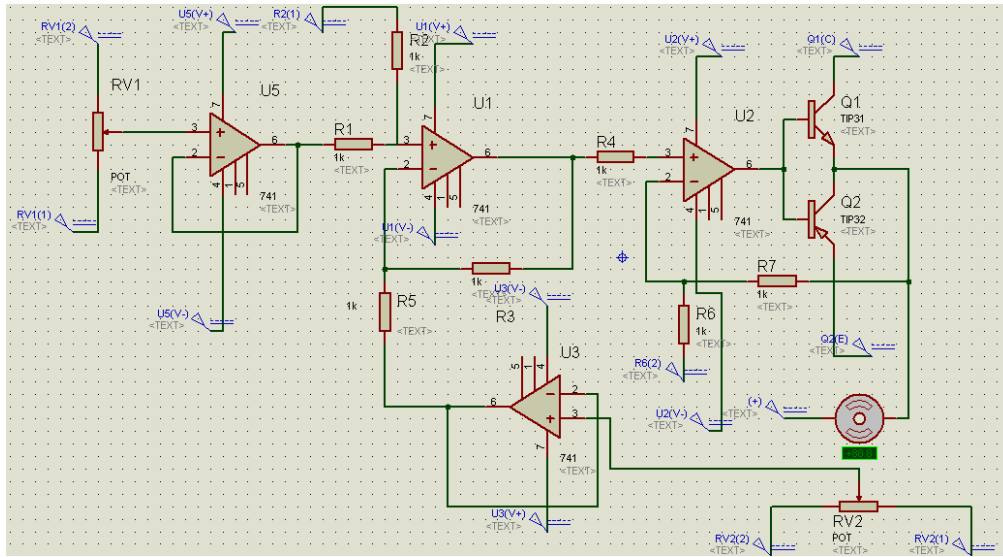
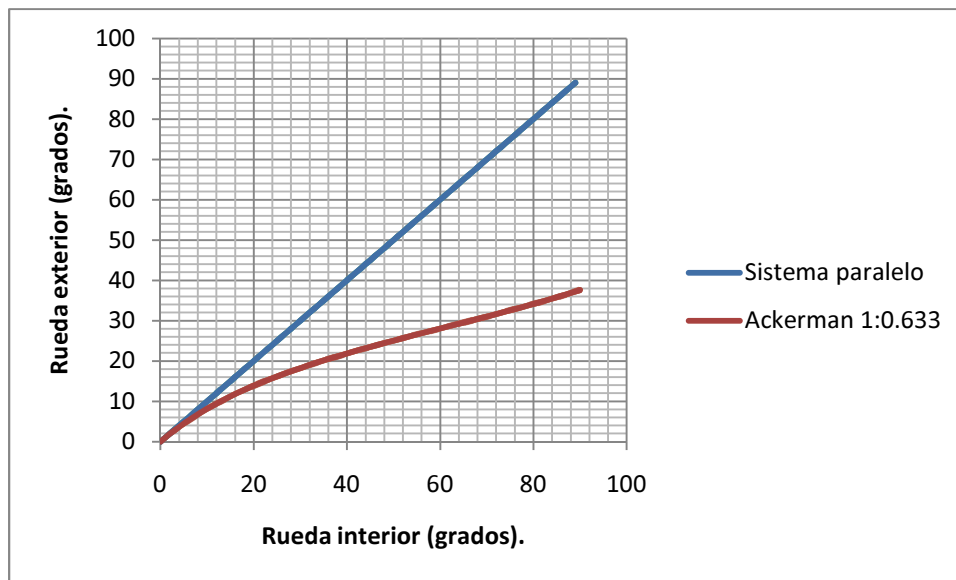


Figura 23. Control proporcional.

Para conocer la orientación que debe tener cada rueda, se necesitan las ecuaciones Ackerman 2.2 y 2.3, además se necesitan los valores de la geometría del vehículo arriba mencionados, los cuales son constantes. Se grafican los valores correspondientes a la orientación de cada rueda para conocer el comportamiento del sistema de dirección. El resultado se muestra en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Comportamiento del sistema de dirección del vehículo piloto el cual arroja un radio de dirección de 1:0.633.

En la gráfica anterior se aprecia el comportamiento del sistema de dirección de nuestro vehículo piloto. Se puede observar que la rueda interior gira un mayor ángulo que la rueda exterior debido a que tiene un radio de giro más corto. El mayor ángulo de dirección del vehículo piloto es de 57° , ya que si se aumenta esta cantidad, la rueda interior sobrepasará los 90° y comenzará a orientarse hacia la parte posterior del vehículo.

Hasta ahora ya se conocen los ángulos que debe tomar cada rueda de dirección. Se necesitan ahora programar las ecuaciones 2.2 y 2.3 para transformar estos ángulos en señales eléctricas las cuales sirvan a los

servomotores para orientar las ruedas a sus respectivos ángulos. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 24.

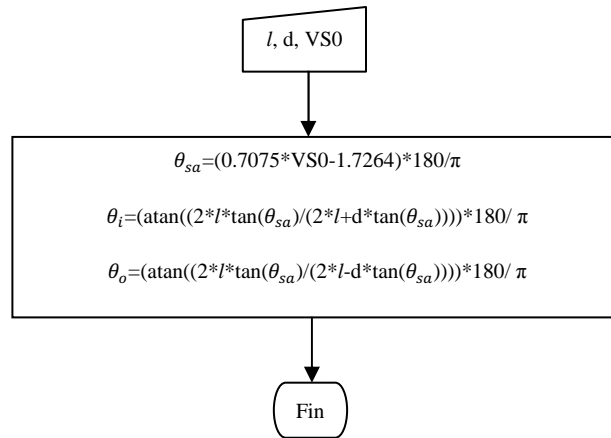


Figura 24. Diagrama de flujo del sistema *Steer By Wire*.

Las librerías del lenguaje de programación y el microcontrolador se encargan de transformar los valores de las ecuaciones del diagrama de flujo anterior en señales eléctricas para posicionar a los servomotores a la orientación fijada por estas ecuaciones. En el desarrollo anterior se tiene un radio de dirección de 1:0.633, es decir, las ruedas giran más rápido que el volante (cada una gira a su correspondiente orientación), esto debido a la geometría del vehículo. Un ejemplo de un radio de dirección de 1:1 son las motocicletas y triciclos, en los cuales, el ángulo del manubrio es igual al ángulo de la rueda de dirección.

Se han desarrollado otras ecuaciones para determinar el ángulo correspondiente de cada rueda en vehículos de cuatro ruedas al entrar en una curva, tal es el caso de las ecuaciones desarrolladas por González-Villela en el 2006 en su tesis doctoral, desarrollo mostrado en la Figura 25. Él implementa un eje de referencia móvil, el cual se puede desplazar a lo largo del eje longitudinal del vehículo, además implementa una rueda virtual la cual también se puede trasladar a lo largo del eje del vehículo. Estas ecuaciones fueron obtenidas desde la Robótica Móvil, desarrollo totalmente diferente al desarrollo cinemático Ackerman. Se estudiaron sólo las ecuaciones 6.2 y 6.3 concernientes a los ángulos de las ruedas y se experimentaron en el vehículo piloto.

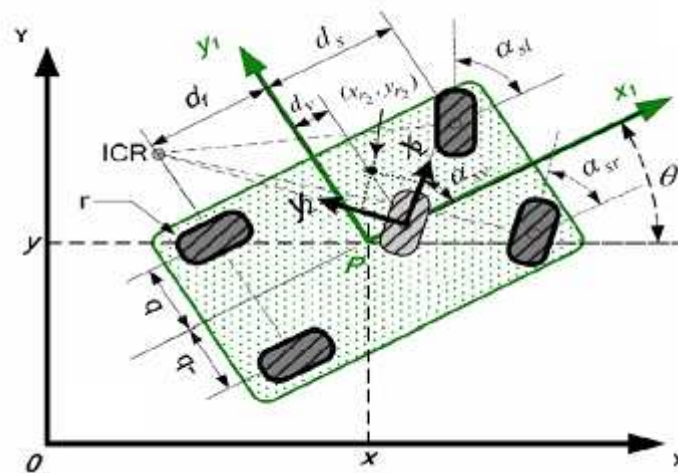


Figura 25. Esquema del Robot tipo carro ubicado en un marco de referencia XY. Tomado de González-Villela, 2006.

$$\alpha_{sr}(\alpha_{sv}) = \text{atan2}\left[\frac{-(d_f-d_s)\text{sen}(\alpha_{sv})}{b*\text{sen}(\alpha_{sv})-(d_f-d_v)\text{cos}(\alpha_{sv})}\right] \quad \text{Ecuación 6.2}$$

$$\alpha_{sl}(\alpha_{sv}) = \text{atan2}\left[\frac{-(d_f-d_s)\text{sen}(\alpha_{sv})}{-b*\text{sen}(\alpha_{sv})-(d_f-d_v)\text{cos}(\alpha_{sv})}\right] \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Se realizó un programa en *LabView*, el panel frontal se muestra en la Figura 26. Aquí se programaron las ecuaciones Ackerman y las ecuaciones obtenidas por González-Villela, se usaron indicadores de aguja para simular el giro de las ruedas izquierda y derecha de algunas configuraciones de las ecuaciones, el diagrama de bloques se muestra en el Apéndice A, se compararon y se obtuvo muy buena información, la cual se enuncia a continuación.

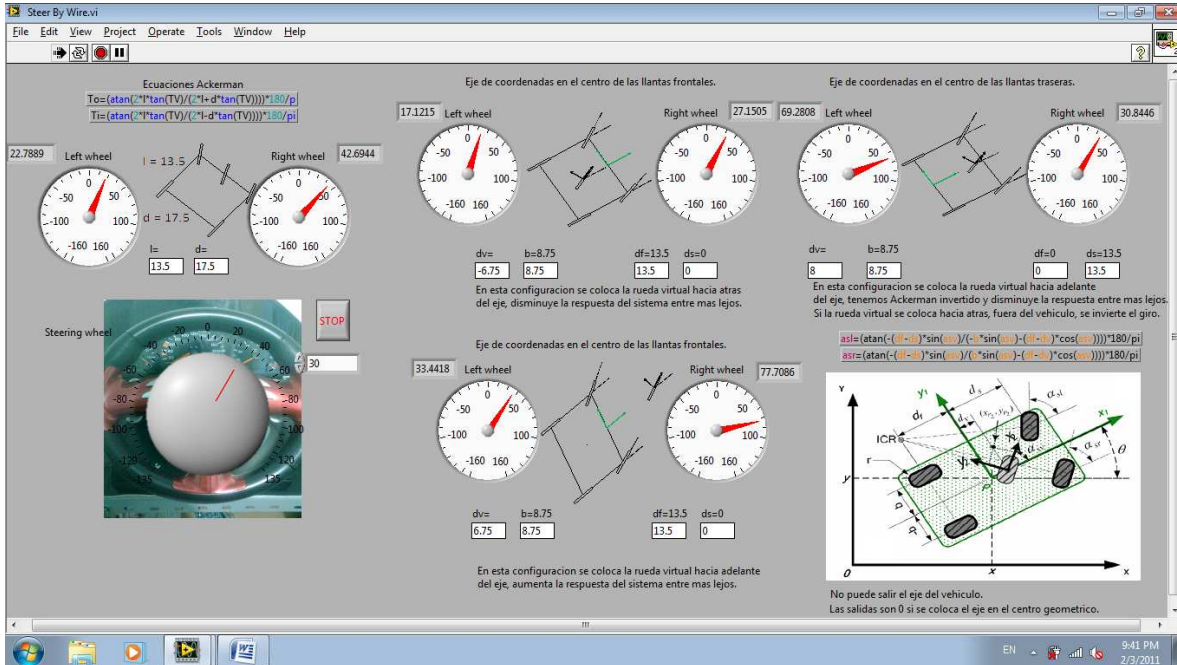


Figura 26. Panel frontal del programa en *LabView*.

Las ecuaciones obtenidas por González-Villela son muy flexibles, esto debido a la habilidad que tienen de poder desplazar el eje de referencia y la rueda virtual, permiten tener diferentes efectos sobre las ruedas direccionables de cualquier vehículo de cuatro ruedas. A continuación se mencionarán los efectos observados en este programa. Cuando el eje de referencia y la rueda virtual se encuentran juntos entre las dos ruedas frontales direccionables, se tienen los mismos resultados que las ecuaciones Ackerman.

Cuando permanece el eje de referencia entre las ruedas direccionables y se traslada la rueda virtual hacia atrás del vehículo, el radio de dirección aumenta, es decir, se necesita un mayor ángulo de giro del volante para obtener los mismos resultados en las ruedas. Esto es un resultado muy útil e importante, debido a que a gran velocidad, los automóviles necesitan un menor ángulo en el volante de dirección para controlarse. Por lo cual, el uso de esta configuración es indispensable en los sistemas *Steer By Wire*, ya que se puede hacer a la distancia que se mueve hacia atrás la rueda virtual función de la velocidad.

Si se mantiene el eje de referencia entre las ruedas direccionables y ahora se traslada la rueda virtual hacia adelante, el radio de dirección disminuye, es decir, se necesita un menor ángulo de giro del volante para girar las ruedas grandes ángulos. Esta configuración serviría a velocidades muy cercanas a cero kilómetros por hora, por ejemplo, a la hora de entrar o salir a un espacio de estacionamiento en fila, en donde resultaría muy cómodo girar muy pocos grados el volante, y obtener grandes ángulos en las ruedas.

Si se coloca el eje de referencia en la parte trasera del vehículo y traslada la rueda virtual hacia adelante del eje, se tiene Ackerman invertido, esto es, en lugar de que la rueda interior a la curva gire un mayor ángulo lo

hace la exterior. Si se recorre la rueda virtual hacia la parte trasera del eje de referencia, fuera del vehículo, se invierten los sentidos de giro de las ruedas, es decir si la curva es a la izquierda, las ruedas giran a sus respectivos ángulos pero hacia la derecha. Una aplicación de esta configuración es cuando se desarrollan vehículos con las cuatro ruedas direccionables (4WS), ya que las ruedas traseras de dirección deben girar el mismo ángulo que las frontales de dirección pero en el sentido contrario.

Como se ha comprobado, las ecuaciones desarrolladas por González-Villela son muy flexibles y tienen enormes aplicaciones. Con lo anterior, surge la idea de extrapolar las ecuaciones Ackerman, que sólo tienen la rueda virtual en el centro de las ruedas direccionables, a desplazar la rueda virtual a lo largo del eje longitudinal del vehículo de forma similar que las ecuaciones anteriores, Figura 27. El desplazamiento de la rueda virtual en el análisis cinemático Ackerman no se había realizado en ninguna publicación.

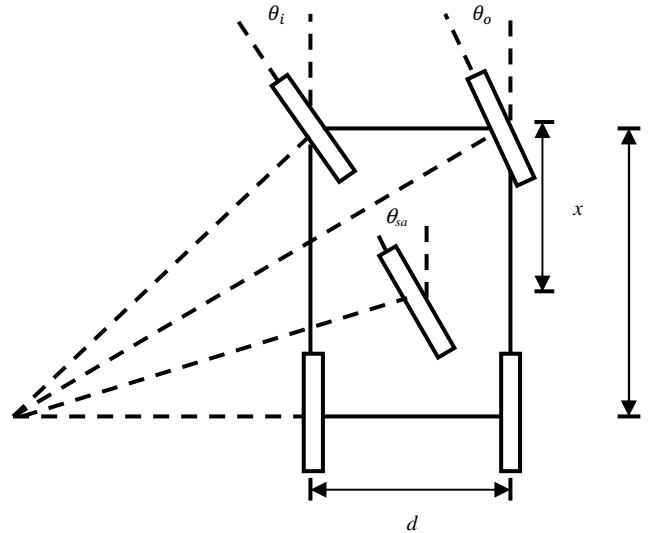


Figura 27. Desarrollo Ackerman con desplazamiento de rueda virtual.

Como se observa en la figura anterior, se puede hacer flotante a la rueda virtual a lo largo del eje longitudinal del vehículo una distancia x , las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$\tan\theta_o = \frac{2l\tan(\theta_{sa})}{2(l-x)-d\tan(\theta_{sa})} \quad \text{Ecuación 6.4}$$

$$\tan\theta_i = \frac{2l\tan(\theta_{sa})}{2(l-x)+d\tan(\theta_{sa})} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Ecuaciones con rueda virtual flotante se deben de implementar en los sistemas *Steer By Wire* en lugar de implementar las ecuaciones de rueda virtual fija. Esta implementación se realiza para lograr un suave y buen control a velocidades altas, ya que el radio de dirección puede hacerse función de la velocidad. BMW en su sistema Active Steering, el cual es un sistema mecánico de dirección pero con asistencia mecatrónica, implementa un desarrollo equivalente, el cual varía radio de dirección en función de la velocidad. Para este trabajo se implementan las ecuaciones 6.4 y 6.5, se debe primeramente hacer a x una función lineal de la velocidad, esta función lineal es totalmente experimental, y depende de la geometría del vehículo y del diseñador, Figura 28. Se dispondrá a desplazar la rueda virtual 0.27 metros frente al vehículo (dos vehículos más).

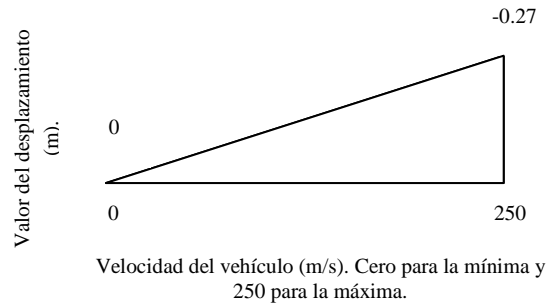


Figura 28. Obtención de la ecuación lineal para el desplazamiento x de la rueda virtual.

De la Figura 28, se obtiene la ecuación lineal para obtener el desplazamiento de la rueda virtual en función de la velocidad del vehículo:

$$\text{desplazamiento de la rueda virtual} = -\frac{0.27}{250} \text{ velocidad del vehículo} \quad \text{Ecuación 6.6}$$

Se observa en la ecuación anterior, que a velocidades cercanas a cero, el desplazamiento vale cero y las ecuaciones 6.4 y 6.5 (rueda virtual flotante) se comportan como las ecuaciones 2.2 y 2.3 (rueda virtual fija), teniendo un radio de dirección de 1:0.633, y a velocidades altas se aumenta el radio de dirección hasta el valor de 1:0.88, con el fin de mejorar el control del automóvil. El diagrama de flujo de la implementación de las ecuaciones 6.4 y 6.5 en el sistema *Steer By Wire* desarrollado en este trabajo se muestra en la Figura 29, en donde $valp$ es la velocidad del vehículo.

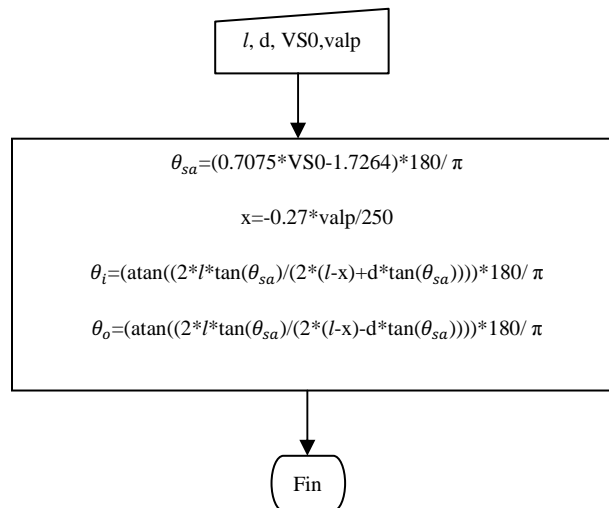


Figura 29. Diagrama de flujo del sistema *Steer By Wire* con rueda virtual flotante en función de la velocidad.

En estas ecuaciones, al momento de desplazar la rueda virtual hacia la parte trasera del vehículo disminuye el radio de dirección, y al momento de desplazarla hacia el frente del vehículo aumenta el radio de dirección.

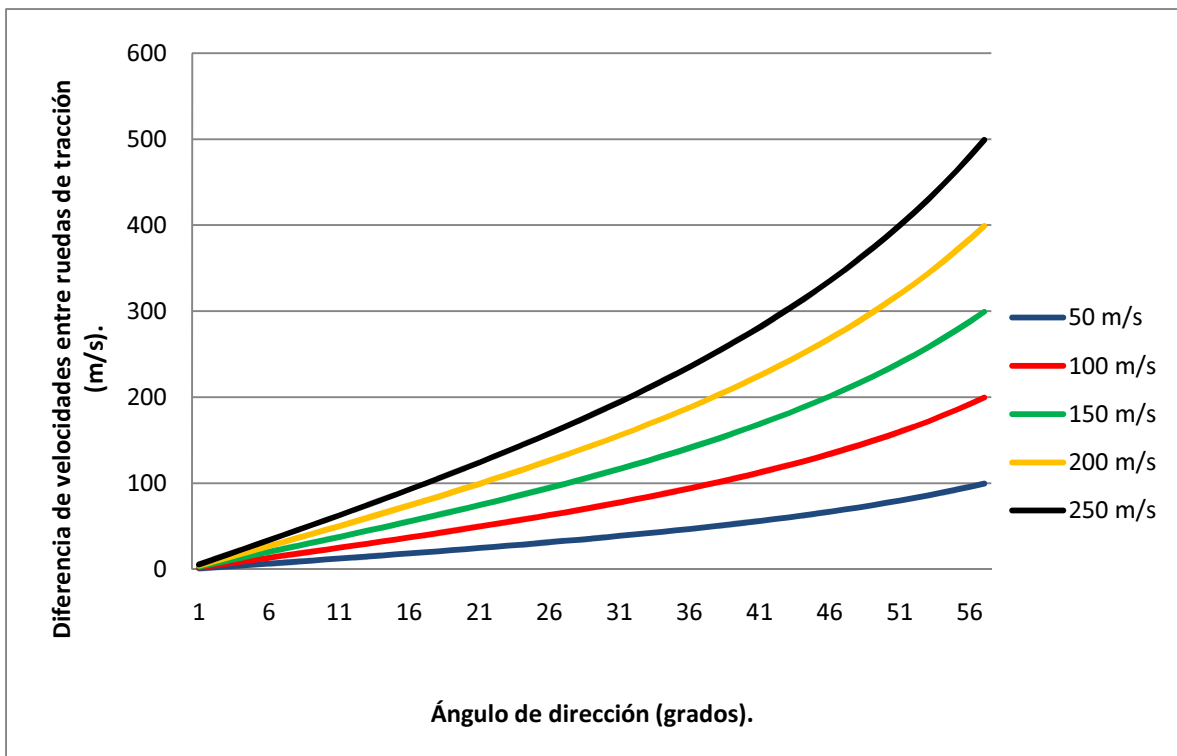
6.2. Desarrollo del sistema *Differential Drive*.

Para desarrollar este sistema se resolvieron las siguientes actividades: conocer la posición del pedal del acelerador y relacionarla con la velocidad lineal del vehículo v , Figura 5, implementar en el microcontrolador las ecuaciones necesarias para conocer las velocidades correspondientes de cada una de las ruedas de tracción, transformar estas velocidades en señales eléctricas y dirigir las a cada motor de CD para que giren las ruedas de tracción a su velocidades correspondientes.

La retroalimentación del pedal del acelerador hacia el conductor y la función de mantener el pedal en la posición cero (sin pisar) cuando éste no se encuentra en operación las realiza un resorte ubicado en la parte inferior del pedal. Con este resorte se prescinde de electrónica para realizar estas actividades.

Para conocer la posición del pedal del acelerador y relacionarla con la velocidad del vehículo se utiliza un potenciómetro instalado en el eje de giro del pedal. Se procedió a tener la relación de que cuando el acelerador se encuentre en la posición cero (sin pisar), la velocidad lineal del vehículo sea cero, y cuando el acelerador se encuentre a fondo, la velocidad del vehículo sea máxima, que es cuando los motores de CD están a la máxima velocidad angular. Con esta relación se logra conocer la velocidad lineal del vehículo v en todo momento únicamente conociendo en el microcontrolador el voltaje que emite el potenciómetro. A esta velocidad se le llamará velocidad deseada por el conductor ($valp$).

Se necesitan ahora resolver las ecuaciones 2.4-2.9 para conocer la velocidad de cada rueda de tracción del vehículo piloto, para lo cual se necesita saber la velocidad lineal del vehículo ($valp$), el ángulo de dirección del vehículo θ_{sa} en todo momento, el ancho entre ruedas d y la distancia entre ejes l . Una vez conocida la velocidad de cada rueda de tracción, se pueden graficar las diferencias de velocidades entre dichas ruedas a diferentes velocidades del vehículo. La Gráfica 3 muestra el comportamiento del sistema de tracción del vehículo piloto.



Gráfica 3. Comportamiento del sistema de tracción para el vehículo piloto.

Hasta ahora ya se conocen las velocidades que debe tomar cada rueda de tracción. Se necesitan ahora programar las ecuaciones 2.4-2.9 para transformar estas velocidades en señales eléctricas las cuales sirvan a los motores de CD para variar su velocidad angular, variando así la velocidad lineal de las ruedas. El diagrama de flujo se muestra en la Figura 30.

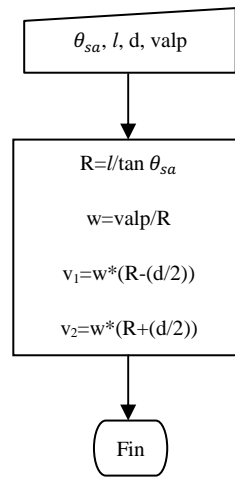


Figura 30. Diagrama de flujo del sistema *Differential Drive*.

Las librerías del lenguaje y el microcontrolador se encargan de transformar los valores de las ecuaciones 2.8 y 2.9 en señales eléctricas para variar la velocidad de los motores de CD a las velocidades determinadas por estas ecuaciones.

Por otro lado, como se ha desplazado la rueda virtual del vehículo piloto, el sistema de tracción también sufre una modificación. Se deben de modificar las ecuaciones de velocidad de cada rueda de tracción en función del desplazamiento x llevado con anterioridad. Esto es, como el ángulo del volante θ_{sa} permanece constante, el sistema de tracción tomará este ángulo para las ecuaciones de las velocidades de las ruedas de tracción, pero como se ha modificado el radio de dirección, se deben de modificar las velocidades de cada rueda de tracción para así poder modificar la diferencia entre ellas. El desarrollo de la cinemática para el sistema de tracción con rueda virtual flotante se muestra en la Figura 31.

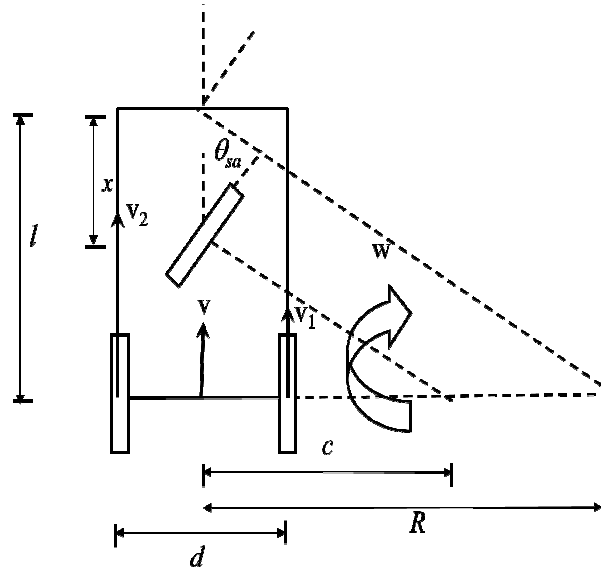


Figura 31. Sistema de tracción con desplazamiento de rueda virtual.

El mismo desplazamiento de la rueda virtual se tiene también para el sistema de tracción:

$$\text{desplazamiento } x = -\frac{0.27}{250} * \text{velocidad del vehículo } v \quad \text{Ecuación 6.6 Repetida.}$$

$$\tan\theta_{sa} = \frac{l}{R} \quad \text{Ecuación 6.7}$$

$$R = \frac{l}{\tan\theta_{sa}} \quad \text{Ecuación 6.8}$$

$$v = w * \text{radio} \quad \text{Ecuación 6.9}$$

$$w = \frac{v}{\text{radio}} \quad \text{Ecuación 6.10}$$

Por triángulos semejantes se obtiene:

$$c = \frac{[R(l-x)]}{l} \quad \text{Ecuación 6.11}$$

Por lo tanto:

$$w = \frac{vl}{R(l-x)} \quad \text{Ecuación 6.12}$$

$$v_1 = w \left[c - \frac{d}{2} \right] \quad \text{Ecuación 6.13}$$

$$v_2 = w \left[c + \frac{d}{2} \right] \quad \text{Ecuación 6.14}$$

Las ecuaciones 6.8, 6.11-6.14 se programaron en el sistema *Differential Drive*, siendo su diagrama de flujo el mostrado en la Figura 32.

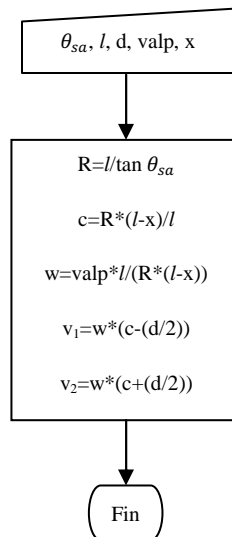


Figura 32. Diagrama de flujo del sistema *Differential Drive* con rueda virtual flotante en función de la velocidad.

La velocidad en los motores de CD se modifica variando el ancho de pulso (PWM). Para este trabajo el rango de velocidad del vehículo estará definido entre 0 y 250 m/s. Como los microcontroladores no manejan cantidades considerables de corriente, se implementó la etapa de potencia mostrada en la Figura 33. El circuito integrado U1 es un optoacoplador 4N30, el cual recibe la señal proveniente del microcontrolador en el puerto 1, el puerto 2 se conecta a tierra a través de una resistencia de 330Ω. Se colocó un led en este puerto

para apreciar los anchos de pulsos que manda el microcontrolador. El transistor TIP 120 se conecta al puerto 4 a través de una resistencia de 470Ω para saturar al transistor y este sirva de switch eléctrico para el motor de CD.

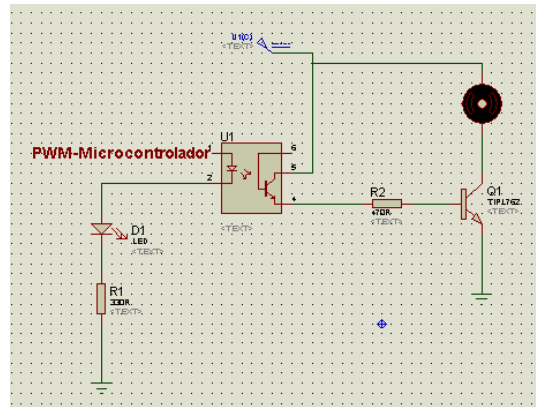


Figura 33. Etapa de potencia para el sistema *Differential Drive*.

Con estos dos desarrollos, se tiene la capacidad de controlar al vehículo piloto. Como la masa del vehículo piloto no es relevante, la cinemática del mismo es suficiente para su control. Si se toma en cuenta la masa del vehículo, se debe de realizar un modelado dinámico del vehículo [Szczepaniak, 1982] y un modelado y control de los motores eléctricos [Ogata, 1993].

6.3. Desarrollo del sistema de evasión de colisiones.

6.3.1. Detección de obstáculos.

Como ya se ha mencionado, se llamará obstáculos a los objetos sólidos con los cuales no se quiere que el vehículo tenga contacto alguno a ninguna velocidad. La detección de obstáculos se hará mediante sensores infrarrojos, en este trabajo se usaron dos modelos de sensores, SHARP GP2Y0A21YK0F y SHARP GP2Y0A02YK0F. El primer paso es la caracterización de los mismos, Figura 34. Esta caracterización significa obtener la ecuación la cual define al sensor. Para este tipo de sensores, se realiza midiendo el voltaje que emite el sensor variando la distancia hacia algún objeto. En la Figura 35 se muestra la imagen del sensor SHARP GP2Y0A21YK0F y en la Gráfica 4 su curva distancia-voltaje.

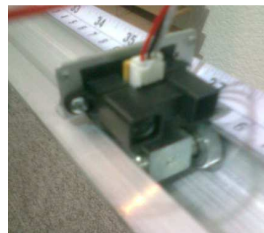
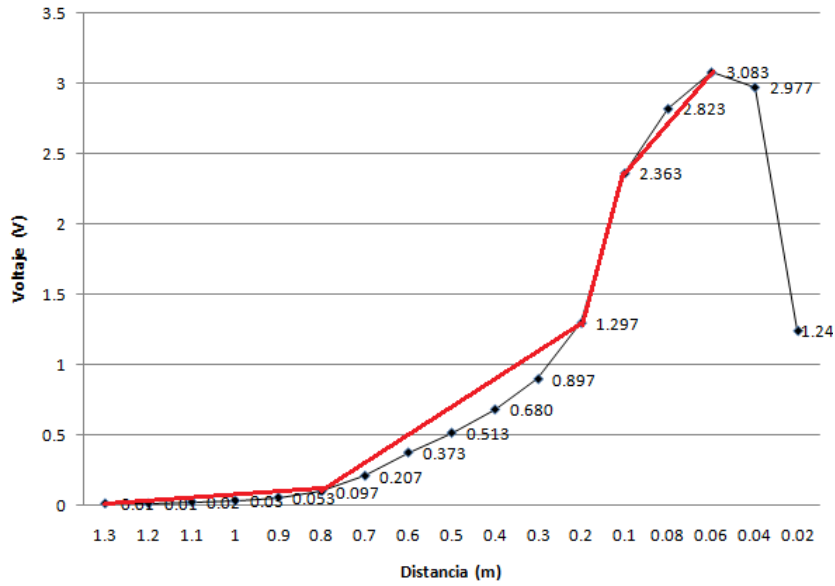


Figura 34. Caracterización de sensores infrarrojos.

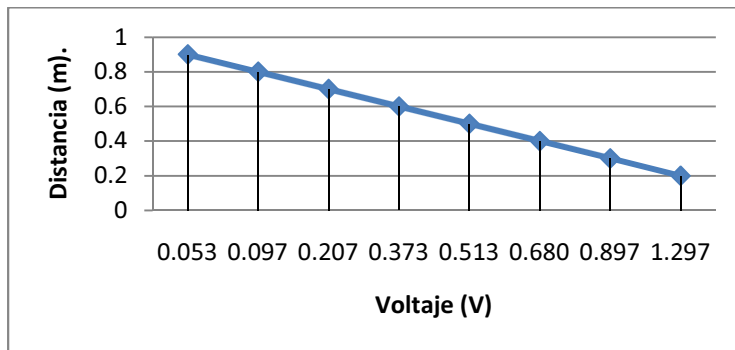


Figura 35. Sensor SHARP GP2Y0A21YK0F.

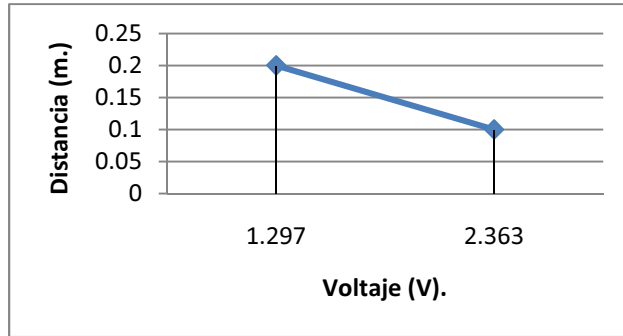


Gráfica 4. Curva Distancia-Voltaje.

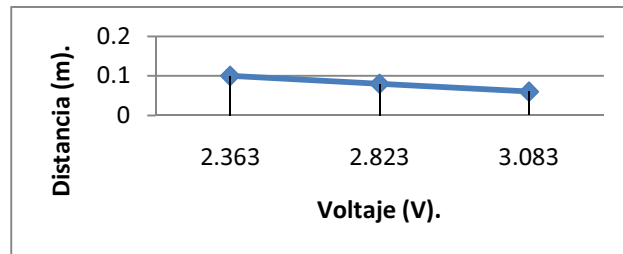
Como se puede observar este sensor es no-lineal. Por lo cual se procedió a linealizarlo mediante secciones, este método de linealización es comúnmente empleado en la caracterización de sensores (líneas rectas rojas Gráfica 4). Se invirtieron los ejes que generaron estas líneas rectas y se obtuvieron sus correspondientes ecuaciones, Gráficas 5, 6 y 7. Las ecuaciones de estas líneas, ubicadas en cada figura, nos dan la distancia a la que se encuentra el sensor del objeto a partir del valor del voltaje que emite el sensor.



Gráfica 5. Sección 0.90-0.20m. $distancia = -0.5627 * voltaje + 0.92982$.



Gráfica 6. Sección 0.20-0.10m. $distancia = -0.0938 * voltaje + 0.32165$.

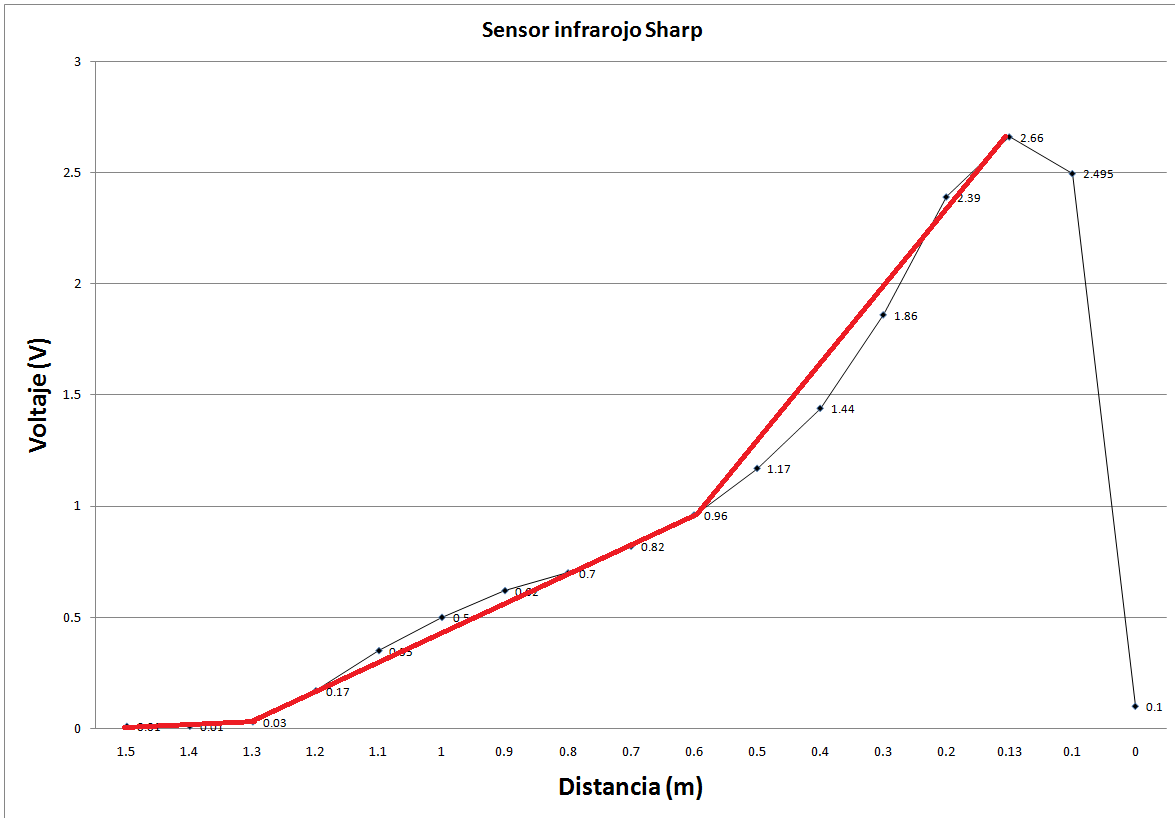


Gráfica 7. Sección 0.10-0.06m. $distancia = -0.0555 * voltaje + 0.23114$.

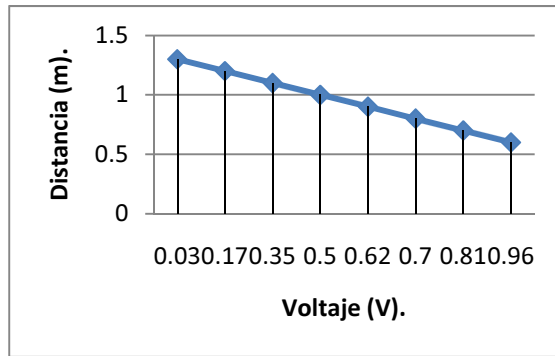
Con lo anterior queda caracterizado el sensor. Ahora se realiza el mismo procedimiento para el sensor SHARP GP2Y0A02YK0F.



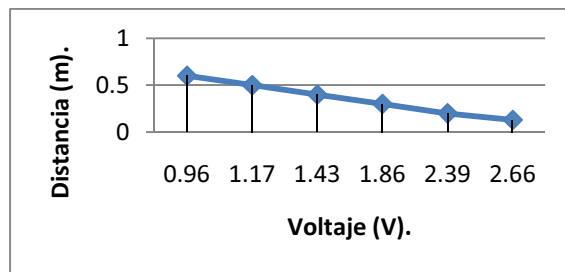
Figura 36. Sensor SHARP GP2Y0A02YK0F.



Gráfica 8. Curva Distancia-Voltaje.



Gráfica 9. Sección 1.30-0.60m. $distancia = -0.75268 * voltaje + 1.32257$.



Gráfica 10. Sección 0.60-0.13m. $distancia = -0.27647 * voltaje + 0.86541$.

Quedando de igual forma caracterizado el sensor. Como ya se tienen caracterizados los sensores, ya somos capaces de saber a qué distancia se encuentran los objetos frente a ellos. Esta distancia es necesaria para la programación en la cual se crearán comandos para evadir las colisiones.

6.3.2. Implementación en el vehículo piloto.

Para este trabajo, se desarrollarán comandos para evitar tres tipos de colisiones: frontal, lateral derecha y lateral izquierda.

6.3.2.1. Colisión frontal.

Este tipo de colisión ocurre cuando el automóvil se impacta contra un obstáculo en la parte frontal del mismo. El comando para evitar este tipo de colisión es detener el automóvil antes de que se impacte contra el obstáculo. Para hacer esto, se debe en primer lugar medir la distancia entre el automóvil y el obstáculo en todo momento, determinar una línea de influencia y un límite, comenzar a reducir proporcionalmente la velocidad del automóvil en la línea de afectación y finalmente detener completamente el automóvil en el límite.

En la Figura 37 se observan los conceptos que se utilizarán para este trabajo, con los cuales se caracterizó el comando de evasión de colisión frontal. Los conceptos se definen a continuación.

Área de no contacto: Es el espacio en el cual el vehículo no podrá estar.

Límite: Es la distancia mínima a la que el vehículo se encontrará del obstáculo al momento de detenerse ($Vel = 0$). Esta distancia está en función de la velocidad. Se incrementa linealmente al incrementarse la velocidad. Esto con la finalidad de incrementar el factor de seguridad a velocidades altas a la hora de evitar la colisión.

Línea de influencia: Es la distancia máxima al obstáculo a la cual el comando de evasión de colisión comienza a controlar la velocidad del vehículo. Esta distancia está en función de la velocidad.

Área de proporcionalidad: Está limitada por el límite y por la línea de influencia. Es el área en la cual la velocidad del vehículo tiene como límite máximo una ley o función regida por el comando de evasión en la cual se disminuye la velocidad paulatinamente. Esto con la finalidad de que el vehículo no frene de repente y no tienda a sobrellevarse en su recorrido debido a la inercia del mismo, además de eliminar las posibilidades de lesiones al conductor y reducir grandemente la posibilidad de una colisión debido al frenado repentino del vehículo. La función designada en este trabajo tiene como velocidad máxima la velocidad que lleva el vehículo al entrar en esta área, y como velocidad mínima cero kilómetros por hora.

Área de libertad: En esta área, no se ejecuta el comando de evasión de colisión, las respuestas del vehículo son las deseadas por el conductor.

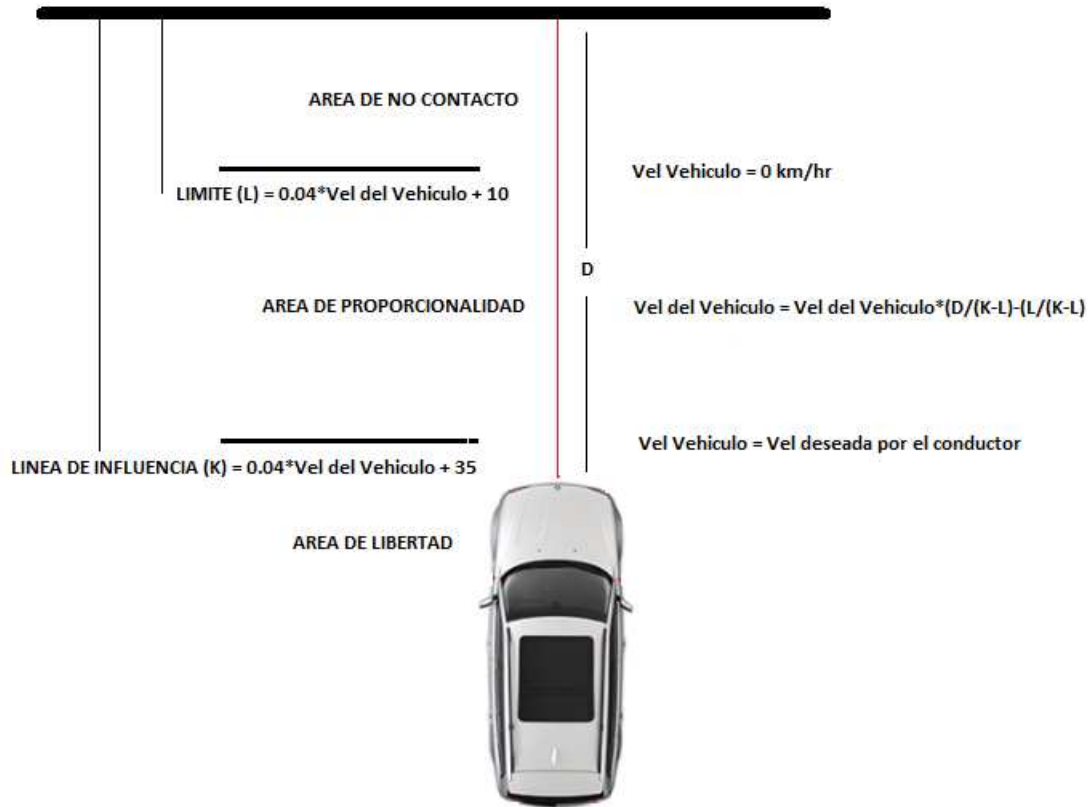


Figura 37. Esquema de la evasión de colisión frontal.

El sensor SHARP GP2Y0A02YK0F fue el utilizado para la colisión frontal. Una vez conociendo la velocidad del vehículo, Figura 32, se procede a programar la evasión de colisión frontal, para lo cual se necesita conocer la distancia a la que se encuentra el obstáculo frente al vehículo (*dis*). Esto se logra primeramente midiendo dentro del microcontrolador el voltaje que emite este sensor (*VS*). Como ya se ha mencionado, el modelado de este sensor se hizo por secciones, por lo cual, para este sensor se tomarán las ecuaciones de las Gráficas 9 y 10 para determinar la distancia al objeto, el diagrama de flujo se muestra en la Figura 38:

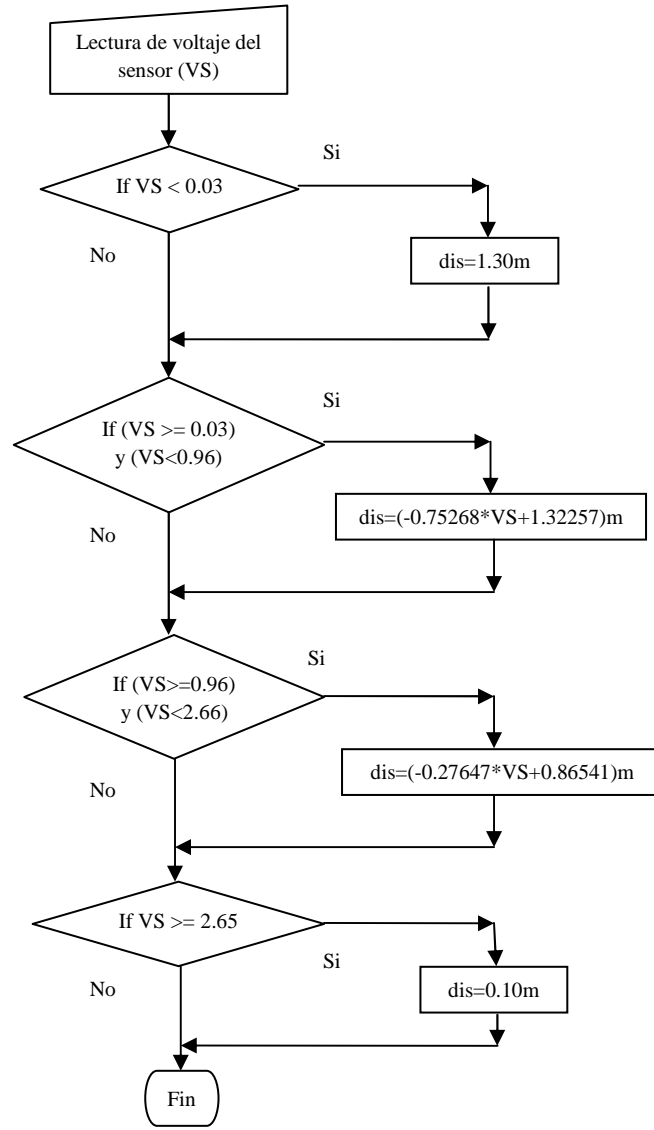


Figura 38. Diagrama de flujo del de sensor SHARP GP2Y0A02YK0F para conocer la distancia a un obstáculo.

Una vez conocida la distancia al obstáculo, se determinan el límite y la línea de influencia. Se les asignan distancias mínima y máxima a velocidades mínima y máxima del vehículo, para después crear una función lineal dependiente de la velocidad del vehículo. La Figura 39 muestra la obtención de la ecuación para el límite y la Figura 40 muestra la obtención de la ecuación para la línea de influencia.

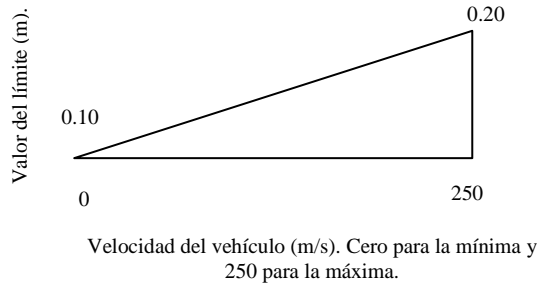


Figura 39. Obtención de la ecuación lineal para el límite.

Como se aprecia en la figura anterior, el valor del límite es de 0.25 metros cuando el vehículo se traslada a su máxima velocidad y de 0.10 metros cuando el vehículo se trasladara lo más lento posible. La ecuación correspondiente es:

$$\text{valor del límite} = 0.0004 * \text{velocidad del vehículo} + 0.10 \quad \text{Ecuación 6.15}$$

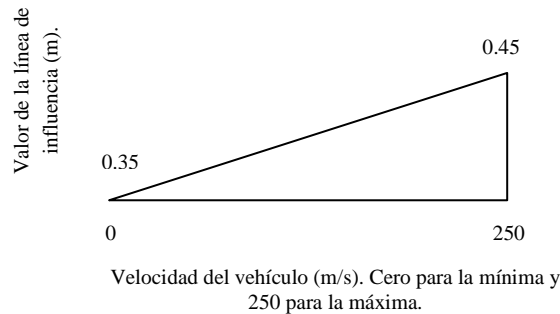


Figura 40. Obtención de la ecuación lineal para la línea de influencia.

La ecuación lineal para obtener el valor de la línea de influencia en función de la velocidad es:

$$\text{valor de la línea de influencia} = 0.0004 * \text{velocidad del vehículo} + 0.35 \quad \text{Ecuación 6.16}$$

Una vez obtenidos los límites del área de proporcionalidad, la línea de influencia (k) y el límite (lim), se procede a obtener una ley o función, Figura 41, la cual disminuya proporcionalmente la velocidad del vehículo en esta área. Esta área tendrá en la línea de influencia la velocidad que lleva el vehículo y en el límite cero kilómetros por hora.

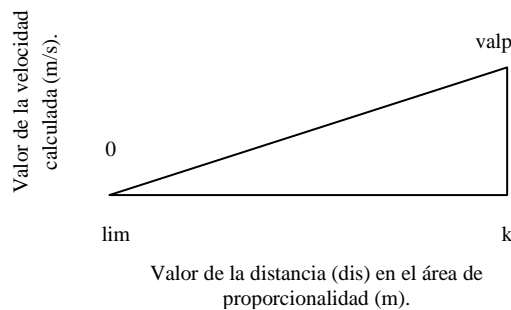


Figura 41. Obtención de la velocidad calculada del vehículo ($valc$) en el área de proporcionalidad.

La ecuación lineal para obtener el valor controlado de la velocidad del vehículo en el área de proporcionalidad es:

$$velocidad\ calculada\ para\ el\ veh\acute{u}culo = \frac{valv}{k-lim} * distancia\ al\ obst\acute{a}culo - \frac{valv}{k-lim} lim \quad Ecuaci\acute{o}n\ 6.17$$

Una vez teniendo definidos la distancia al obst\aculo (*dis*), el l\imita (*lim*), la l\inea de influencia (*k*) y la velocidad controlada para el veh\iaculo en el \carea de proporcionalidad (*valc*), se procede a programar el comando de evasi\o de colisi\o frontal, el cual consiste en controlar la velocidad final del veh\iaculo (*valv*), cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 42.

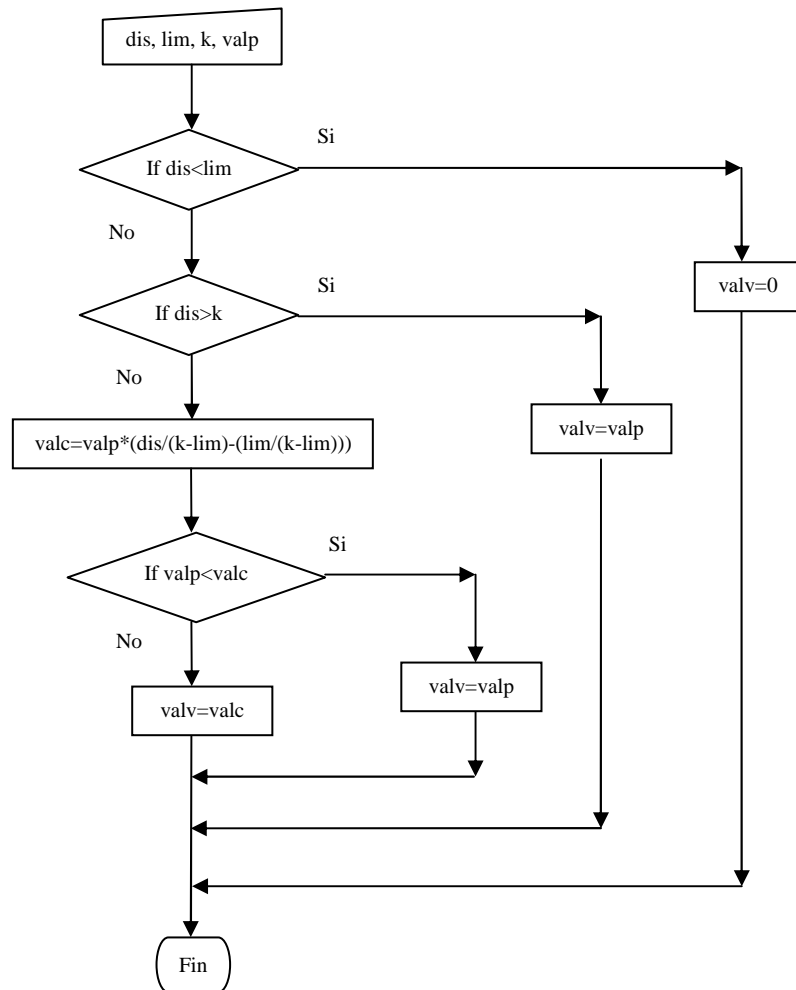


Figura 42. Diagrama de flujo para la evasi\o de colisi\o frontal.

En el diagrama de flujo anterior se observa que si la velocidad proveniente del conductor (*valp*) es menor que la velocidad calculada por el sistema de evasi\o, se toma en cuenta la velocidad del conductor, pero si la entrada del conductor es mayor a la velocidad que debe de tener el veh\iaculo en el \carea de proporcionalidad, se toma en cuenta la velocidad calculada por el sistema de evasi\o. Esto es, el sistema de evasi\o al registrar peligro debido al acercamiento a un obst\aculo y entrar en operaci\o, no corta las entradas del conductor, si no que, las analiza y las eval\ua, y determina cual comando es m\as evasivo: si el proveniente del conductor o el calculado por el sistema de evasi\o, ejecutando el m\as evasivo. Esto en caso de que el conductor se percate del peligro y frene repentinamente, evadiendo la colisi\o antes que el sistema lo haga.

6.3.2.2. Colisión lateral izquierda.

Este tipo de colisión ocurre cuando el automóvil se dirige lateralmente contra un obstáculo o cuando se dispone a cambiar de carril encontrándose otro automóvil al lado impactándose en el costado izquierdo. Esto es muy común debido a que los espejos de los automóviles contienen un espacio muerto, en el cual no se ve el automóvil de al lado por el espejo. El comando para evitar este tipo de colisión es girar el volante hacia la derecha, alejándose el automóvil del obstáculo y mantener una distancia mínima al obstáculo, o en el caso de tener un automóvil al lado, no permitir el giro de las ruedas. Una opción que se puede implementar aquí es que además de evadir el obstáculo lateralmente frene también el automóvil de manera proporcional. Al igual que en la colisión del tipo frontal, debemos en primer lugar medir la distancia entre el automóvil y el obstáculo en todo momento, determinar una línea de influencia y un límite, y mover el volante hacia la derecha con el fin de que el automóvil se aleje del obstáculo y guarde una distancia mínima (quedando como opción el frenado simultáneo).

En la Figura 43 se observan los conceptos con los que se caracterizó el comando de evasión de colisión lateral izquierda. No aparecen los conceptos de significado idéntico arriba mencionados.

Límite: Es la distancia mínima a la que el vehículo se encontrará del obstáculo lateralmente. Esta distancia está en función de la velocidad. Se incrementa linealmente al incrementarse la velocidad. Esto con la finalidad de incrementar el factor de seguridad a velocidades altas a la hora de evitar la colisión.

Línea de influencia: Es la distancia máxima al obstáculo a la cual el comando de evasión de colisión lateral comienza a controlar la dirección del vehículo. Esta distancia está en función de la velocidad.

Área de proporcionalidad lateral: Está limitada por el límite y por la línea de influencia. Es el área en la cual la dirección del vehículo obedece una ley o función regida por el comando de evasión lateral en la cual se direcciona hacia la derecha al vehículo paulatinamente conservando una distancia mínima al obstáculo. Esto con la finalidad de que el vehículo no se direcciona de repente hacia la derecha y se sobrepasen los límites dinámicos del automóvil perdiendo el control del mismo, además de eliminar las posibilidades de lesiones al conductor y reducir grandemente la posibilidad de una colisión debido al direccionado repentino del vehículo. La función designada para este tipo de colisión tiene como dirección mínima la dirección que lleva el vehículo al entrar en esta área, y como dirección máxima la dirección máxima permitida para la configuración del vehículo piloto utilizado en este trabajo (57°).

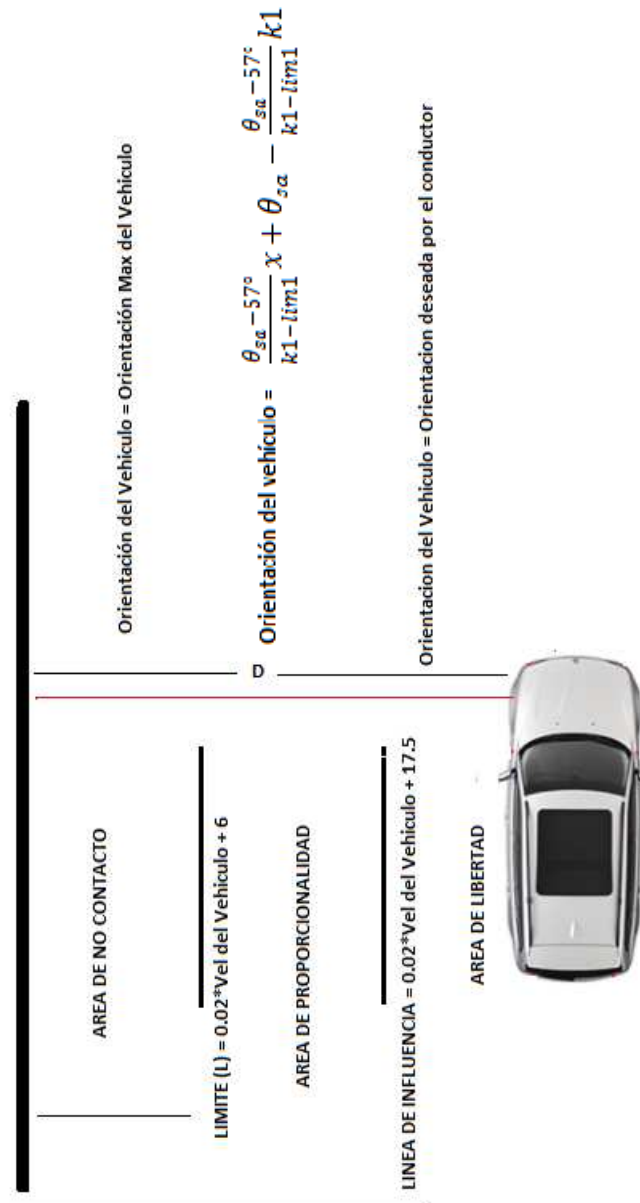


Figura 43. Esquema de la evasión de colisión lateral izquierda.

El sensor SHARP GP2Y0A21YK0F fue el utilizado para la colisión lateral. Una vez conociendo la orientación del vehículo, Figura 29, se procede a programar la evasión de colisión lateral izquierda, para lo cual se necesita conocer la distancia a la que se encuentra lateralmente el obstáculo del vehículo (*disI*). Esto se logra primeramente midiendo dentro del microcontrolador el voltaje que emite este sensor (*VSI*). Como ya se ha mencionado, el modelado de este sensor se hizo por secciones, por lo cual, para este sensor se tomarán las ecuaciones de las Gráficas 5, 6 y 7 para determinar la distancia al objeto, el diagrama de flujo se muestra en la Figura 44:

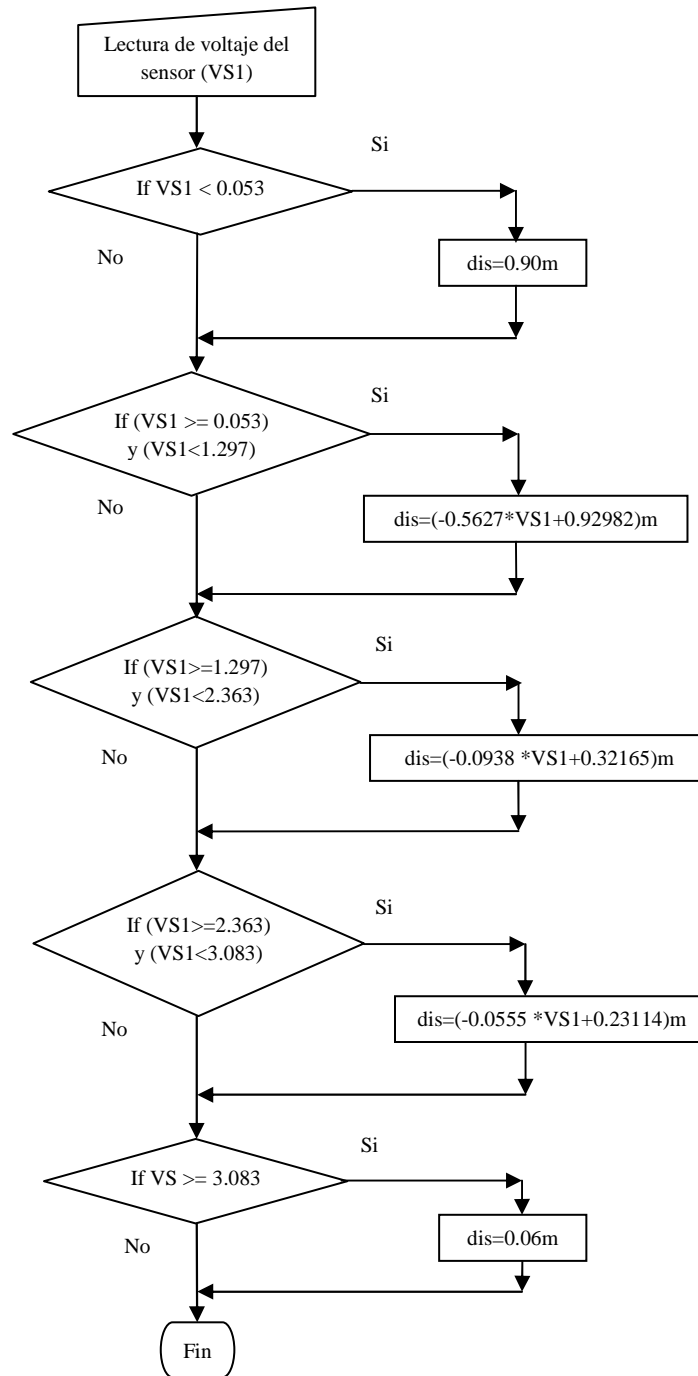


Figura 44. Diagrama de flujo del de sensor SHARP GP2Y0A21YK0F para conocer la distancia a un obstáculo.

Una vez conocida la distancia al obstáculo, se determinan el límite y la línea de influencia. Se les asignan distancias mínima y máxima a velocidades mínima y máxima del vehículo, para después crear una función lineal dependiente de la velocidad del vehículo. La Figura 45 muestra la obtención de la ecuación para el límite lateral y la Figura 46 muestra la obtención de la ecuación para la línea de influencia lateral.

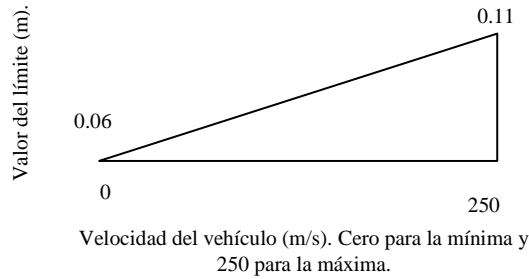


Figura 45. Obtención de la ecuación lineal para el límite lateral.

Como se aprecia en la figura anterior, el valor del límite lateral izquierdo es de 0.11 metros cuando el vehículo se traslada a su máxima velocidad y de 0.06 metros cuando el vehículo se trasladara lo más lento posible. La ecuación correspondiente es:

$$\text{valor del limite lateral} = 0.0002 * \text{velocidad del vehiculo} + 0.06 \quad \text{Ecuación 6.18}$$

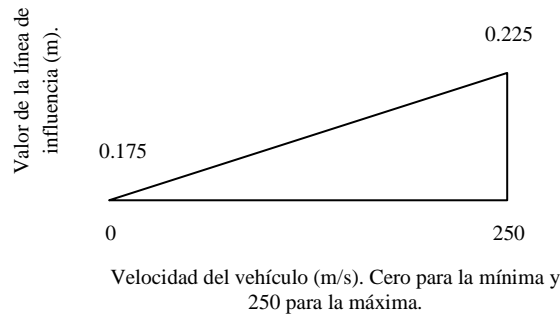


Figura 46. Obtención de la ecuación lineal para la línea de influencia lateral.

La ecuación lineal para obtener el valor de la línea de influencia lateral en función de la velocidad es:

$$\text{valor de la línea de influencia lateral} = 0.0002 * \text{velocidad del vehiculo} + 0.175 \quad \text{Ecuación 6.19}$$

Una vez obtenidos los límites del área de proporcionalidad lateral, la línea de influencia lateral ($k1$) y el límite lateral ($lim1$), se procede a obtener una ley o función, Figura 47, la cual oriente proporcionalmente al vehículo en esta área. Esta área tendrá en la línea de influencia la orientación que lleva el vehículo θ_{sa} y en el límite tendrá 57° .

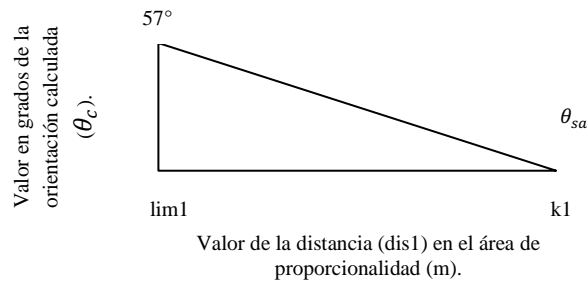


Figura 47. Obtención de la orientación calculada del vehículo (θ_c) en el área de proporcionalidad lateral.

La ecuación lineal para obtener el valor controlado de la orientación del vehículo en el área de proporcionalidad es:

$$\text{orientación calculada para el vehículo} = \frac{\theta_{sa} - 57^\circ}{k1 - \text{lim1}} * \text{distancia lateral al obstáculo} + \theta_{sa} - \frac{\theta_{sa} - 57^\circ}{k1 - \text{lim1}} k1$$

Ecuación 6.20

Una vez teniendo definidos la distancia lateral al obstáculo ($dis1$), el límite lateral ($lim1$), la línea de influencia lateral ($k1$) y la orientación controlada del vehículo en el área de proporcionalidad (θ_c), se procede a programar el comando de evasión de colisión lateral izquierda, el cual consiste en controlar la orientación de salida del vehículo (θ_{sav}), cuyo diagrama de flujo se muestra en la Figura 48:

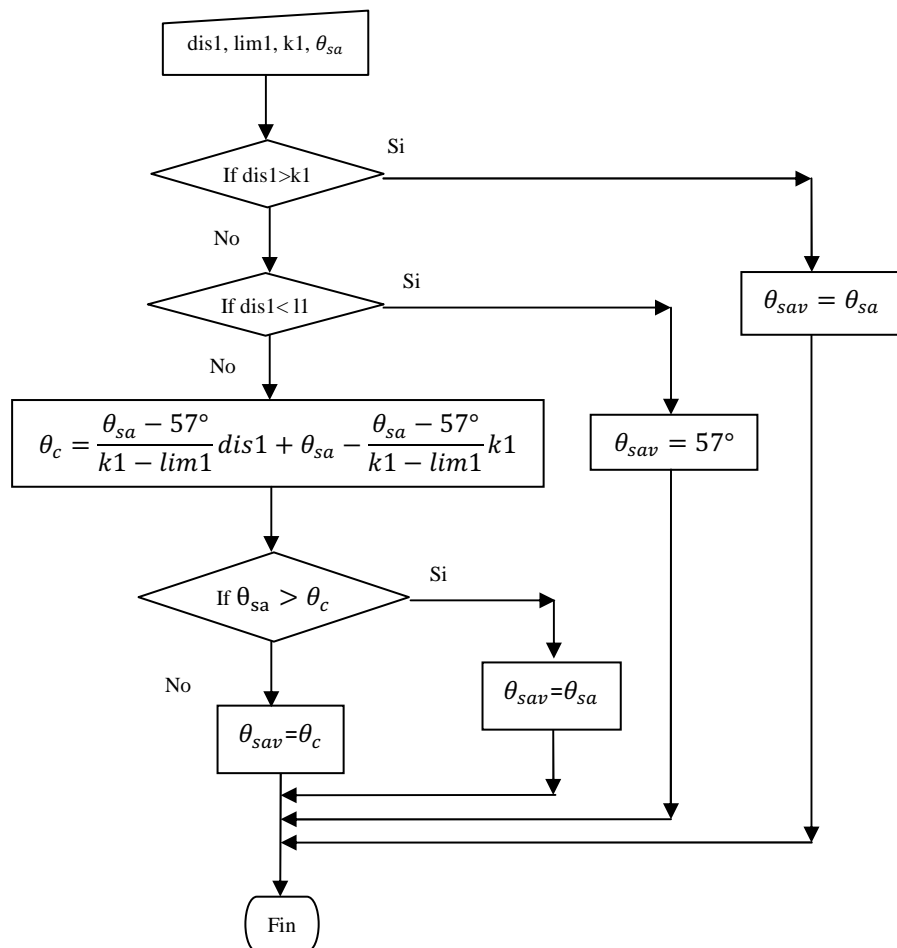


Figura 48. Diagrama de flujo para la evasión de colisión lateral izquierda.

En el diagrama de flujo anterior se observa que si la orientación proveniente del conductor (θ_{sa}) es mayor que la orientación calculada por el sistema de evasión, se toma en cuenta la orientación proveniente del conductor, pero si la entrada del conductor es menor que la orientación que debe de tener el vehículo en el área de proporcionalidad lateral, se toma en cuenta la orientación calculada por el sistema de evasión. Esto es, el sistema de evasión al registrar peligro debido al acercamiento lateral a un obstáculo y entrar en operación, no corta las entradas del conductor, si no que, las analiza y las evalúa, y determina cual comando es más evasivo: si el proveniente del conductor o el calculado por el sistema de evasión, ejecutando el más evasivo. Esto en caso de que el conductor se percate del peligro y gire repentinamente el volante de la dirección, evadiendo la colisión antes que el sistema lo haga.

6.3.2.3. Colisión lateral derecha.

Este tipo de colisión es totalmente idéntica a la colisión lateral izquierda. Con la diferencia de que el comando de evasión en lugar de direccionar el vehículo a la derecha, lo hace hacia la izquierda. Además, la desigualdad en la comparativa de θ_c en el diagrama de flujo se invierte, y la ecuación para el cálculo de θ_c es la siguiente:

$$\text{orientación calculada} = \frac{\theta_{sa}+57^\circ}{k1-\text{lim}1} * \text{distancia lateral derecha} - 57 - \frac{\theta_{sa}+57^\circ}{k1-\text{lim}1} \text{lim}1 \quad \text{Ecuación 6.21}$$

Como se puede observar, los comandos para evitar colisiones con obstáculos se pueden ejecutar a cualquier distancia que se quiera, depende del diseñador y de los sensores de medición. Ahora bien, no sólo se pueden ejecutar comandos de evasión, por ejemplo, a corta distancia se pudieran accionar otros dispositivos para alertar al conductor de una posible colisión, pudiendo ser indicadores sonoros o lumínicos. Además, a una menor distancia, cuando el conductor no respondió a las alertas, se pueden accionar todo tipo de dispositivos que aumenten la seguridad pasiva, como ajustar totalmente el cinturón de seguridad para sujetar aun más a los pasajeros, entre algunos otros más.

Otra opción que tiene el diseñador, es que en lugar de ejecutar los comandos de evasión en base a la distancia al obstáculo, se hiciera en base al tiempo esperado para la colisión. El tiempo esperado para la colisión se obtiene al dividir la distancia al obstáculo entre la velocidad del automóvil. Así, se ejecutarían los diversos comandos de evasión ciertos segundos antes de la posible colisión. Se debe tener cuidado con las unidades.

6.4 Resultados.

El vehículo piloto fue construido sin sensores de posición en las ruedas de dirección debido a que no se contó con el presupuesto para la obtención de los sensores, por lo cual, no se puede obtener el valor real de la orientación de las ruedas, sin embargo, aunque no es exacta la prueba, se procedió a tomar fotografías de la vista superior del vehículo, para constatar de que existe un centro instantáneo de giro. Como se aprecia en las siguientes figuras, existe un centro instantáneo de giro común a todas las ruedas logrando con esto la cinemática de Ackerman.

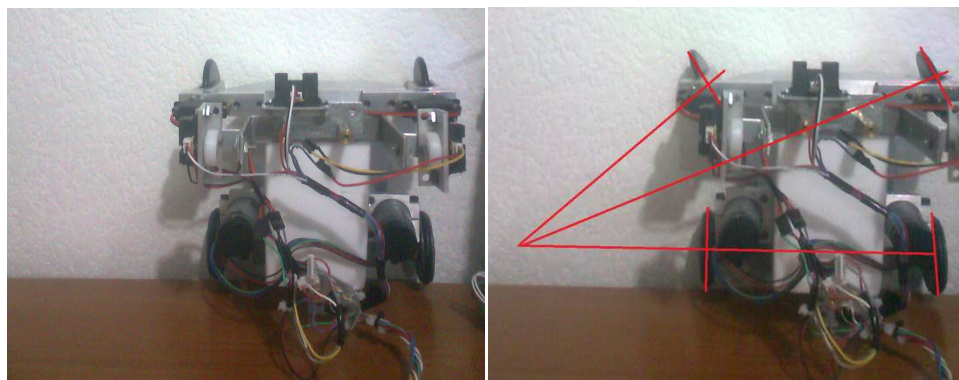


Figura 49. Apreciación visual de la orientación de las ruedas de dirección. Primer imagen paralelas, segunda imagen 20° de orientación del vehículo. Radio de dirección 1:0.633.

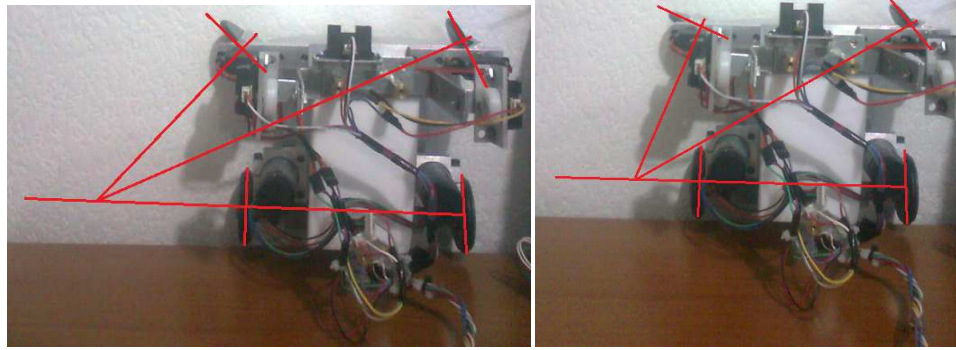
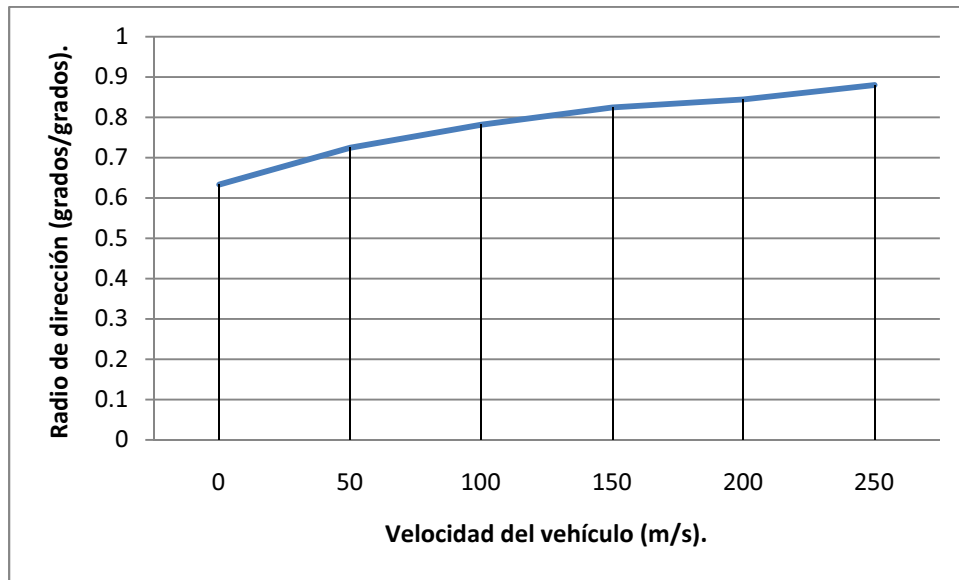


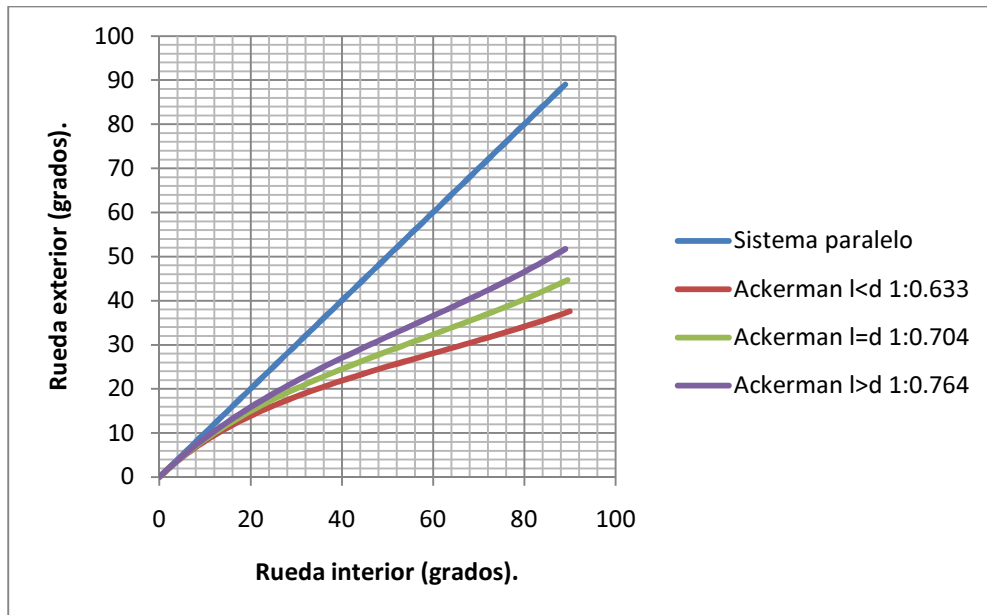
Figura 50. Apreciación visual de la orientación de las ruedas de dirección. Primer imagen 30° de orientación del vehículo, segunda imagen 40°. Radio de dirección 1:0.633.

La geometría del vehículo piloto crea un radio de dirección menor de uno, esto genera muchas posibilidades que a velocidades altas se pierda el control del vehículo debido a la alta reacción de giro de las ruedas de dirección, por lo cual se procedió a modificar el radio de dirección del vehículo piloto. La modificación del radio de dirección se hizo a partir de recorrer la rueda virtual en función de la velocidad hacia la parte posterior del vehículo. Se logró modificar el radio de dirección de 1:0.633 a 1:0.88, Gráfica 11.



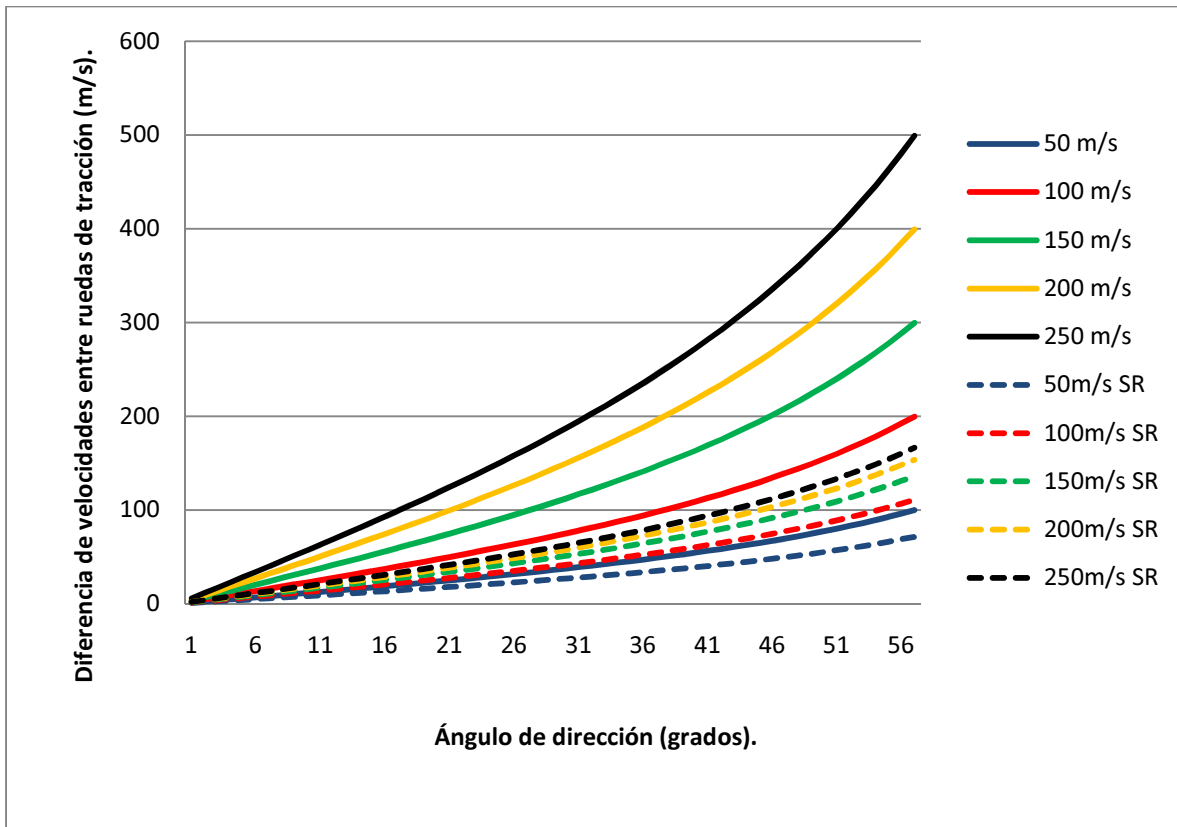
Gráfica 11. Variación del radio de dirección debido al desplazamiento de la rueda virtual en función de la velocidad para la geometría $l=0.135\text{m}$ y $d=0.175\text{m}$ del vehículo piloto.

Otra forma de variar el radio de dirección es construir otra configuración de vehículo, es decir, modificar la geometría del mismo. Como se observa en la Gráfica 12, si en la geometría se tiene que $l > d$ el radio de dirección aumenta y si $l < d$ el radio de dirección disminuye. El límite superior de la configuración $l >> d$ es el sistema paralelo, por más que se aumente l respecto a d , con la cinemática Ackerman nunca llegarán a ser paralelas las ruedas de dirección. El límite inferior es el eje horizontal.



Gráfica 12. Variación del radio de dirección debido al cambio de la geometría del vehículo con velocidad constante de 0 m/s.

Como se ha variado el radio de dirección del vehículo piloto, Gráfica 11, se deben de modificar las velocidades de las ruedas de tracción. Esto es, como el volante permanece constante, pero la orientación final del vehículo es reducida a altas velocidades debido al aumento del radio de dirección, se debe de disminuir la diferencia entre las velocidades de las ruedas de tracción, esto se realiza para que se tenga una congruencia entre la orientación final del vehículo y su velocidad angular final producida por la diferencia entre las velocidades de las ruedas de tracción. La Gráfica 13 muestra la reducción de la diferencia de las velocidades de las ruedas de tracción. Esta reducción de la diferencia disminuye la velocidad angular acorde con la orientación final del vehículo piloto, como resultado se tiene un mejor control del vehículo a velocidades altas.

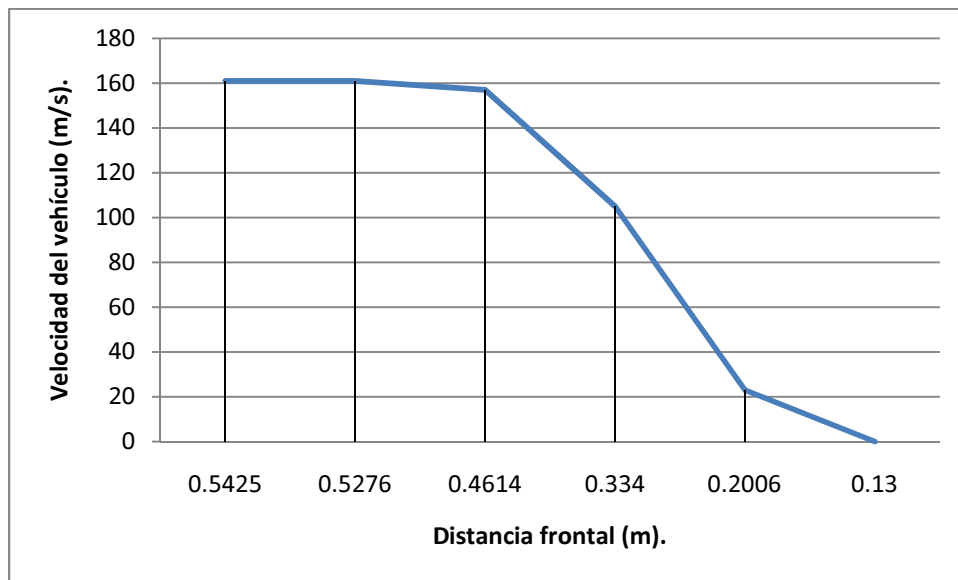


Gráfica 13. Variación de la diferencia de velocidades de las ruedas de tracción debida al desplazamiento de la rueda virtual.

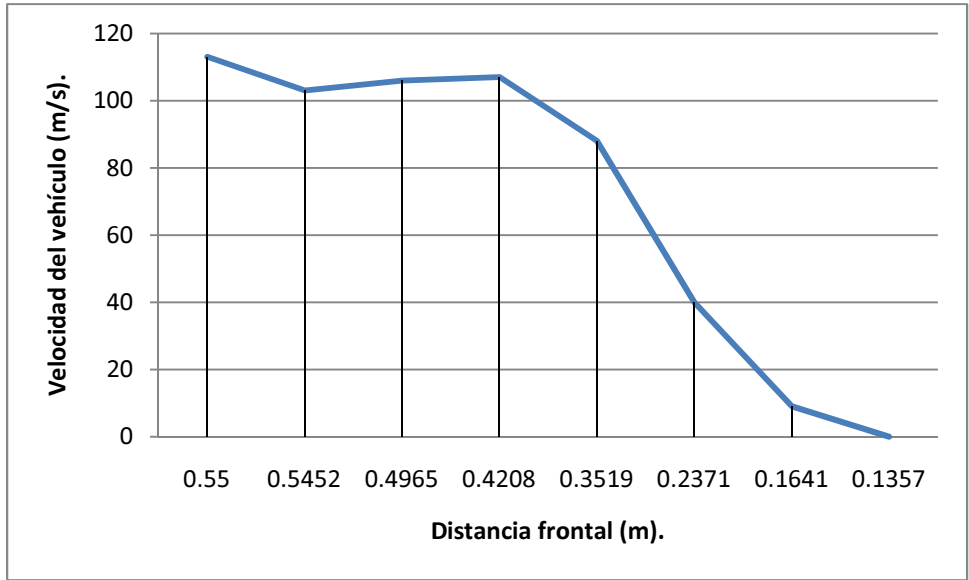
En la evasión frontal, mostrada en la Figura 51, se hicieron pruebas a tres velocidades diferentes. El vehículo a cualquier velocidad se debe de detener a la misma distancia del obstáculo, debido a que el valor del límite se actualiza con el valor de la velocidad que toma del vehículo en todo momento. La Ecuación 6.15 indica que el límite debe de ser de 0.10 metros, como se aprecia en las siguientes gráficas, el vehículo a diferentes velocidades se detiene a una distancia del obstáculo de 0.13 a 0.139 metros, teniendo un margen de error de 0.03 a 0.039 metros. La Ecuación 6.16 indica los valores para la línea de influencia a diferentes velocidades. Las gráficas 14, 15 y 16 muestran una reducción notable de la velocidad en los valores de 0.4614, 0.4208 y 0.3776 metros respectivamente, siendo los valores teóricos respectivos de la línea de influencia de 0.41, 0.39, 0.38 metros a las respectivas velocidades, con lo cual el rango de error es de 0.0024 a 0.0514 metros.



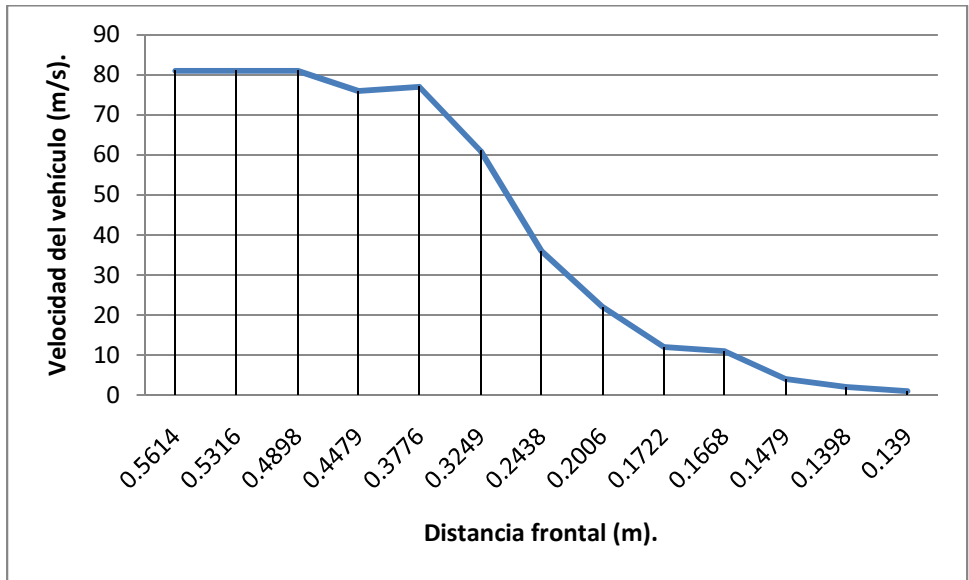
Figura 51. Experimentación en la evasión frontal.



Gráfica 14. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 161 m/s.



Gráfica 15. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 113 m/s.

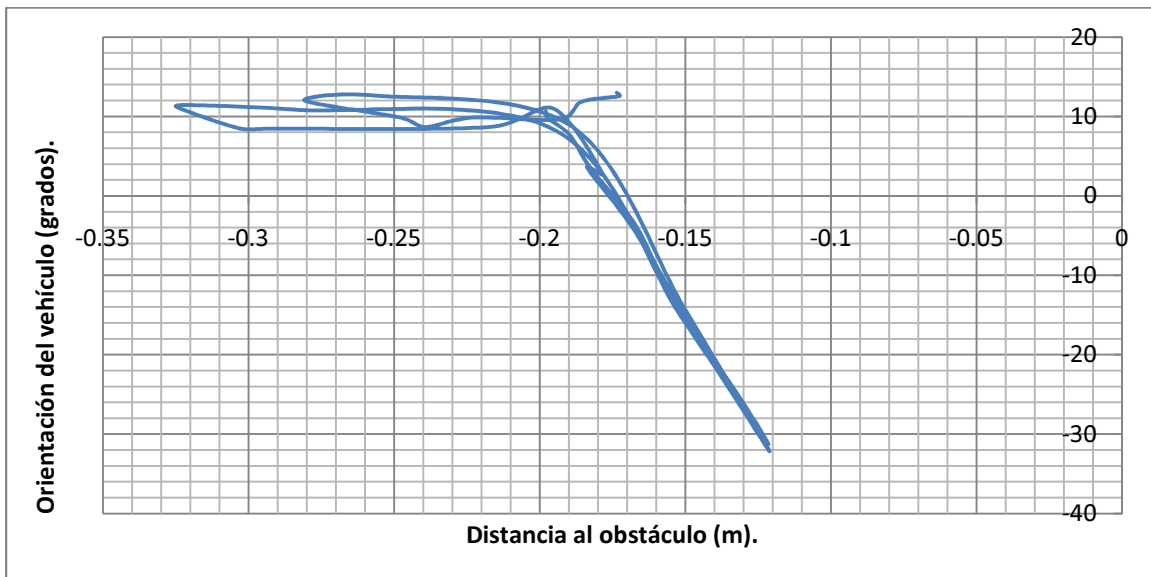


Gráfica 16. Reducción de la velocidad en la evasión frontal a una velocidad de entrada de 81 m/s.

En la evasión lateral, mostrada en la Figura 52, se realizó la prueba con un ángulo de orientación del vehículo de 10° dirigidos a lo largo de una pared y a una velocidad de 94 m/s. La Ecuación 6.18 muestra un valor de 0.0788 metros para el valor del límite para la velocidad de 94 m/s. La Gráfica 17 muestra que el valor del límite es de 0.12 metros, teniendo un error de 0.0412 metros en el límite. La Ecuación 6.19 indica que el valor de la línea de influencia lateral debe de ser de 0.1938 metros a 94 m/s, la gráfica muestra un valor de 0.28 metros, teniendo un error de 0.0862 metros.



Figura 52. Experimentación en la evasión lateral.

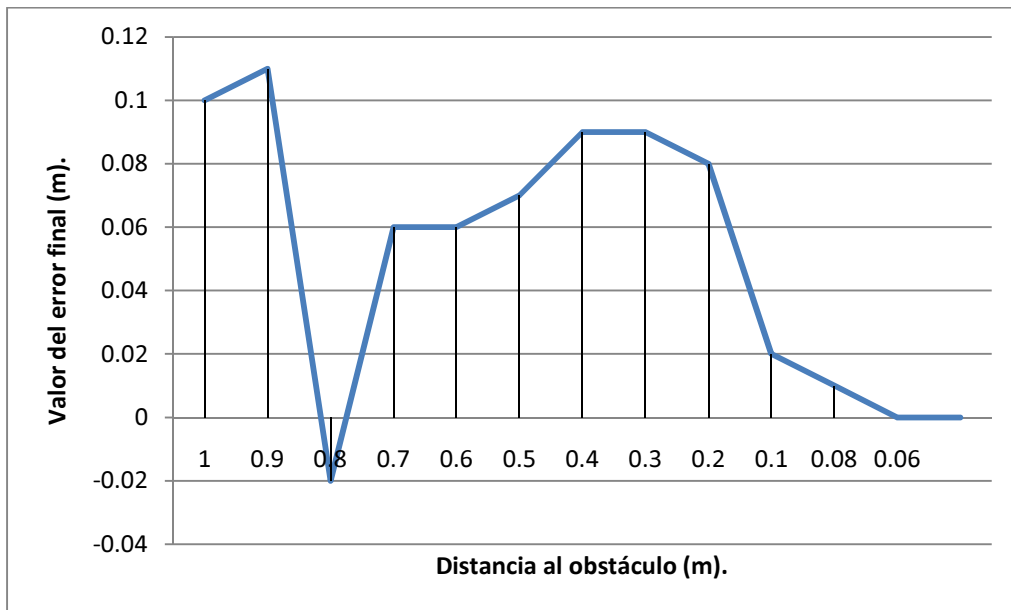


Gráfica 17. Variación de la orientación del vehículo en la evasión lateral a 10° de orientación del vehículo.

Los errores debidos a la medición de la distancia real al obstáculo, con los registrados por el sensor en el microcontrolador se calculan restando la distancia real con la del sensor. El error es producido por el modelado por secciones del sensor. El error final de los sensores fue obtenido posicionando al vehículo manualmente, tanto lateral como frontalmente, a una distancia conocida a un obstáculo a lo largo de una cinta métrica teniendo como límites de las pruebas los radios de alcance de los sensores, Figura 53. La Gráfica 18 muestra el error final del sensor SHARP GP2Y0A21YK0F a lo largo de su radio de alcance. Este sensor se utilizó para la evasión lateral.

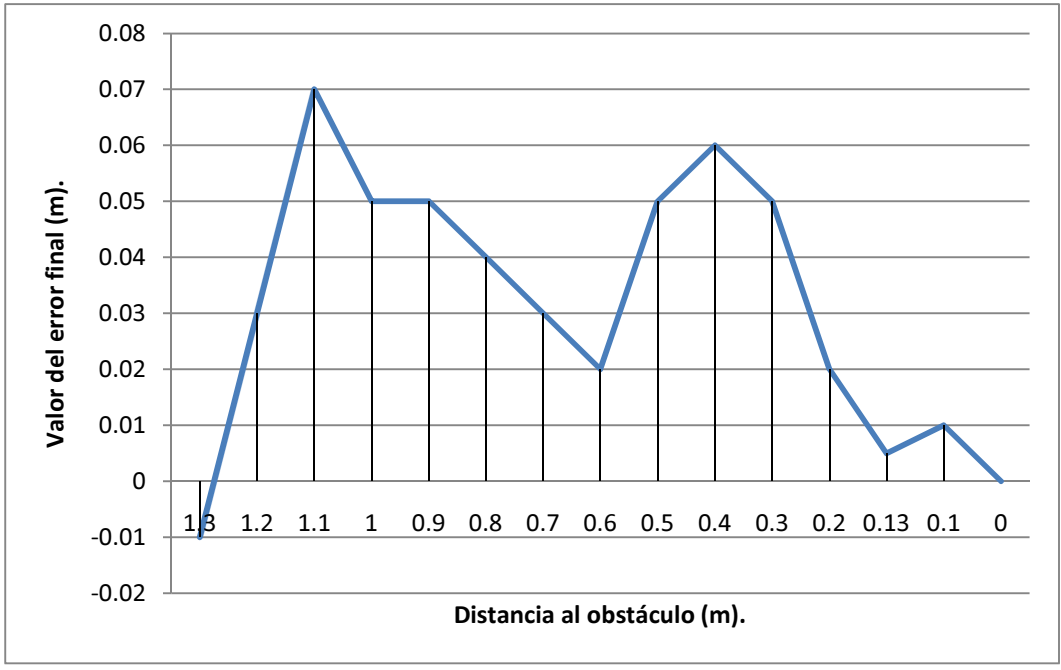


Figura 53. Obtención de los errores finales.



Gráfica 18. Error final del sensor SHARP GP2Y0A21YK0F a lo largo de su radio de alcance.

La Gráfica 19 muestra el error final del sensor SHARP GP2Y0A02YK0F a lo largo de su radio de alcance. Este sensor se utilizó para la evasión frontal.



Gráfica 19. Error final del sensor SHARP GP2Y0A02YK0F a lo largo de su radio de alcance.

7. CONCLUSIONES.

Los sistemas de dirección y de tracción son los sistemas necesarios para controlar cualquier vehículo, ya que ambos proporcionan la velocidad y la orientación. El sistema de dirección depende totalmente de la geometría del vehículo, esto es, de la distancia entre ejes l y del ancho entre ruedas d . Si $l > d$, las ruedas de dirección tienden a ser paralelas, si $l < d$, la rueda interior girará más grados rápidamente que si $l = d$. Si aumentamos la distancia entre ejes d , la diferencia de velocidades entre las ruedas de tracción aumentará. El radio de dirección de los vehículos aumenta si $l > d$ y disminuye si $l < d$. Para controlar la dirección de un vehículo, se recomienda la implementación de una rueda virtual, para que en base a esta se orienten las ruedas de dirección. No es recomendable controlar la orientación de un vehículo en función de alguna rueda de dirección.

Se implementaron en el sistema *Steer By Wire* las ecuaciones Ackerman desplazando la rueda virtual en función de la velocidad, acción que no se había realizado en ninguna investigación. Al desplazar la rueda virtual, se logró modificar el radio de dirección del vehículo piloto de 1:0.633 a 1:0.88.

Las ecuaciones de González-Villela abarcan todas las posibilidades del control de la dirección de cualquier vehículo. Únicamente se analizaron las ecuaciones referentes a la orientación del vehículo.

Por otro lado, se pueden reemplazar los potenciómetros utilizados para medir la posición del volante y del acelerador por encoders. Estos dispositivos son ópticos, con los cuales se tiene menor ruido en la señal de salida y una mejor exactitud. Además en los encoders al no haber contactos físicos, se deterioran menos.

Generalmente, los sistemas *Steer By Wire* implementados en las investigaciones publicadas, contienen únicamente un solo actuador, y el control entre el volante y ese actuador es un control PID la mayoría de las veces. Cuando se tienen dos actuadores, como en este trabajo, se deben de tener dos controles PID en lugar de uno, haciendo más interesante su implementación. El sistema *Steer By Wire* debe de cumplir con la función de orientar las ruedas de dirección paralelas al eje longitudinal del vehículo al soltar el volante y al mismo tiempo el volante debe de regresar a su posición vertical de forma automática.

No es imperativo que el volante deba girar varias vueltas para conseguir que las ruedas de dirección giren de un extremo a otro. Todas esas vueltas eran necesarias en los sistemas de dirección mecánicos sólo para amplificar el torque en las ruedas de dirección. Sin embargo, con los sistemas *Steer By Wire*, como el torque necesario es proporcionado por los actuadores eléctricos y no por el conductor, la cantidad de vueltas del volante queda a disposición del diseñador. Para este trabajo, las ruedas de dirección alcanzan sus extremos con sólo $\frac{1}{4}$ de vuelta hacia la izquierda y $\frac{1}{4}$ de vuelta hacia la derecha del volante. Resultando en mayor comodidad para el conductor. Las ruedas de dirección son capaces de girar 90° hacia cada lado a velocidades muy bajas. Se implementó en el sistema *Steer By Wire* que al momento de que el volante sobrepase los 10° hacia cualquier sentido se accione automáticamente la direccional correspondiente, esto en caso de que el conductor no la haya accionado previamente.

El controlar el torque en los motores eléctricos es complicado, por lo cual en este proyecto se trabajó únicamente con la cinemática del vehículo piloto y con el control de las velocidades de los motores eléctricos.

El modelado por secciones en sensores es muy práctico, sin embargo se induce un error considerable, este error disminuye si se aumenta el número de secciones. El error en la medición de la distancia de los sensores utilizados variaba entre 0.001 y 0.11 metros. El error se reduce en el comienzo y final de las secciones.

El sistema de evasión de colisiones trabajó con gran desempeño. Se lograron los tres tipos de evasión colisiones arriba mencionados. En la colisión frontal, el vehículo comenzaba a reducir su velocidad a la distancia señalada por la línea de influencia y se detenía en el límite. Se hicieron pruebas variando la velocidad, logrando con esto, la variación de la línea de influencia, el límite permanecía constante debido a la actualización de su valor con respecto a la velocidad del vehículo. En el área de proporcionalidad, aún cerca del límite, al soltarse el acelerador el vehículo se detenía por completo, esto es gracias al desarrollo del algoritmo que trabajaba el sistema de evasión con los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive*

simultáneamente, teniendo con esto un vehículo semiautónomo. Se lograron evadir las colisiones por ambos lados orientando al vehículo al lado opuesto. No se implementó la opción de reducir la velocidad en la evasión lateral.

El desarrollo de este prototipo de vehículo semiautónomo, queda como base para un futuro mejoramiento de los sistemas *Steer By Wire*, *Differential Drive* y del sistema de evasión de colisiones, o para su futura implementación en vehículos comerciales.

Trabajo futuro.

El modelado de los sistemas de dirección y de tracción se realizó a partir de la cinemática, por lo tanto se controló la posición y la velocidad de los motores eléctricos respectivamente, quedando como trabajo futuro el modelado usando la dinámica del vehículo y el control del torque necesario en los motores en base a esta dinámica. Esto sería el primer paso si se quisiera comenzar a implementar los sistemas *Steer By Wire* y *Differential Drive* en automóviles comerciales en México. Por el lado de la electrónica, se pueden mejorar las señales eléctricas colocando filtros en las salidas de los sensores, para tener el menor ruido posible en las señales, transfiriéndose los datos con mejor exactitud.

La respuesta en los sistemas de evasión de colisiones, *Steer By Wire* y *Differential Drive* es lenta. En el sistema *Steer By Wire* cuando se mueve el volante una cantidad considerable hacia cualquier lado, los motores de las ruedas direccionables del vehículo siguen los comandos del volante con un retraso de tiempo tardando en llegar a su posición final. La principal razón es la respuesta misma de los motores y la gran cantidad de líneas de programación en el microcontrolador. Una posible solución es tener un microcontrolador por cada sistema y un microcontrolador maestro que gobierne a los demás microcontroladores. Con esto se logra que cada sistema tenga su propio microcontrolador y sus propias líneas de programación, sin tener líneas ajenas al sistema, aumentando la velocidad de procesamiento de los microcontroladores, eficientando la respuesta del vehículo semiautónomo en general.

La mayoría de las empresas de automóviles tienen vehículos prototipo con sistemas *Drive By Wire*, pero no se han implementado en automóviles comerciales debido a que la seguridad es más crítica en estos sistemas, por lo cual están trabajando para tener varios sistemas de seguridad. En este aspecto, el trabajo futuro para este proyecto sería el desarrollo de sistemas de seguridad para cada sistema del vehículo.

En el sistema de evasión de colisiones, el legislamiento en cuanto a seguridad es menos estricto, debido a que no es un sistema principal del automóvil. Mercedes Benz ya ha estado incorporando estos sistemas en sus automóviles de línea, incorporando solamente la evasión de colisión frontal, que es una implementación relativamente sencilla ya que sus automóviles cuentan con sistemas de frenos ABS, que son sistemas mecatrónicos, facilitando el frenado evadiendo la colisión. La implementación de la evasión de colisión lateral se ha retardado, debido a que se necesita primero contar un sistema *Steer By Wire* instalado, tomando temas de seguridad mencionados anteriormente.

Referencias.

Sección 1.

- 1) Spark I. J. and Ibrahim M. Yousef. Integrated Mechatronics Solution to Maximise Tractability and Efficiency of Wheeled Vehicles. 2001 IEEUASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings. 8-12 July 2001 Como, Italy.
- 2) Doriben Hans Theo, Klaus D. urkopp. Mechatronics and drive-by-wire systems advanced non-contacting position sensors. Automotive Electronics 2, EE-5, Powertrain Control, Hella KG Hueck and Company, Rixbecker Strasse 75, 59552 Lippstadt, Germany. Received 19 October 2001; accepted 16 July 2002.
- 3) Kelber Christian R., Webber Daniel, Klein Gomes Guilhenne, Mauricio A. Lohmann, Marcelo S. Rodrigues, Danton Ledur. Active Steering Unit with integrated ACC for X-by-Wire vehicles using a joystick as H.M.I. 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium University of Parma, Parma, Italy June 14-17, 2004.
- 4) Bertoluzzo Manuele, Buja Giuseppe, Fellow, IEEE and Alberto Zuccollo. "Development and Testing of a Communication Network for a Drive-by-Wire Industrial Vehicle". 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN).
- 5) Yih Paul and Gerdes J. Christian. Modification of Vehicle Handling Characteristics via Steer-by-Wire. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 13, NO. 6, NOVEMBER 2005.
- 6) Brown Jared W., R. K. MacLean, Shad Laws, Chris Gadda and J. Christian Gerdes. Experimental Vehicle Handling Modification through Steer-by-Wire and Differential Drive. Dept. of Mechanical Engineering. Proceedings of the 2007 American Control Conference Marriott Marquis Hotel at Times Square New York City, USA, July 11-13, 2007.
- 7) Gadda Christopher D., Shad M. Laws, and J. Christian Gerdes. Generating Diagnostic Residuals for Steer-by-Wire Vehicles. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 15, NO. 3, MAY 2007.
- 8) Messaoudène K., N. Ait Oufroukh, and S. Mammar. Innovative Brake Handwheel Concept for Paraplegic Drivers. IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 59, NO. 7, SEPTEMBER 2010.

Sección 2.

- 1) Ellinger Herbert E., Hathaway Richard B. Automotive suspension, steering and brakes. Prentice Hall pp 226-227, 1980.
- 2) Giles J. G., Ph.D., B.Sc.(Eng.), C.Eng., M.I.Mech.E., A.M.I.E.E. Steering, suspension and tyres. Automotive technology series. Volume 1. Liffé Books Ltd, pp 125-126, 1968.
- 3) Edzko G. Smid & Cheok Ka C. Unified Intelligent Motion Planning for Omni-Directional Vehicles. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. University of Parma. Parma, Italy June 14-17, 2004.
- 4) Yao Kai, WANG Youjun, HOU Zhongming, ZHAO Xiaowen. Optimum Design and Calculation of Ackerman Steering Trapezium. International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2008.
- 5) Hou Zhongming; YAO Kai; WANG Shengjun; XIN Tao; GAO Yong. Optimum Design of Ackerman Steering Trapezium Based on ADAMS. Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2009.
- 6) Bing Zhou, Dongsheng LI, Fan YANG. Optimization Design of Steering Linkage in Independent Suspension Based on Genetic Algorithm. IEEE 2009.

7) González Villela Víctor, Guadarrama Liho Jaqueline. Consideraciones Básicas en el Diseño de un Vehículo de Guía Automática con Diferencial Eléctrico. Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, UNAM, julio 1997.

8) Spark I. J. and Ibrahim M. Yousef. Integrated Mechatronics Solution to Maximise Tractability and Efficiency of Wheeled Vehicles. 2001 IEEUASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings. 8-12 July 2001 Como, Italy.

9) Min Wan Choi, Jun Seok Park, Bong Soo Lee and Man Hyung Lee. The performance of independent wheels steering vehicle (4WS) applied Ackerman geometry. International Conference on Control, Automation and Systems 2008. Oct. 14-17, 2008 in COEX, Seoul, Korea.

10) Mu Chunyan Yu, Jingnuo Yang, Yuyan Wu Kai. Design for Dual-front Axle Steering Angle of the Heavy Truck. Key Lab of Advanced Manufacturing & Automation Technology. Ludong University, P.O. Box 264025, Yantai Shandong Province, China. International Conference on Educational and Network Technology 2010.

Sección 3.

1) Doriben Hans Theo, Klaus D. urkopp. Mechatronics and drive-by-wire systems advanced non-contacting position sensors. Automotive Electronics 2, EE-5, Powertrain Control, Hella KG Hueck and Company, Rixbecker Strasse 75, 59552 Lippstadt, Germany. Received 19 October 2001; accepted 16 July 2002.

2) Bertoluzzo Manuele, Buja Giuseppe, Fellow, IEEE and Alberto Zuccollo. "Development and Testing of a Communication Network for a Drive-by-Wire Industrial Vehicle". 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN).

3) Geng Shu-fang, Wang Li-fang. Strategies to Improve Steering Handling Performance for Steer-By-Wire System. International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering 2010. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science Beijing, PR China 100190.

4) Lei-yan Yu, Ping-li Yun. Motor Motion Control of Automobile Steer-By-Wire System in Electric Vehicles. College of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, DongYing, China. 2009.

5) M. Bertoluzzo. P. Bolognesi, Member. IEEE, O. Bruno-, G. Buja', Fellow.. IEEE, A. LandF, Member. IEEE and A. Zuccollo', Member. IEEE. Drive-by-Wire Systems for Ground Vehicles. Department of Electrical Engineering - University of Padova - Via Gradenigo 6/a. 35131 Padova - Italy. email: p.bolognesiaieee.org, 2004.

6) Brown Jared W., R. K. MacLean, Shad Laws, Chris Gadda and J. Christian Gerdes. Experimental Vehicle Handling Modification through Steer-by-Wire and Differential Drive. Dept. of Mechanical Engineering. Proceedings of the 2007 American Control Conference Marriott Marquis Hotel at Times Square New York City, USA, July 11-13, 2007.

Sección 4.

1) Cameron Stephen. Obstacle Avoidance and Path Planning. Industrial Robot, Vol. 21 No. 5, 1994, pp. 9-14, © MCB University Press, 0143-991X.

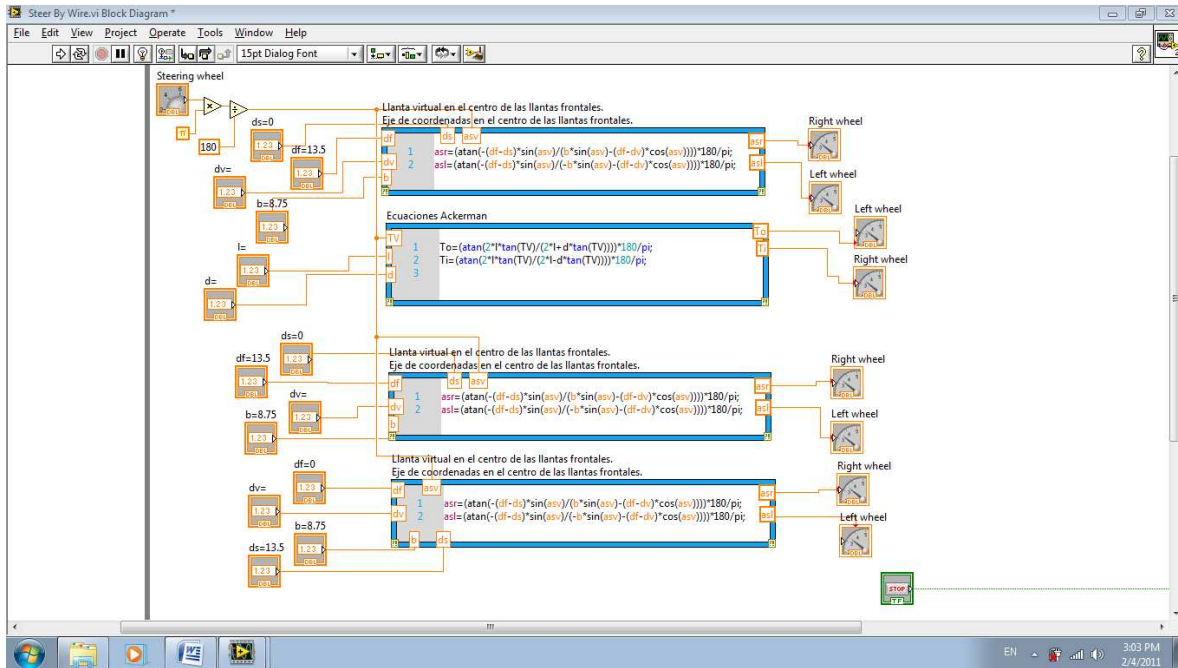
Sección 6.

1) González Villela, V.J. Research on a semiautonomous mobile robot for loosely structured environments focused on transporting mail trolleys. Thesis (Ph.D.) Loughborough University, Department of Mechanical Engineering, 2006.

2) Szczepaniak, C., Aragón, R. Fundamentos de Diseño del Automóvil. Ed. CECSA, México, 1982.

3) Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna, Segunda Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, Mexico, 1993.

Apéndice A. Diagrama de bloques de las ecuaciones Ackerman y de las ecuaciones obtenidas por González-Villela.



Apéndice B. Programa en C para el desarrollo de los sistemas *Steer By Wire*, *Differential Drive* y evasión de colisiones para un microcontrolador Arduino Mega.

```
#include <Servo.h>

//SBW
Servo servo1;
Servo servo2;
const int ledleft = 31;
const int ledright = 33;

float x;
float val;
float TO;
float TI;
float TO1;
float TI1;
float TV;
float TV1;
float TVA;
int d=17.5;
int l=13.5;
float TVC;
float dis1;
float dis2;
float lim1;
float k1;

//DT
```



```

int pot1=0;
int valp;
float r;
float v1;
float v2;
float w;
float lim;
float k;
float dis;

void setup() {
//SBW
servo1.attach(3);
servo2.attach(2);
pinMode(ledleft, OUTPUT);
pinMode(ledright, OUTPUT);
//DT
Serial.begin(9600);
}

void loop() {

//DT
valp=analogRead(pot1);
valp=map(valp, 190, 730, 0, 250);
Serial.print("acelerador = ");
Serial.print(valp);

//Avoiding DT
float v=analogRead(2);
v=(v/1023)*5;

lim=0.04*valp+10; k=0.04*valp+35;
if (v<0.03)
{dis=200;}
if (v>=0.03 && v <0.96)
{dis=-75.268*v+132.257;}
if (v>=0.96 && v<2.66)
{dis=-27.647*v+86.541;}
if (v>=2.65)
{dis=0;}

Serial.print(" distancia front = ");
Serial.print(dis);

if (dis<lim)
{valp=0;}
if (dis>k)
{valp=valp;}
else
{valp=valp*(dis/(k-lim)-(lim/(k-lim)));}

Serial.print(" vel lineal = ");
Serial.print(valp);

r=1/tan(TV1*3.1415927/180);

```

```

w=valp/r;
v1=w*(r-(d/2));
v2=w*(r+(d/2));

analogWrite(4,v1);
analogWrite(5,v2);

//SBW
float val=analogRead(1);
TVA=(val/1023)*5;
TV=0.7075*TVA-1.7264;
TV1=TV*180/3.1415927;

Serial.print(" volante = " );
Serial.print(TV1);

//Avoiding SBW Left
float z=analogRead(3);
z=(z/1023)*5;

lim1=0.02*valp+6; k1=0.02*valp+17.5;
if (z<=0.053)
  {dis1=150;}
if (z>0.053 && z<=1.297)
  {dis1=-56.27*z+92.982;}
if (z>1.297 && z<=2.363)
  {dis1=-9.38*z+32.165;}
if (z>2.363 && z<=3.083)
  {dis1=-5.55*z+23.114;}
if (z>3.083)
  {dis1=0;}

Serial.print(" distancia left = " );
Serial.print(dis1);

if (dis1>k1)
  {TV1=TV1;}
else
  {if (dis1<lim1)
  {TV1=50;}
  else
  {TVC=-50*dis1/(k1-lim1)+50*k1/(k1-lim1);
  if (TV1>TVC)
  {TV1=TV1;}
  else
  {TV1=TVC;}
  }
  }

//Avoiding SBW Right
float j=analogRead(4);
j=(j/1023)*5;

if (j<=0.053)
  {dis2=150;}
if (j>0.053 && j<=1.297)

```

```

    {dis2=-56.27*j+92.982;}
    if (j>1.297 && j<=2.363)
    {dis2=-9.38*j+32.165;}
    if (j>2.363 && j<=3.083)
    {dis2=-5.55*j+23.114;}
    if (j>3.083)
    {dis2=0;}

    Serial.print(" distancia right = " );
    Serial.print(dis2);

if (dis2>k1)
    {TV1=TV1;}
else
    {if (dis2<lim1)
    {TV1=-50;}
    else
    {TVC=50*dis2/(k1-lim1)-50*k1/(k1-lim1);
    if (TV1<TVC)
    {TV1=TV1;}
    else
    {TV1=TVC;}
    }
}

Serial.print(" orientacion = " );
Serial.println(TV1);
if (TV1<-10)
    digitalWrite(ledleft,HIGH);
if (TV1>10)
    digitalWrite(ledright,HIGH);

x=-0.27/250*valp;

TO1=(atan(2*I*tan(TV1*3.1415927/180)/(2*(1-x)+d*tan(TV1*3.1415927/180))))*180/3.1415927;
TI1=(atan(2*I*tan(TV1*3.1415927/180)/(2*(1-x)-d*tan(TV1*3.1415927/180))))*180/3.1415927;

    TO = TO1+90-5; //los 90 son para posicionar a los servos longitudinalmente al vehículo, y los 5 son para
ajuste mecánico.
    TI = TI1+90+5;

    servo1.write(TO);
    servo2.write(TI);

    digitalWrite(ledleft,LOW);
    digitalWrite(ledright,LOW);

    delay(50);
}

```