



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE ESTRATEGIA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS PARA  
MODELO DINÁMICO DE VEHÍCULO AUTÓNOMO  
DESARROLLADO EN AMBIENTE MATLAB®-SIMULINK**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
ELECTRICISTA**

**ALEXIS DANIEL ACUÑA ARANCIBIA**

PROFESOR GUÍA:

MARCOS EDUARDO ORCHARD CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

HÉCTOR MILER AGUSTO ALEGRÍA

PAUL ALBERT VALLEJOS SÁNCHEZ

SANTIAGO DE CHILE

NOVIEMBRE 2012

*Dedicada a mis padres  
Eugenio y Adriana*

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA.  
POR: ALEXIS DANIEL ACUÑA ARANCIBIA  
FECHA: NOVIEMBRE 2012  
PROF.GUÍA: MARCOS ORCHARD

## “DISEÑO DE ESTRATEGIA DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS PARA MODELO DINÁMICO DE VEHÍCULO AUTÓNOMO DESARROLLADO EN AMBIENTE MATLAB®-SIMULINK”

La presente Memoria de Título se centra en el diseño de una estrategia de control difuso, tipo Mamdani, para evasión de obstáculos presentes en ruta de un Vehículo terrestre Guiado Autónomamente (AGV, por sus siglas en inglés), y la consiguiente verificación del enfoque propuesto para el caso en que la operación del vehículo se simula a través de un modelo dinámico en ambiente MATLAB®- Simulink (el cuál a su vez emula un automóvil Volkswagen® modelo Tiguan, año 2010). Este trabajo se enmarca dentro de uno de los proyectos interdisciplinarios del área de Automatización y Robótica del Centro Avanzado de Tecnología para Minería, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que busca el desarrollo de un AGV capaz de operar en ambientes similares a los encontrados en faenas a rajo abierto de la minería.

Con este fin, se estudia en detalle las variables dinámicas que definen el comportamiento de un móvil en el plano a través de un modelo tipo “bicicleta”, al cual se integran características propias del automóvil que se desea simular: retardos, zonas muertas y limitadores de pendientes propios de los actuadores del AGV. La incorporación de los elementos mencionados al modelo creado permiten lograr resultados satisfactorios, generando rutas coherentes en su comportamiento y llegando a un error cuadrático medio entre la velocidad real del vehículo y la adquirida por el modelo en simulación no superior a un 4,6%.

Para la implementación de la estrategia difusa de control de evasión de obstáculos se establece un controlador supervisor de ruta, que permite guiar al vehículo en caso de no detectarse un obstáculo. Dicho controlador es capaz de garantizar que el vehículo se mantenga en su carril; mostrando un error de seguimiento que no supera los 50 [cm] y caracterizado por una longitud de oscilación de aproximadamente 500 [m] en un periodo de 1 minuto, a una velocidad constante de 30 [Km/h]. Por otra parte, para efectos de la detección de un obstáculo en ruta de colisión, se implementa una estrategia que caracteriza el área frente del vehículo en tres zonas (central y laterales), para con ello determinar la ruta ideal a seguir, considerando al obstáculo como una función de probabilidad Gaussiana bivaluada, de medias y desviación estándar conocidas.

Finalmente se presenta el diseño e implementación definitivos para el controlador propuesto, el cual es capaz de evadir obstáculos en ruta de colisión, manipulando el ángulo del volante y la velocidad del vehículo. Los resultados obtenidos al aplicar la lógica difusa de tipo Mamdani fueron satisfactorios, al permitir la evasión de obstáculos con una probabilidad mayor al 99,9%. Todo esto inmerso en un efectivo protocolo de seguridad que garantiza que el AGV no colisionará con un vehículo antecesor que frene intempestivamente o con obstáculos imposibles de evadir. Junto con lo anterior se minimiza la probabilidad de vuelco o derrape del vehículo a través de una disminución de la aceleración lateral gracias a una reducción planificada de su velocidad longitudinal.

## AGRADECIMIENTOS

El primer agradecimiento es a mis padres, quienes toda mi vida me han dado un amor incondicional apoyándome en todos los desafíos que he tomado, y ayudándome a levantarme cuando ha sido necesario, estando siempre cuando ha sido necesario. A ellos dedico este trabajo como muestra de lo agradecido que estoy de todo lo que me dieron para poder conseguir el primer gran logro de mi vida. Además agradezco enormemente a mis hermanos, Verónica y Rodrigo, quienes al igual que mis padres me han apoyado y entregado amor que siempre agradeceré.

También agradezco al Profesor Marcos Orchard quien me dio la posibilidad de desarrollar múltiples trabajos de investigación, emitir publicaciones y exponerlas a lo largo de mi carrera, brindándome ayuda y orientación con la mejor disposición en todo momento.

Agradezco enormemente a mis amigos, quienes me han acompañado y brindado ayuda en todo lo que conlleva este largo proceso. Por último, pero no menos importa, a mi gran amiga y compañera incondicional, María Jesús, por todo lo que me ha brindado y permitido vivir con ella durante esta etapa de mi vida.

# TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN DE LA MEMORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TABLA DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    MOTIVACIÓN.....	1
1.2    OBJETIVOS Y ALCANCES .....	2
1.2.1    Objetivos Generales .....	2
1.2.2    Objetivos Específicos.....	2
1.2.3    Alcances.....	2
1.3    ESTRUCTURA GENERAL .....	3
Capítulo 2. ANTECEDENTES DE VEHÍCULOS GUIADOS AUTÓNOMAMENTE .....	4
2.1    ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS GUIADOS AUTÓNOMAMENTE.....	4
2.1.1    Estado del Arte Internacional.....	4
2.1.1.1    DARPA Urban Challenge .....	4
2.1.1.2    Camiones para la Minería Komatsu .....	5
2.1.2    Estado del Arte en Chile.....	6
2.2    MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO TERRESTRE.....	7
2.3    LÓGICA DIFUSA.....	10
2.4    EVASIÓN DE OBSTÁCULOS .....	17
2.5    COMENTARIOS .....	20
Capítulo 3. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DINÁMICO Y DISEÑO DE CONTROLADOR DIFUSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS .....	21
3.1    CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO BICICLETA.....	22
3.1.1    Diseño de Pedales.....	22
3.1.1.1    Acelerador .....	22
3.1.1.2    Freno .....	24
3.1.2    Datos Empleados.....	25
3.1.3    Implementación en Ambiente de Simulink-MATLAB®.....	25
3.1.3.1    Descripción de Bloques.....	27

3.1.3.2	Implementación de Actuadores .....	32
3.2	CONTROL DE DIRECCIÓN Y VELOCIDAD .....	36
3.2.1	Estructura del Sistema de Control .....	37
3.2.2	Controlador Difuso de Velocidad.....	37
3.2.3	Controlador Difuso de Dirección. ....	39
3.3	CONTROL SUPERVISOR DE RUTA DEL VEHÍCULO.....	41
3.3.1	Diseño de la Estrategia de Control .....	41
3.3.2	Implementación del Control Supervisor.....	45
3.4	DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS .....	49
3.5	ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS EN RUTA DE COLISIÓN .....	54
3.5.1	Diseño de Modulo Evasor de Obstáculos.....	54
3.5.2	Diseño de Módulo de Distancia Relativa .....	57
3.5.3	Diseño de Módulo de Reducción de Velocidad .....	59
3.5.4	Diseño de Módulo de Prevención de Vuelco .....	62
3.5.5	Selección de Reducción de Velocidad y Ángulo Aplicado al Volante para la Evasión de Obstáculos.....	65
3.5.6	Contingencias: Alarma y Parada de Emergencia .....	67
3.5.7	Implementación del Control Difuso para la Evasión de Obstáculos .....	69
3.6	COMENTARIOS .....	74
Capítulo 4.	RESULTADOS OBTENIDOS.....	76
4.1	VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO TIPO BICICLETA .....	76
4.2	EVASIÓN de OBSTÁCULOS.....	79
4.3	PREVENCIÓN DE VUELCO Y ALARMA DE SEGURIDAD .....	86
4.4	PARADA DE EMERGENCIA. ....	89
4.5	COMENTARIOS .....	90
Capítulo 5.	CONCLUSIONES.....	92
5.1	TRABAJOS FUTUROS.....	94
REFERENCIAS	.....	96
ANEXO A	.....	99
ANEXO B	.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: DARPA Urban Challenge[4].....	5
Figura 2-2: Modelo Tipo "Bicicleta": Fuerzas Presentes en el Modelo .....	7
Figura 2-3: Modelo Tipo "Bicicleta": Ángulos de Dirección del Modelo .....	8
Figura 2-4: Sumatoria de Fuerzas transversales al movimiento del Vehículo .....	8
Figura 2-5: Sumatoria de Torques del vehículo .....	9
Figura 2-6: Sumatoria de Fuerzas Longitudinales al Movimiento del Vehículo. ....	9
Figura 2-7: Conjuntos Difusos .....	11
Figura 2-8: Función de Pertenencia .....	11
Figura 2-9: Arquitectura de un Controlador Difuso.....	12
Figura 2-10: Resumen Sistema Difuso Mamdani[23].....	13
Figura 2-11: Fusificación .....	14
Figura 2-12: Defusificación .....	14
Figura 2-13: Obtención de Pesos .....	14
Figura 2-14: Evaluación de Reglas .....	15
Figura 2-15: Defusificación .....	15
Figura 2-16: Respuesta al escalón de control PD-Difuso.....	16
Figura 2-17: Pendiente de Señal.....	16
Figura 2-18: Diagrama de bloques de la conformacion de un evasor de obstaculo. ....	18
Figura 2-19: Sensores en AGV [25] [23] [22]. ....	19
Figura 2-20: Protocolo de Navegacion para Evasión de Obstaculos [30].....	19
Figura 3-1: Diagrama de Módulos .....	21
Figura 3-2: Aceleración Rápida en Modo "Sport" .....	23
Figura 3-3: Aceleración Lenta en Modo "Sport" .....	23
Figura 3-4: Aceleración Rápida en Modo "Normal" .....	23
Figura 3-5: Aceleración Lenta en Modo " Normal" .....	24
Figura 3-6: Dimensiones de Volkswagen® Tiguan, entregadas por el fabricante .....	25
Figura 3-7: Modelo Dinámico del Automóvil VolksWagen Tiguan.....	26
Figura 3-8: Volante, Ángulo de Giro .....	26
Figura 3-9: Interior del Bloque del Modelo Dinámico Tipo Bicicleta del Automóvil Volkswagen Tiguan	27
Figura 3-10: Bloque de Dirección.....	28
Figura 3-11: Fuerza Perpendicular al eje delantero.....	28
Figura 3-12: Fuerza perpendicular al eje trasero.....	28
Figura 3-13: Fuerza de Roce Aerodinámico .....	29
Figura 3-14: Velocidad del Centro de Masa .....	29
Figura 3-15: Torque del Vehículo.....	30
Figura 3-16: Radio de Giro .....	31
Figura 3-17: Parametros del Modelo Dinámico.....	32
Figura 3-18: Volante .....	32
Figura 3-19: Pedales.....	33
Figura 3-20: Conducción Variada, Modo Sport.....	34
Figura 3-21: Conducción Variada, Modo Normal .....	34
Figura 3-22: Caja de Cambios.....	34

Figura 3-23: Acelerador- $F_x$ .....	35
Figura 3-24: Acelerador .....	35
Figura 3-25: Freno.....	36
Figura 3-26: Estructura del Sistema de Control[38] .....	37
Figura 3-27: Funciones de Pertenencia del Controlador Difuso de Velocidad[38]. .....	38
Figura 3-28: Funciones de Pertenencia de Controlador Difuso de Dirección [34]. .....	40
Figura 3-29: Control Supervisor .....	42
Figura 3-30: Obtención de Módulo de $\alpha$ y Signo .....	43
Figura 3-31: Obtención de Ángulo $\beta$ .....	44
Figura 3-32: Bloque $\alpha$ .....	44
Figura 3-33: Error de Convergencia, Control Sin Ganancia .....	45
Figura 3-34; Ruta Sin Control de Ganancia (toma de muestra cada 10 segundos).....	45
Figura 3-35: Volante Controlado Sin Ganancia.....	46
Figura 3-36: Volante Control Supervisor con Ganancia. ....	46
Figura 3-37: Error del Control Supervisor con Ganancia .....	47
Figura 3-38: Ruta Controlada con Ganancia.....	48
Figura 3-39: Control Supervisor de Ruta .....	49
Figura 3-40: Parámetros del Control Supervisor de Ruta .....	49
Figura 3-41: Representación Grafica del Sensor Virtual. ....	50
Figura 3-42: Función de Distribución Gaussiana bivariada.....	51
Figura 3-43: Suma de Funciones de Distribución Gaussiana.....	51
Figura 3-44: Función de Distribución Gaussiana.....	51
Figura 3-45: Objeto Detectado al Centro y Derecha del Vehículo .....	52
Figura 3-46: Bloque de Parámetros del Sensor .....	53
Figura 3-47: Protocolo de Evasión de Obstáculos .....	54
Figura 3-48: INPUT Evasión de Obstáculos: Distancia al Obstáculo [ $m$ ] .....	55
Figura 3-49: INPUT Evasión de Obstáculos: Cambio de distancia al obstáculo $m$ .....	55
Figura 3-50: OUTPUT Evasión de Obstáculos: Señal aplicada al ángulo del Volante. ....	56
Figura 3-51: INPUT Cercanía Relativa [ $m$ ] .....	57
Figura 3-52: OUTPUT Cercanía Relativa.....	58
Figura 3-53: INPUT Reduccion de Velocidad: Cercania Relativa .....	59
Figura 3-54: INPUT Reducción de Velocidad: Velocidad Real .....	60
Figura 3-55: INPUT Reducción de Velocidad: Variación de Velocidad .....	60
Figura 3-56: OUTPUT Reducción de Velocidad.....	61
Figura 3-57: INPUT Prevención de Vuelco: Aceleración Lateral. ....	63
Figura 3-58: INPUT Prevención de Vuelco: Cambio de aceleración Lateral .....	64
Figura 3-59: OUTPUT Prevención de Vuelco .....	64
Figura 3-60: Diagrama de Bloques de la Reducción de Velocidad.....	66
Figura 3-61: Función Sigmoidea.....	66
Figura 3-62: Manto de Soluciones de Modulo de “Cercanía Relativa” .....	69
Figura 3-63: Manto de Soluciones de Módulo de “Reducción de Velocidad” .....	70
Figura 3-64: Manto de Soluciones de Módulo de "Prevención de Vuelco" .....	70
Figura 3-65: Manto de Soluciones de Módulo de "Evasor de Obstáculos" .....	71
Figura 3-66: Diagrama de Bloques de la Función de Evasión de Obstáculos.....	72
Figura 3-67: Diagrama de Bloque del Control de Evasión de Obstáculos.....	73

Figura 3-68: Parámetros del Control de Evasión de Obstáculos .....	73
Figura 3-69: Diagrama de Bloques de la Simulación.....	74
Figura 4-1: Dibujo de Vehículo Virtual .....	76
Figura 4-2: Validación del Movimiento del Vehículo. ....	77
Figura 4-3: Validación del Acelerador.....	78
Figura 4-4: Ruta del Vehículo: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 0,3[m]$ .....	80
Figura 4-5: Señal de Sensor: Objeto a la Derecha de $\sigma = 0,3[m]$ .....	80
Figura 4-6: Ángulo Volante: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 0,3[m]$ .....	81
Figura 4-7: Velocidad del vehículo: Obstáculo a la Derecha $\sigma = 0,3[m]$ .....	81
Figura 4-8: Ruta del Vehículo: Obstáculo a la Izquierda de $\sigma = 1[m]$ .....	82
Figura 4-9: Señal de Sensor: Objeto a la Izquierda de $\sigma = 1[m]$ .....	83
Figura 4-10: Ángulo Volante: Obstáculo a la Izquierda de $\sigma = 1[m]$ .....	83
Figura 4-11: Velocidad del Vehículo: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 1[m]$ .....	84
Figura 4-12: Ruta del Vehículo: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 10[m]$ .....	84
Figura 4-13: Angulo Volante: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 10[m]$ .....	85
Figura 4-14: Velocidad del Vehículo: Obstáculo a la Derecha de $\sigma = 10[m]$ .....	85
Figura 4-15: Aceleración Lateral del Vehículo: a) $\sigma = 0,3 [m]$ , b) $\sigma = 1 [m]$ y c) $\sigma = 10 [m]$ .....	86
Figura 4-16: Ángulo Volante para Análisis de control de Prevención de vuelco. ....	87
Figura 4-17: Velocidad del Vehículo: Prueba de Control de Prevención de Vuelco .....	88
Figura 4-18: Señal de Presión Aplicada al Pedal de Freno Durante Actuacion de Control de Prevención de Vuelco .....	88
Figura 4-19: Ruta Generada por Centro de Masa de Vehículo, Prueba de Control de Prevención de Vuelco. ....	89
Figura 4-20: Aceleración Lateral, Prueba de Control de Prevención de Vuelco. ....	89
Figura 4-21: Vehículo en Ruta de Colisión.....	90
Figura 4-22: Sensor en Ruta de Colisión. ....	90
Figura A- 1: Diagrama de Bloque de Alarma por posibilidad de Vuelco .....	99
Figura A- 2: Diagrama de Bloque de Freno de Emergencia .....	99
Figura A- 3: Diagrama de Bloque de Módulo Evasor de Obstáculos .....	99
Figura A- 4: Diagrama de Bloque de Sensor .....	100
Figura A- 5: Diagrama de Bloque de sensor Central .....	100
Figura A- 6: Diagrama de Bloque de Sensor Lateral .....	100
Figura A- 7: Diagrama de Bloque Rango de Seguridad Central .....	101
Figura A- 8: Módulo de Selección de Ángulo de Volante .....	101
Figura A- 9: Diagrama de Bloque de Control Supervisor de Ruta.....	101
Figura A- 10: Variables Obtenidas de la Simulación.....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Base de Conocimiento .....	14
Tabla 2-2: Determinación de Zonas dado el signo del Error y el Cambio del Error.....	16
Tabla 2-3: Base de Reglas Control de Caudal.....	17
Tabla 3-1: Parámetros de Volkswagen® Tiguan .....	25
Tabla 3-2: Output modelo Dinámico del Vehículo.....	26
Tabla 3-3: Coeficientes de Roce entre Neumáticos de Caucho y diferentes Superficies.....	32
Tabla 3-4: Actuador Volante.....	33
Tabla 3-5: Actuador Pedal Acelerador.....	34
Tabla 3-6: Actuador, Freno.....	36
Tabla 3-7: Base de Reglas de Controlador Difuso de Velocidad [38] .....	39
Tabla 3-8: Mapa de reglas para el control difuso de Dirección [34].....	41
Tabla 3-9: Ganancias por Velocidad del Control Supervisor de Ruta.....	48
Tabla 3-10: Dispositivos empleados en la adquisición de datos de ruta.....	50
Tabla 3-11: Base de Conocimiento de Evasor de Obstáculo .....	56
Tabla 3-12: Base de Conocimiento de Cercanía Relativa.....	58
Tabla 3-13: Base de Reglas de Reducción de Velocidad.....	62
Tabla 3-14: Base de reglas del control Prevención de vuelco.....	65
Tabla 4-1: Validación de Acelerador .....	79

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 MOTIVACIÓN

El Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, por su sigla en inglés), perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, tiene por misión generar investigación multidisciplinaria de clase mundial, diseñar e implementar nuevas tecnologías, y formar capital humano de primer nivel, respondiendo a los desafíos que plantea la minería nacional. Es en este contexto que el área de Automatización y Robótica del AMTC ha focalizado sus esfuerzos en el desarrollo de tecnologías asociadas a la tele-operación y robotización de vehículos terrestres y maquinaria minera móvil. Siendo uno de sus proyectos emblemáticos la implementación de un prototipo de vehículo autónomo capaz de operar en ambientes similares a los encontrados en minas a rajo abierto, el cual pretende transformarse en una plataforma de validación de nuevas tecnologías y conceptos. Esta iniciativa, sin precedentes en Chile, conforma el paso previo a la automatización de otras máquinas que la industria requiere (camiones de transporte de mineral, palas mecánicas, vehículos de transporte de pasajeros), todo con el fin de aumentar la productividad y, por sobre todo, la seguridad de los trabajadores de la principal actividad económica del país.

Para llevar a cabo este ambicioso proyecto se decidió utilizar el automóvil modelo Tiguan, año 2010, de Volkswagen®, el cual fue intervenido con una serie de actuadores electrónicos y mecánicos, que permiten la interacción directa entre los controladores y el automóvil. Adicionalmente, es necesario construir un modelo dinámico del vehículo real, que permita probar y optimizar, de forma confiable y segura, las diversas estrategias de control que se implementan en él.

El presente trabajo busca, en primera instancia, diseñar e implementar de forma virtual dicho modelo dinámico, de forma de asegurar la entrega de las facilidades necesarias para el diseño, construcción, optimización y pruebas de todas las estrategias de control requeridas; en particular la calibración de parámetros del sistema de control de bajo nivel (o control de actuadores), evasión de obstáculos y control de alto nivel o control supervisor de ruta. Para ello se desarrolla dicho modelo, en ambiente de Simulink de MATLAB®, integrando la información real del vehículo y describiendo su potencialidad.

En segunda instancia, y basándose en una implementación para el control de bajo nivel en el modelo dinámico del vehículo antes descrito, se trabaja en el diseño, implementación y evaluación de una estrategia de control de evasión de obstáculos presentes en ruta, utilizando algoritmos basados en lógica difusa.

Adicionalmente, con el fin de realizar las pruebas antes descritas, se diseña e implementa un control supervisor de ruta del vehículo y un modelo de sensor que entregue la información requerida para lograr evadir obstáculos.

## **1.2 OBJETIVOS Y ALCANCES**

### **1.2.1 OBJETIVOS GENERALES**

El principal objetivo que persigue este trabajo de título es el diseño de una estrategia de control difuso para la evasión de obstáculos en ruta de colisión, el cual es implementado en un modelo dinámico de vehículo terrestre autónomo, en ambiente de MATLAB®-Simulink, que emula a un automóvil Volkswagen® modelo Tiguan, año 2010.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Con el fin de lograr el objetivo principal, se deben cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Obtener las ecuaciones que rigen el movimiento de un vehículo real.
  - Obtener las ecuaciones que rigen el movimiento de un cuerpo en el espacio.
  - Analizar en el movimiento los torques producidos por el derrape del vehículo.
- Implementar de actuadores reales del vehículo en el modelo dinámico.
  - Obtener datos reales del pedal acelerador del vehículo e implementarlos en el modelo dinámico.
  - Obtener datos del comportamiento del vehículo y considerar retardos, zonas muertas y límites de pendiente en los actuadores.
- Diseñar un control difuso para la evasión de obstáculos.
  - Analizar comportamiento del vehículo ante la variación del ángulo del volante.
  - Analizar el control de la velocidad para la evasión del obstáculo.
- Diseñar un criterio de seguridad ante contingencias en ruta.
  - Analizar la posibilidad de vuelco producto del giro a alta velocidad.
  - Estudiar la imposibilidad de evadir el obstáculo.
- Diseñar un control de alto nivel para el seguimiento de una ruta.
  - Considerar la velocidad del móvil al momento de evaluar decisión.
- Diseñar modelo de sensor que remplace transitoriamente a los sensores reales implementados en el vehículo.

### **1.2.3 ALCANCES.**

El control supervisor de ruta, o control de alto nivel, y los sensores del vehículo no forman parte de la finalidad del presente trabajo de título, siendo estas investigaciones y desarrollos de otros integrantes del AMTC. Sin embargo, debido a su carácter indispensable, serán diseñadas e implementadas en el presente trabajo, dejando abierta y explícita la opción de ser sustituidas por estrategias de control con mayor eficacia y robustez, y con ello obtener un trabajo que responda a las necesidades planteadas.

## 1.3 ESTRUCTURA GENERAL

La estructura del documento es como se presenta a continuación:

- Capítulo 2: Se realiza una presentación del estado del arte de los vehículos autónomamente guiados en el mundo y en Chile, tanto en el ambiente civil, militar y en la minería. Adicionalmente se introducen los conceptos teóricos considerados relevantes para el entendimiento del trabajo realizado en los capítulos posteriores
- Capítulo 3: En este capítulo se entrega al lector los diseños e implementaciones de todos los actores responsables del estudio y aplicación de control de evasión de obstáculos. Se describe e implementa el modelo utilizado con la aplicación de sus mejoras, se diseñan, implementan y validan los complementos necesarios para la generación de ruta, finalmente se diseña e implementa el control evasor de obstáculos.
- Capítulo 4: Tras su implementación e interconexión entre los diferentes módulos, se analizan los resultados obtenidos. Considerando casos significativos que expresan el comportamiento ante una muestra representativa de posibilidades. Adicionalmente se valida el comportamiento del modelo dinámico y se evalúa la eficacia y coherencia de los criterios de seguridad ante contingencias.
- Capítulo 5: Finalmente, en base a los resultados obtenidos, los objetivos planteados y los desafíos superados, se entregan las principales conclusiones y el análisis de resultados obtenidos durante el desarrollo trabajo. Adicionalmente se plantean los trabajos futuros que conllevaran a un mejoramiento de este ambicioso proyecto.

# **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES DE VEHÍCULOS GUIADOS AUTÓNOMAMENTE**

En el presente capítulo se entrega al lector el estado del arte en cuanto a técnicas de modelación y estrategias de control se refiere. En particular se expone el primer desafío, la construcción de un vehículo guiado autónomamente, y la utilización de esta tecnología en minas chilenas. A continuación de ello, se entregaran los conocimientos necesarios para una mejor comprensión del trabajo realizado.

## **2.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS VEHÍCULOS GUIADOS AUTÓNOMAMENTE**

A medida que pasan los años la tecnología avanza a pasos agigantados de la mano con la imaginación del Hombre, por ejemplo, retratada en la denominada ciencia ficción, permite hacernos soñar con una automatización de todo el mundo que nos rodea. Artefactos tan versátiles, cotidianos y pequeños como lo son actualmente los denominados smartphones, que permiten entregar, además de telefonía, transferencia de datos por internet, posicionamiento global de una gran precisión y el manejo de complejos programas y todo en la palma de la mano. Luego, es natural el deseo de implementar estas tecnologías en vehículos urbanos, para facilitar la vida, y en conjunto con los grandes avances en la identificación de imágenes virtuales, convertirse en vehículos con la capacidad de ser guiados automáticamente sin la necesidad de poseer un chofer, sólo conociendo la ruta a realizar. Es en este contexto, que el presente trabajo busca dar un paso adicional y acercar a que todo el transporte, ya sea público, privado o productivo en faenas laborales, pueda movilizarse por los caminos sin necesidad de poseer un chofer.

Estrictamente, se puede definir un vehículo terrestre guiado autónomamente (AGV, por sus siglas en ingles) como un vehículo que se desplaza y dirige sin un conductor humano ni guiado por control remoto, mediante el uso de diversos sensores y sistemas de posicionamiento, determinando independientemente todas las características relevantes de su entorno y llevando a cabo las tareas necesarias para realizar el recorrido asignado[1].

### **2.1.1 ESTADO DEL ARTE INTERNACIONAL**

#### **2.1.1.1 DARPA URBAN CHALLENGE**

Grand Challenge[2] es una carrera de vehículos sin piloto, patrocinada por la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA, por sus siglas en ingles), principal organismo de investigación del Departamento de Defensa de los Estados Unidos. Esta competencia otorga premios en dinero, cada vez que se celebra aumenta el número de participantes a la vez que la calidad de estos, incrementando las distancias recorridas de manera más segura y eficiente.

El primer evento, realizado el año 2004[3], tenía como propósito influenciar el desarrollo estadounidense de tecnología para vehículos autónomos, con el fin de aplicarlos en el mundo militar. La competencia consistió en realizar una ruta por el desierto de 142 millas, participaron un total de 15 equipos, de los cuales ninguno logro llegar a la meta. Un año después, tan solo 4 equipos lograron alcanzar 132 millas, en las 10 horas requeridas, otorgándose el premio a la Universidad de Standford.

En el 2007, se crea el reto urbano, renombrándose la competencia como “DARPA Urban Challenge”[4], cuyo fin era mantener a los soldados en territorio hostil fuera de peligro, realizando investigación con vehículos terrestres autónomos que debían maniobrar en entornos urbanos simulados. Los ejercicios consistían en misiones simuladas de transportes de suministros, a la vez de tener que unirse a circuitos con tráfico y objetos estáticos que impedían un desplazamiento fluido. La Figura 2-1 expone alguno de los vehículos participantes y el ambiente al que deben enfrentar.



FIGURA 2-1: DARPA URBAN CHALLENGE[4]

DARPA lleva a cabo la competencia con el apoyo del Congreso, bajo el lema que “cada aburrida, sucia o peligrosa tarea que pueda llevarse a cabo usando maquinas en lugar de seres humanos protegerá a nuestros valiosos combatientes” [4].

### 2.1.1.2 CAMIONES PARA LA MINERÍA KOMATSU

En Enero del 2008, la empresa japonesa Komatsu, a través de su filial estadounidense Komatsu America, da a conocer la implementación de un sistema de control autónomo en su modelo de camión para la minería 930E-4[5]. Estos están equipados con el sistema FrontRunner®, lo que les permitiría maniobrar por un entorno minero complejo entregando cargas de hasta 320 toneladas sin la necesidad de un conductor. Este tipo de funcionamiento

autónomo puede aumentar significativamente la productividad en las operaciones mineras, en particular en faenas donde la mano de obra escasea por su localización remota.

Komatsu, ya provee estas máquinas a la Minera Rio Tinto en España, a la mina de hierro de Pilbara en Australia Occidental y es la primera en proveer a Codelco Chile de esta clase de tecnología

## 2.1.2 ESTADO DEL ARTE EN CHILE

En Chile, el telecomando de maquinarias y su control automatizado está principalmente en manos de Codelco, la cuprífera nacional es la empresa que ha adquirido más proyectos de automatización en el país.

La Minera Gaby[6], perteneciente a Codelco, el 2008 se convierte en la primera operación minera del mundo que utiliza el 100% de sus camiones de extracción en la modalidad autónomo y cuya tecnología está en permanente evaluación y monitoreo. Con un total de 17 equipos con tecnología autónoma, Gaby además es la poseedora de la mayor flota a nivel mundial de esta clase de maquinaria. Independientemente de estos avances, aún queda mucho camino por recorrer. Teniendo claro esto, se han esforzado en mejorar los software para mejorar tanto el rendimiento como la seguridad, así mismo han logrado aumentar la velocidad de los camiones a la vez de hacer más robustas las capas de seguridad y permitir una gestión de información mucho más flexible.

Codelco Andina[7], a contar del 2011, también inicio su proceso de automatización, para ello, cuenta con los servicios de “Caterpillar”, quienes han automatizado gran parte del ciclo de carga, transporte y vaciado utilizando el sistema de control “Minegem” de la empresa “Fining Chile”. El desarrollo del programa, aun en marcha, considera la instalación, puesta en marca y soporte por 12 meses de un determinado sector a modo de prueba.

El sistema “Minegem” está compuesto por:

- Sistema de automatización del equipo, que incluye un mecanismo de reconocimiento del entorno llamado L.A.D.A.R (Laser Detection and Ranging), que detecta a distancia la forma del entorno en el que se mueve el equipo, permitiendo el libre desplazamiento de éste a través de una galería ya definida.
- Sistema para área de aislamiento, que permite aislar en forma segura el área de trabajo autónoma del equipo, evitando que ingresen personas o equipos no autorizados al área, deteniendo inmediatamente el motor y deshabilitando el sistema.
- Estación de operación, que agrupa a los sistemas mencionados, permitiendo la operación y supervisión del sistema.

Adicionalmente Andina también implementa un proyecto de automatización con Atlas Copco, el grupo sueco a contar del 2012 realiza pruebas de sus camiones ST14 y del sistema de control remoto Scooptram RRC [8] [9].

Por último, la mina El Teniente, ya cuenta con una gran cantidad de dispositivos telecomandados desde la ciudad, siendo el nuevo nivel en construcción, él que será explotado el

año 2017, en la cual se espera completar la automatización[10]. La tecnología utilizada provista por Sandvik, corresponde al sistema AutoMine el cual permite realizar ciclos semi-automatizados de carguío controlados de forma remota por un solo operario[11].

## 2.2 MODELO DINÁMICO DE UN VEHÍCULO TERRESTRE

Como fue mencionado, en el contexto de la creación de un AGV, es necesario contar con un modelo virtual de este, para así poder experimentar con estrategias de control y realizar las pruebas necesarias para pre calibrar sus valores. Entre las opciones existentes en MATLAB® se baraja la utilización de SimMechanics y Simscape (toolbox que permiten emular movimientos mecánicos). Sin embargo, son desestimados dichos toolbox por problemas de licencia. Además, la utilización de un modelo dinámico de ecuaciones tiene como gran ventaja su implementación en cualquier programa que realice resolución de ecuaciones diferenciales en el tiempo, no limitándose a este software.

El sistema dinámico que se escogió consiste en el modelo de bicicleta, ya que este posee el mismo comportamiento que el de un vehículo con 2 ruedas por eje, salvo el balanceo, el cual será necesario considerar posteriormente. Este modelo es implementado en ambiente de MATLAB®-Simulink, y cuenta adicionalmente con mejoras para asemejarlo aun más al comportamiento del vehículo real, Volkswagen® Tiguan.

El modelo tipo bicicleta [12] [13], consiste en relacionar el comportamiento de las ruedas del automóvil como si sólo existiese una por eje, localizándolas en una línea que pasa longitudinalmente a través del centro del vehículo (al igual que en una bicicleta), como se observa en la Figura 2-2. Adicionalmente, en la misma figura se muestran las distintas fuerzas que se aplican sobre el modelo simplificado del vehículo.

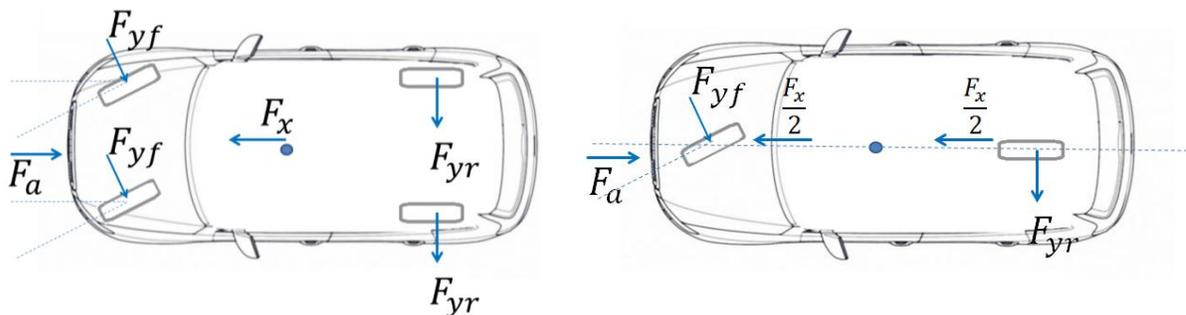


FIGURA 2-2: MODELO TIPO "BICICLETA": FUERZAS PRESENTES EN EL MODELO

Se consideran fundamentalmente las fuerzas longitudinales y tangenciales presentes en el vehículo, tales como  $F_{yf}$  y  $F_{yr}$  que representan fuerzas tangenciales a las ruedas delanteras y traseras respectivamente. Así mismo  $F_x$  representa la fuerza de tracción total ejercida por el automóvil mientras que  $F_a$  corresponde al roce aerodinámico. Es fundamental enfatizar que en

este modelo se han despreciado tanto el balanceo<sup>1</sup> y cabeceo<sup>2</sup> que evidentemente podrían presentarse en un automóvil.

Adicionalmente, en la Figura 2-3, se pueden apreciar las variables  $\beta$ ,  $\delta$  y  $\psi$ , que corresponden al ángulo de dirección del centro de masa, el ángulo de giro de las ruedas delanteras y el ángulo de torsión de derrape<sup>3</sup> del vehículo, respectivamente, todos centrados en el origen absoluto del sistema.

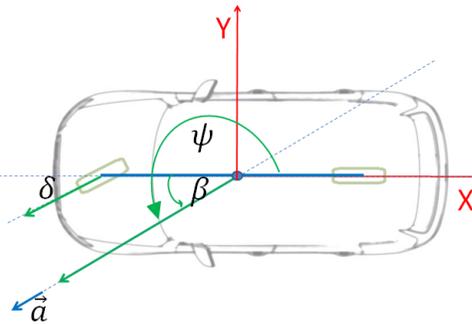


FIGURA 2-3: MODELO TIPO "BICICLETA": ÁNGULOS DE DIRECCIÓN DEL MODELO

Utilizando estas variables en un equilibrio de fuerzas, es posible obtener las ecuaciones dinámicas que modelan el comportamiento del vehículo, como se observa a continuación:

La ecuación dinámica (2.1) representa la variación del ángulo del centro de masa del vehículo, desprendida de la sumatoria de fuerzas transversales del automóvil, como se observa en la Figura 2-4.

$$\dot{\beta} = \dot{\psi} - \frac{1}{M \cdot v} \left\{ \left( \frac{F_x}{2} - F_a \right) \sin(\beta) + \frac{F_x}{2} \sin(\delta + \beta) + F_{yf} \cos(\delta + \beta) + F_{yr} \cos(\beta) \right\} \quad (2.1)$$

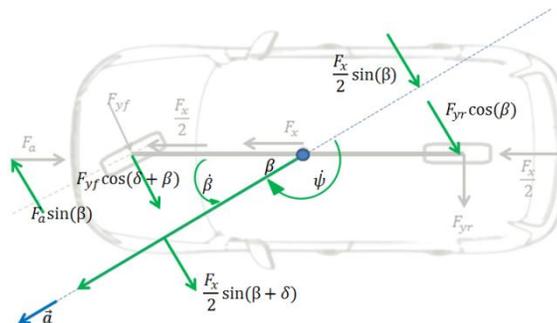


FIGURA 2-4: SUMATORIA DE FUERZAS TRANSVERSALES AL MOVIMIENTO DEL VEHÍCULO

Analizando el torque producido por las fuerzas laterales y la propia inercia del vehículo, se obtiene la ecuación dinámica (2.2) que representa el giro del vehículo sobre su eje vertical, también conocido como derrape o giñada. Gráficamente se observa en la Figura 2-5 como la

<sup>1</sup> Balanceo: movimiento realizado por el vehículo con respecto a su propio eje longitudinal

<sup>2</sup> Cabeceo: movimiento realizado por el vehículo con respecto a su eje transversal.

<sup>3</sup> Ángulo de Derrape: movimiento realizado por el vehículo con respecto a su eje vertical.

fuerzas paralelas al neumático realizan torque con un radio dada por la distancia entre el centro de masa del vehículo y su respectivo eje.

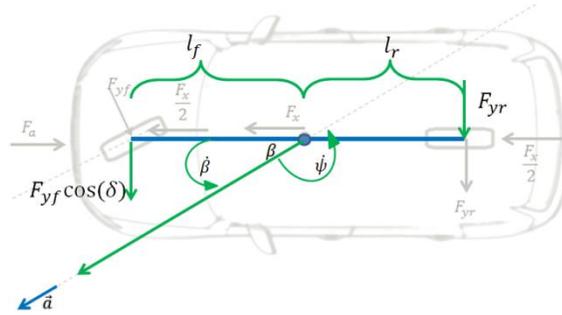


FIGURA 2-5: SUMATORIA DE TORQUES DEL VEHÍCULO

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_{zz}} \{ F_{yf} \cdot l_f \cos(\delta) - F_{yr} \cdot l_r \} \quad (2.2)$$

Utilizando la ecuación dinámica (2.3) se obtiene la velocidad lineal del centro de masa del vehículo, en función de las fuerzas longitudinales presentes en el vehículo, por como se observa en la Figura 2-6

$$\dot{v} = \frac{1}{M} \left\{ \frac{F_x}{2} (\cos(\beta) + \cos(\delta + \beta)) - F_a \cos(\beta) - F_{yf} \sin(\delta + \beta) - F_{yr} \sin(\beta) \right\}. \quad (2.3)$$

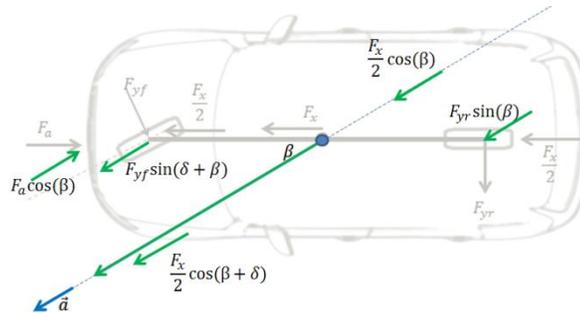


FIGURA 2-6: SUMATORIA DE FUERZAS LONGITUDINALES AL MOVIMIENTO DEL VEHÍCULO.

La obtención de la posición del vehículo respecto del origen se obtiene integrando el valor de las velocidades por eje, según se observa en (2.4), donde  $v$  es la rapidez del vehículo.

$$\begin{pmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{pmatrix} = v \begin{pmatrix} \cos(\psi - \beta) \\ \sin(\psi - \beta) \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Las fuerzas tangenciales sobre los neumáticos delanteros y traseros están dadas por las siguientes relaciones:

$$F_{yf} = C_f \left( \beta - \frac{l_f}{v} \dot{\psi} + \delta \right) \quad (2.5)$$

$$F_{yr} = C_r \left( \beta + \frac{l_r}{v} \dot{\psi} \right), \quad (2.6)$$

donde  $l_f$  y  $l_r$  corresponden a la distancia entre el centro de masa y el eje delantero y trasero, y  $C_f$  y  $C_r$  son las constantes características de los neumáticos trasero y delanteros en curva, respectivamente. Cabe señalar que esta ecuación es obtenida por la resistencia de los neumáticos del vehículo a girar en el plano. Por último, la fuerza aerodinámica está dada por:

$$F_a = \frac{\xi \cdot \rho \cdot A}{2} v^2. \quad (2.7)$$

donde:

$\xi$  : coeficiente aerodinámico.

$\rho$  : densidad del aire.

$A$  : área frontal del vehículo.

$v$  : rapidez instantánea del vehículo.

Este modelo genérico, es utilizado en un vehículo con tracción delantera, luego, como el auto utilizado tiene tracción en sus 4 ruedas, se considerara que tanto el eje delantero como trasero entregaran exactamente la misma fuerza, siendo esta la mitad de la fuerza total ejercida por el automóvil:  $\frac{F_x}{2}$ .

## 2.3 LÓGICA DIFUSA

Para la evasión de obstáculos se decide utilizar lógica difusa dado su versatilidad y lo intuitivo de los grupos de pertenencia. Alternativas como los controles PID, tienen la falencia de que es necesario un gran conocimiento de la planta a controlar, y dado que obtener un modelo de gran exactitud del vehículo conlleva una gran dificultad, el sistema más idóneo es el difuso, el cual tiene como principal característica la posibilidad de actuar por “sentido común” al momento de controlar y por ende no es necesario contar con un detallado conocimiento de la planta.

La lógica difusa [14][15] consiste en tratar con información que no es exacta, dicha información contiene un alto grado de imprecisión, contrario a la lógica tradicional que trabaja con información definida y bien acotada. Ejemplo de esto sería el definir si la temperatura del agua es alta o baja, o si una distancia es reducida o larga, conceptos imprecisos desde el punto de vista de varias personas y de la lógica difusa. La teoría de conjuntos difusos parte de la similitud con los conjuntos clásicos en los cuales se tiene una función de pertenecía, y de aquí el concepto de difuso, ya que cada conjunto se encuentra asociado con un determinado valor independiente del resto, como se muestra en la Figura 2-7

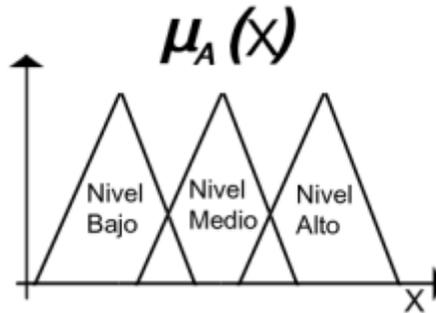


FIGURA 2-7: CONJUNTOS DIFUSOS

Así se define una función de pertenencia de una variable para cada conjunto difuso, en la que se indica el grado en que se encuentra incluida en el concepto representado por la etiqueta, de esta manera los conjuntos difusos pueden agrupar objetos por el valor que los caracterice, por ejemplo, unos estanques de agua pueden ser agrupados por su altura, como se observa en la Figura 2-7. Además se puede observar claramente que la transición de valores es gradual y no instantánea, al contrario de la lógica tradicional.

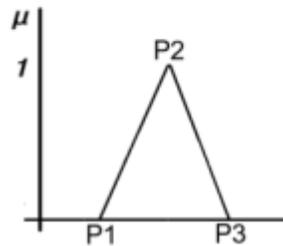


FIGURA 2-8: FUNCIÓN DE PERTENENCIA

En la Figura 2-8 se observa el concepto de función de pertenencia en un determinado conjunto difuso, en donde un elemento  $x$  que pertenece al conjunto difuso  $A$  está dado por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x - p_1}{p_2 - p_1} & p_1 < x < p_2 \\ \frac{p_3 - x}{p_3 - p_2} & p_2 < x < p_3 \\ 0 & \text{en otras condiciones} \end{cases} \quad (2.8)$$

Cabe señalar que el triángulo no es la única forma de conjunto, es habitual utilizar trapezoides, funciones sigmoideas, campanas de Gauss, funciones tipo “S” o “Z”, independiente de la forma del conjunto, la función siempre tendrá un grado de pertenencia entre 0 y 1, donde 0 es la pertenencia nula y 1 es la pertenencia absoluta a dicho conjunto[16].

Los controladores difusos utilizan estas funciones de pertenencia como reglas para controlar los sistemas, dado que cada regla se obedecerá de acuerdo al peso entregado por su grado de pertenencia. Es necesario considerar que en los sistemas de control con algoritmos difusos se debe tomar en cuenta el conocimiento experto de una o varias personas para la realización de la base de conocimiento sobre la cual se tomara una decisión, ya que son estos los

que escogen las mejores alternativas a las diferentes situación, logrando que el sistema utilice el “sentido común” de estos expertos.

La estructura normalmente utilizada en un control difuso puede verse en la Figura 2-9.

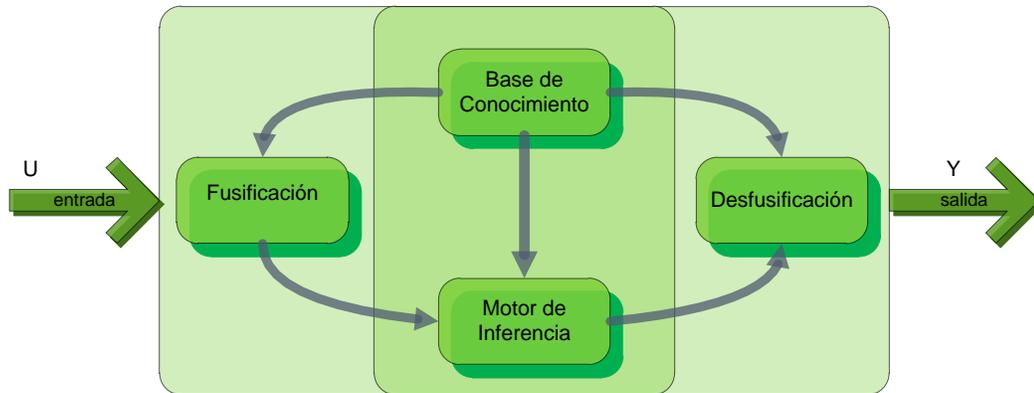


FIGURA 2-9: ARQUITECTURA DE UN CONTROLADOR DIFUSO

El primer bloque, denominado “Fusificador” o “de Fusificación”, corresponde al responsable de calcula el grado de pertenencia de las entradas del sistema. Este bloque ya no entrega un simple valor numérico, sino parte de una regla que se deberá aplicar a continuación.

El segundo bloque corresponde al “Motor de Inferencia” y que en conjunto con la “Base de Conocimiento”, toman las decisiones que dictaran la forma en que actuara el sistema, esta toma de decisiones se realiza a través del criterio de pertenencia de cada una de las reglas, entregándole una importancia en la decisión final de acuerdo al grado de identificación que tenga cada regla. El conjunto de reglas, que son las que conforma la “Base de Conocimiento” son de la forma:

Sí... “X”... y... “Y”... entonces... “Z”

un ejemplo de regla es: Si “no viene un auto por el lado izquierdo” y “no viene un auto por el lado derecho” entonces “se puede cruzar la calle”.

El cuarto y último bloque corresponde al “Desfusificador” o “de Desfusificación”, el cual entrega el valor útil para el sistema. [14][15][17]

En la actualidad existen 2 tipos de controladores difusos predominantes, el control de inferencia Mamdani [18],[19], [20] y el control de inferencia Takagi-Sugeno [21] [22]

El control Mamdani, corresponde matemáticamente al siguiente:

Sea:  $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_k)$ , las variables de entrada del sistema e  $Y$  la salida del sistema, con  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ik})$  e  $Y_i$ , los respectivos conjuntos difusos, donde  $i = 1, 2, \dots, n$ ; y  $n$  corresponde al número de reglas.

Con la Base de conocimiento, de la forma:

$$BC = \begin{cases} \text{Regla}_1 & \text{Si } X \text{ es } x_1 \text{ entonces } Y \text{ es } Y_1 \\ \vdots & \vdots \\ \text{Regla}_n & \text{Si } X \text{ es } x_n \text{ entonces } Y \text{ es } Y_n \end{cases}$$

considerando esto, se aplican las reglas señaladas utilizando como criterio de selección el mínimo entre estos:

$$\begin{aligned} \mu_{regla_1}(y) &= \min(\mu_{x_{11}}(x_1), \mu_{x_{12}}(x_2), \dots, \mu_{x_{k1}}(x_k)) \\ &\quad \vdots \\ \mu_{regla_n}(y) &= \min(\mu_{x_{1n}}(x_1), \mu_{x_{2n}}(x_2), \dots, \mu_{x_{kn}}(x_k)) \end{aligned} \quad (2.9)$$

luego, la función de pertenencia de salida, correspondiente a estas variables, estaría dada por:

$$\mu_{BaseConocimiento}(y) = \max(\mu_{regla_1}(y), \mu_{regla_2}(y), \dots, \mu_{regla_n}(y)) \quad (2.10)$$

Gráficamente el procedimiento se puede observar de forma resumida en la Figura 2-10.

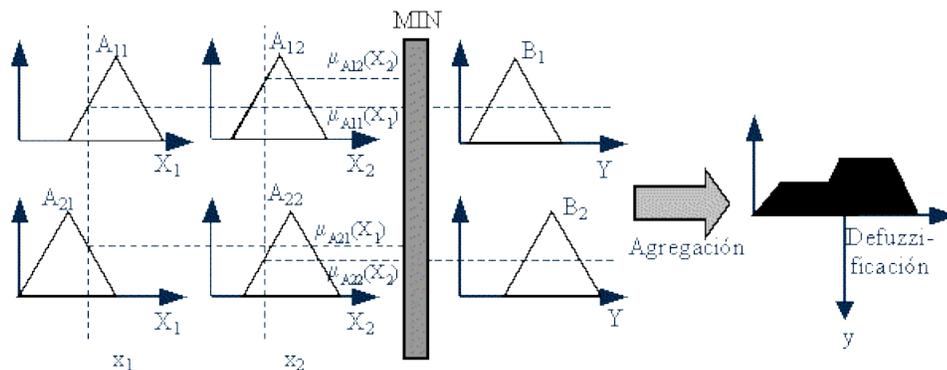
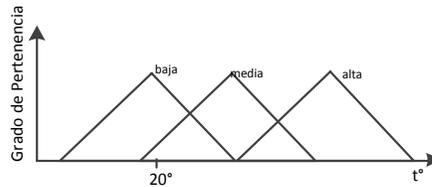


FIGURA 2-10: RESUMEN SISTEMA DIFUSO MAMDANI[23]

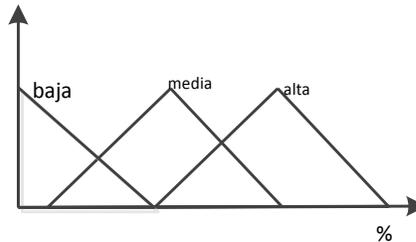
El criterio de selección de reglas (mínimo) o de defusificación (máximo), no es el único criterio de selección, también se pueden utilizar criterios como el de seleccionar el máximo entre las reglas activadas y obtener como resultado de defusificación el producto de lo seleccionado. También se puede utilizar el promedio de valores, o incluso directamente la suma de resultados, entre otros.

A continuación se observa un ejemplo gráfico de una evaluación difusa de Mamdani, utilizando el criterio de máximo-mínimo:

Se desea controlar la temperatura de un estanque, a través de la apertura de una válvula. La Figura 2-11 representan los conjuntos de entrada del sistema correspondiente a la temperatura que posee el estanque, mientras que en la Figura 2-12 se entregan los conjuntos de salida del sistema, defusificador. Es propicio señalar que el conjunto de salida entrega el valor porcentual de apertura en la válvula responsable de calienta el sistema.



**FIGURA 2-11: FUSIFICACIÓN**



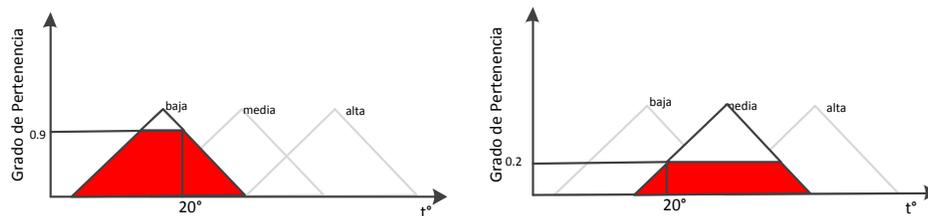
**FIGURA 2-12: DEFUSIFICACIÓN**

Sea la base de conocimiento o reglas del sistema, las entregadas en la Tabla 2-1, se evalúa el sistema ante la detección de una temperatura en el estanque de 20 [°C].

**TABLA 2-1: BASE DE CONOCIMIENTO**

<b>Si</b>	la temperatura es baja	<b>entonces</b>	alta apertura de la válvula
<b>Si</b>	la temperatura es media	<b>entonces</b>	media apertura de la válvula
<b>Si</b>	la temperatura es alto	<b>entonces</b>	baja apertura de la válvula

Debido a que la temperatura medida, y por ende la señal de entrada al controlador, es de 20 [°C], genera la activación de 2 de los conjuntos de fusificadores, como se puede observar en la Figura 2-13, luego para determinar el grado de pertenencia a cada uno de éstos, simplemente se evalúa la intersección entre la señal de entrada y la forma del conjunto, como se muestra en dicha figura.



**FIGURA 2-13: OBTENCIÓN DE PESOS**

Tras obtener el peso de cada conjunto, se evalúa su respectiva representatividad en el conjunto de salida, para ello se acude a la base de conocimiento y relacionan las diferentes variables de la forma expuesta en la Figura 2-14, donde: si temperatura es baja con un 90% de pertenencia entonces el porcentaje de apertura de la válvula es alto en un 90%; si la temperatura es media en un 20% entonces la apertura es media en un 20%.

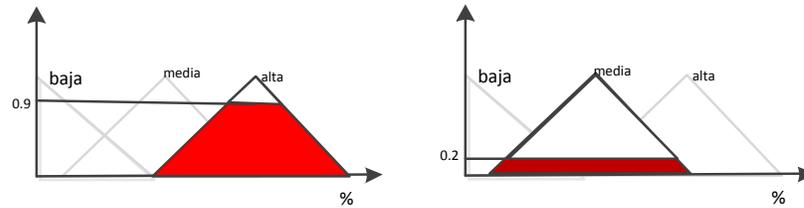


FIGURA 2-14: EVALUACIÓN DE REGLAS

Por último, para la obtención del valor final, es necesario realizar una evaluación entre las alternativas entregadas, esto se consigue calculando el centro de masa de la figura formada por la unión de los resultados independientes, como se observa en la Figura 2-15. Siendo éste valor el que se debe aplicar al sistema.

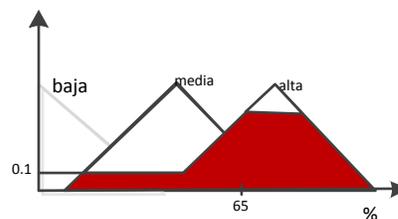


FIGURA 2-15: DEFUSIFICACIÓN

En el control clásico, los controladores PID corresponden a una de las estructuras más simples de implementar. Independiente de esto, se consideran robustos y por ello son ampliamente utilizados en la industria, tanto para sistemas lineales como no lineales. El nombre de este controlador viene de las iniciales que lo conforman: Proporcional, Integral y Derivativo, donde cada una de estas corresponden a:

P: La acción proporcional corresponde a una salida del controlador que es proporcional al error del sistema, donde el error es  $e = y(t) - ref(t)$ . Esta permite controlar prácticamente cualquier planta estable, pero posee un desempeño limitado y un error permanente [24].

I: corresponde a la acción integral de la salida del controlador, esta permite acumular el error proporcional, interpretando que esta componente se encarga de analizar el pasado de la señal, reduciendo el error permanente a cero [24].

D: corresponde a la acción derivativa de la salida del controlador, y es la variable que analiza la tendencia de cambio, luego se puede considerar a esta señal como la encargada de predecir el futuro ingresando una señal que se adelante a la situación [24].

La interacción de estas tres componentes genera el control dependiendo de los requerimientos necesarios: P, PI, PD y PID.

Esta lógica es posible de implementar en los controladores difusos, para ello son utilizadas como variables de entradas difusas al control las señales de error ( $e$ ), derivativa del error ( $\Delta e$ ) y la integral del error. Y con ello se obtienen controladores difusos P, PI, PD y PID,

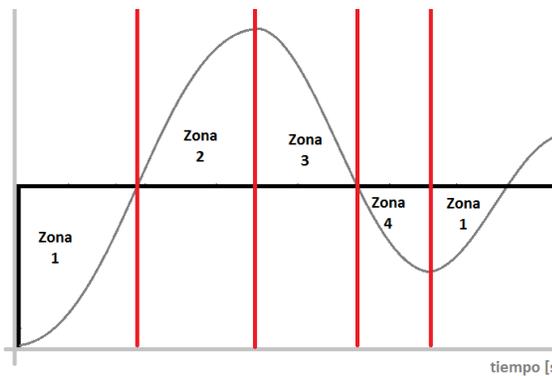
que a diferencia de los controladores clásicos, son implementables en sistemas no lineales sin problemas.

Un ejemplo de utilización de la estrategia de control difuso-PD, es desarrollar como experimento la respuesta al escalón, implementada habitualmente para el control clásico, como se observa en la Figura 2-16. Esta figura es dividida en 4 zonas, las que son determinadas por el comportamiento de la señal producto del escalón y caracterizadas por el signo que posea el error de la señal y el cambio de éste, como se observa en la Tabla 2-2 [25] [26]

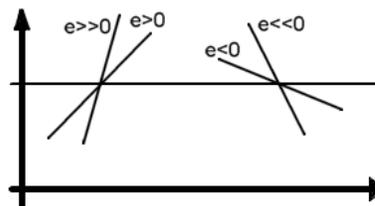
De esta forma, el controlador difuso utilizará el signo del error para discriminar en qué sentido se debe guiar la señal. Mientras que el cambio de error entrega la tasa de cambio, a través de su pendiente como se observa en la Figura 2-17, y con ello discriminar de una forma no lineal la señal necesaria para converger en la referencia de una forma suave y rápida. Finalmente estas 2 señales, y su respectiva magnitud posibilitan la generación de reglas que conformen el control difuso.

**TABLA 2-2: DETERMINACION DE ZONAS DADO EL SIGNO DEL ERROR Y EL CMABIO DEL ERROR.**

	Error ( $e$ )	Cambio Error ( $\Delta e$ )
Zona 1	$>0$	$<0$
Zona 2	$<0$	$>0$
Zona 3	$<0$	$<0$
Zona 4	$>0$	$>0$



**FIGURA 2-16: RESPUESTA AL ESCALÓN DE CONTROL PD-DIFUSO.**



**FIGURA 2-17: PENDIENTE DE SEÑAL**

Esta implementación es diseñada para reducir el error a cero, siendo analógica su concepción para valores reales que necesiten converger a un determinado valor. Un ejemplo de

esta situación se expresa en la necesidad de mantener constante un determinado caudal de una represa:

Sea una represa que posee un ritmo variable de alimentación y se desea que el caudal de salida de esta sea constante e igual a “ $C$ ”. Para ello, solo es posible regular la apertura de la válvula de salida, luego según lo observado en la Figura 2-16 y la Figura 2-17, se diseña una base de reglas observadas en la Tabla 2-3, de forma que:

SI el Caudal ( $Q$ ) es mayor que el deseado Y el cambio de caudal es positivo y alto ( $\Delta Q \gg 0$ ), ENTONCES reducir en gran medida la apertura de la válvula.

o,

SI el Caudal ( $Q$ ) es menor que el deseado Y el cambio de caudal es levemente negativo ( $\Delta Q < 0$ ), ENTONCES aumentar apertura de válvula.

y de esta forma es posible generar la base de reglas expuesta a continuación:

TABLA 2-3: BASE DE REGLAS CONTROL DE CAUDAL

	$\Delta Q \gg 0$	$\Delta Q > 0$	$\Delta Q = 0$	$\Delta Q < 0$	$\Delta Q \ll 0$
$Q > C$	ARV	RV	BRV	Cero	BAV
$Q = C$	RV	BRV	Cero	BAV	AV
$Q < C$	BRV	Cero	BAV	AV	AAV

donde ARV es Alta Reducción de Válvula, RV es Reducción moderada de Válvula, BRV es Baja Reducción de Válvula, AAV es Alta Apertura de Válvula, AV es Apertura moderada de Válvula, BAV es Baja Apertura de Válvula y Cero corresponde a la no modificación de la apertura de la válvula.

Como ya fue mencionado, la gran característica que entrega el controlador PD-Difuso es que permite prever el comportamiento del sistema y con ello favorecer la suave convergencia de éste.

## 2.4 EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En la literatura publicada destaca el estudio de vehículos guiados autónomamente a baja escala preferentemente movilizados por caminos preestablecidos y ambientes controlados, siendo la información de vehículos de mayor escala restringida a público general, dado que proyectos como DARPA o los desarrollados por Caterpillar y Komatsu tienen un carácter económico y de seguridad nacional.

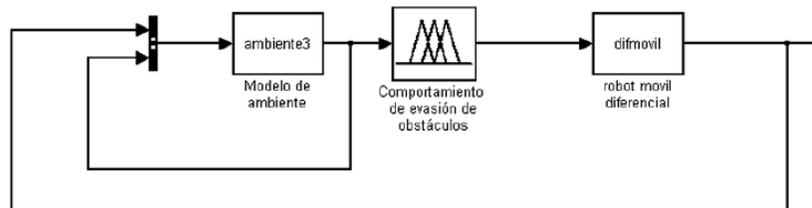
Las principales dificultades que enfrentan los AGVs, tanto terrestres como aéreos, para poseer una satisfactoria evasión de obstáculos, corresponde a la complejidad de obtener un modelo dinámico del vehículo que permita realizar una correcta estrategia de control, adicionalmente la información adquirida por los diferentes sensores no posee una precisión

absoluta correspondiendo a una probabilidad de existencia de un obstáculo, luego los sistemas clásicos de control no son la mejor alternativa para enfrentar esta situación.

Una alternativa entregada por la literatura consiste en la implementación de neurocontroladores adaptativos, consistente en una red neuronal no supervisada que aprende a controlar un robot en entornos no estacionarios, la cual se denomina Red Autoorganizativa de mapeado de direcciones (SODMN, por sus siglas en inglés). Esta combina aprendizaje asociativo y mapas asociativos vectoriales (VAN) aprendiendo a generar transformaciones entre coordenadas especiales y la velocidad del motor. En el caso particular de la evasión de obstáculos esta consiste en una red neuronal que aprende a controlar los componentes de evasión sobre un ambiente lleno de obstáculos sin la necesidad de supervisión. La gran ventaja de las redes neuronales es que no requieren el conocimiento de la geometría del robot o de la calidad, el número, o la configuración de los sensores de éste y de los obstáculos que lo rodean [27].

Una segunda alternativa, bastante más utilizada, implementada en estos dispositivos de tamaños reducidos tanto aéreos como terrestres, se basan primordialmente en estrategias de lógica difusas [28] [29][30][31][32][33], las cuales permiten realizar un control de los AGVs poseyendo un conocimiento probabilístico del obstáculo que interfiere en la ruta y fundamentalmente no es necesario poseer un modelo acabado del móvil utilizado.

En la Figura 2-18 se muestra el diagrama de bloques de la implementación de evasión de obstáculos en ruta de colisión para un AGV. De la figura se puede observar que el sistema completo consta del bloque “Robot Movil Diferencial” (que en el caso del presente documento corresponde al modelo dinámico del AGV), un bloque “Modelo de Ambiente” el cual es responsable de entregar al sistema las condiciones de la ruta, finalmente el comportamiento difuso del evasor de obstáculo es quien tomará la decisión del movimientos que se debe realizar para evadir los obstáculos.[33]



**FIGURA 2-18: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CONFORMACION DE UN EVASOR DE OBSTACULO.**

A baja escala la adquisición de datos, para la conformación del ambiente y detección, se realiza con sensores de un solo tipo como los ultrasónicos o infrarrojos, y son localizados en el AGV de las formas expresadas en la Figura 2-19 [33] [31] [30]. La ventaja de distribuir los sensores en esta configuración es analizar el área frontal del vehículo en 3 zonas definidas, y con ello determinar que flaco es el obstruido.

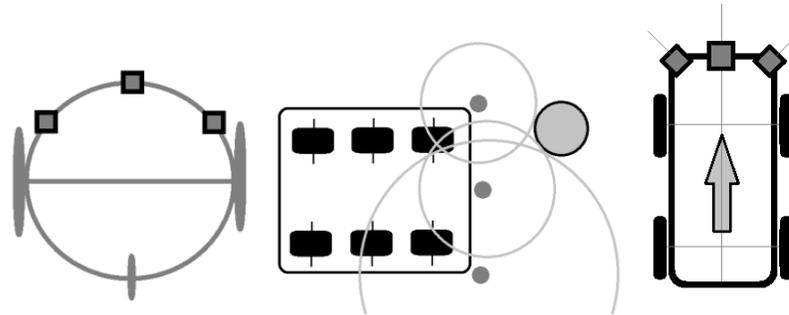


FIGURA 2-19: SENSORES EN AGV [25] [23] [22].

La Figura 2-20 expone una estructura computacional para que el AGV realice la navegación y evasión de obstáculos [30]. Este diagrama de bloques considera el análisis de la distancia a la que se detecta el obstáculo, analizando su cercanía-lejanía como referente para la discriminación entre la aplicación del control de ruta y el encargado de evadir, así mismo es el responsable de identificar la velocidad necesaria a reducir dependiente de la distancia y posición. El bloque “Distancia Lejos-Cerca” corresponde a un análisis difuso que entrega una posición relativa dependiendo de la detección de los respectivos sensores del AGV, también es responsable de determinar el peso “w”, encargado de seleccionar la señal aplicada al ángulo del volante. Los bloques que entregan la magnitud al ángulo del volante corresponden a la “Dirección hacia la Meta” y “Evasión de Obstáculos”, encargados de evaluar la no existencia o existencia de obstáculos, respectivamente.

Adicionalmente, el diagrama entrega un módulo denominado “Bloque en Ruta” correspondiente al protocolo a seguir si el AGV se ve rodeado de obstáculos que no logra rodear.

Tras evaluar las distintas componentes se analiza la posibilidad de haber concluido el viaje, sino se repite el proceso desde el comienzo.

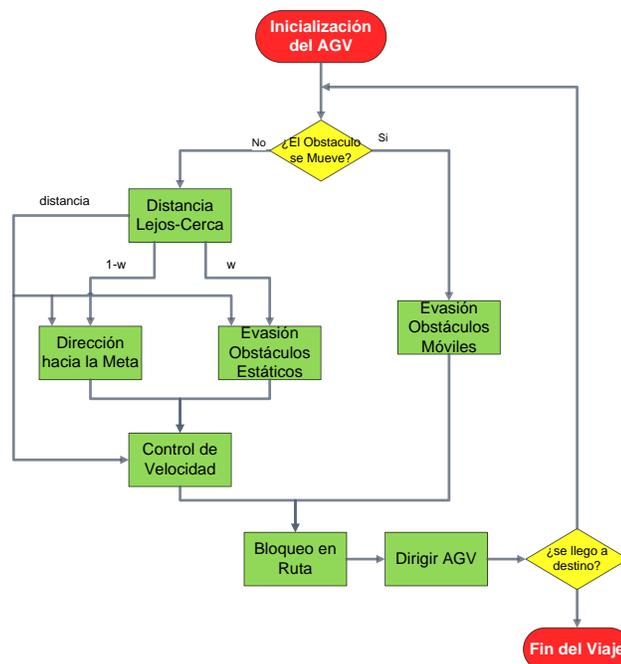


FIGURA 2-20: PROTOCOLO DE NAVEGACION PARA EVASIÓN DE OBSTACULOS [30].

## 2.5 COMENTARIOS

De lo expuesto en el presente capítulo se rescata el creciente aumento en la automatización de la minería nacional e internacional, no obstante todos estos desarrollos aún se encuentran en pleno estudio, quedando mucho por profundizar y mejorar.

Las aplicaciones de esta nueva tecnología abarcan un espectro mucho más amplio que la minería, luego es natural que las investigaciones comiencen a apuntar a otros ámbitos y no solo a la minería, acelerando las mejoras y utilidades de los AGVs, entregando la posibilidad de que en un mediano plazo estos se incorporen a nuestra vida cotidiana, contribuyendo a un transporte más eficiente y seguro, incrementando la calidad de vida.

Además se explica y dan a conocer las ecuaciones dinámicas de un vehículo que se desplaza en una superficie plana, exponiendo sus limitaciones con respecto al giro que eventualmente podría generar un vehículo real en sus ejes longitudinal y transversa, pero entregando una sólida base en el movimiento de este en un plano, y como se verá en los capítulos siguientes, una eficaz herramienta a la hora de diseñar y evaluar estrategias de control.

También se expuso al lector conceptos básicos de lógica difusa, con el fin de entregar el conocimiento mínimo que éste debe manejar para poder entender el trabajo de título. Esperando alcanzar ese cometido de una forma sencilla, didáctica y sólida, pero breve.

Por último, se muestran 2 prototipos de estrategias para evadir obstáculos, donde se privilegia la lógica difusa, la cual permite sin problemas integrar la detección probabilística de obstáculos y un modelo básico del AGV.

# CAPÍTULO 3. IMPLEMENTACIÓN DE MODELO DINÁMICO Y DISEÑO DE CONTROLADOR DIFUSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En el presente capítulo se expone la implementación del modelo dinámico analizado en la Sección 2.2, complementándolo con características propias del vehículo real e integrando su sistema de actuación. Adicionalmente se explica cómo éste interactúa con un control de bajo nivel, el cual permite realizar una interacción entre la velocidad y dirección deseada, con los pedales de freno y acelerador y el volante del vehículo. Finalmente, se diseña la estrategia de control de evasión de obstáculos, el cual es evaluado en el simulador antes descrito. Complementariamente se diseña, prueba e implementa un controlador supervisor que permita direccionar al vehículo por una ruta preestablecida, en conjunto con un modelo de sensor que entrega información al controlador de evasión de obstáculos de la presencia de un objeto en ruta de colisión.

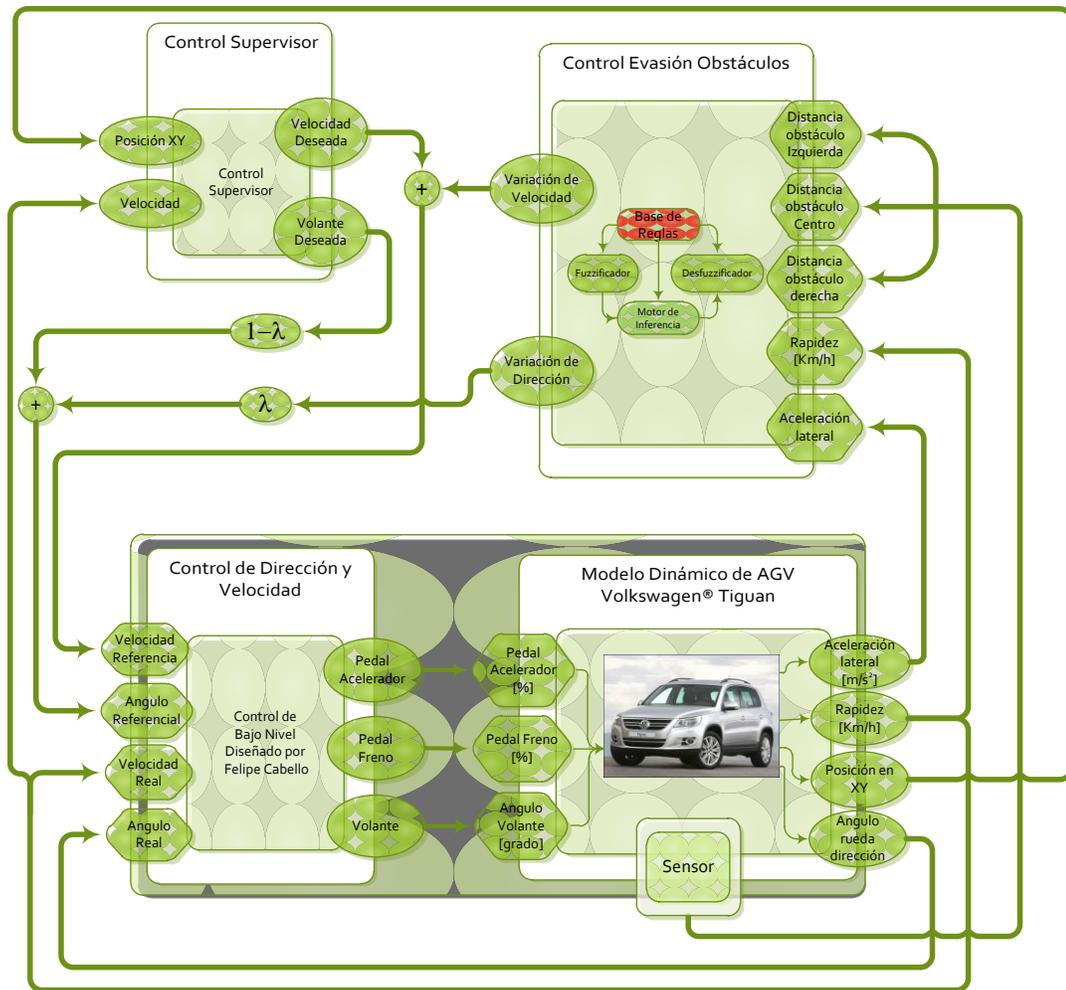


FIGURA 3-1: DIAGRAMA DE MÓDULOS

En la Figura 3-1, se expone un diagrama modular de la interconexión entre los diferentes componentes del sistema de control para el vehículo Volkswagen®–Tiguan. Estos módulos corresponden al trabajo integral del grupo de automática y robótica del AMTC de la Universidad de Chile. En el presente documento se abordará detalladamente la construcción del modelo dinámico de un automóvil, y utilizando lógica difusa se construye el “Control Evasor de Obstáculos”. Por otro lado, el “Control de dirección y velocidad” corresponde al trabajo realizado por el señor Felipe Cabello como memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista, año 2011[34]. Finalmente es necesario mencionar que el diseño de “Control Supervisor de Ruta”, corresponde al trabajo de título del estudiante Tomas Carricajo, documento que tiene como fecha de termino finales del año 2012, por lo que se debió integrar el diseño de este control para poder evaluar el evasor de obstáculos.

Producto de que el trabajo realizado corresponde a un proyecto que cuenta con la coordinación de múltiples integrantes, como fue comentado, se decidió realizar la implementación de este tal cual se presenta en la Figura 3-1, es decir, los módulos serán independientes uno de otro, en su construcción, lo que permitirá un intercambio y/o futuras implementaciones de módulos de mayor calidad sin tener que readecuar el sistema completo.

## **3.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO TIPO BICICLETA**

Utilizando la descripción entregada en la Sección 2.2, se procede a implementar las ecuaciones dinámicas del modelo de bicicleta. No obstante, también es necesario considerar criterios adicionales para asegurar que dicho modelo sea aplicable al vehículo Volkswagen® Tiguan, como son el diseño de los pedales, el volante y la validación con datos reales de operación.

### **3.1.1 DISEÑO DE PEDALES**

#### **3.1.1.1 ACELERADOR**

Se decide calcular la relación pedal-aceleración de manera empírica, gracias a la facilidad de obtener tanto la curva de aceleración como el porcentaje de presión del pedal desde la computadora del vehículo. El pedal acelerador de este automóvil corresponde a un potenciómetro doble [35]. Sin embargo, es importante mencionar que la señal enviada por el acelerador corresponde a un voltaje proporcional a la presión de este, teniendo presente que posee un nivel base para asegurar que este se encuentra bien conectado[35].

Buscando la forma más efectiva de analizar el comportamiento del pedal en función del acelerador, se diseñaron 4 pruebas en el vehículo real, consistentes en utilizar tanto el modo Sport como el tradicional del Tiguan, en conjunto con un aumento de la presión en el pedal acelerador progresiva rápida y lentamente, de forma de poder integrar a los resultados los fenómenos producidos por los cambios automáticos de marcha. Cabe señalar, que la diferencia entre los modos sport y tradicional en un vehículo de transmisión automática radica en el hecho que el modo sport revoluciona en mayor medida el motor antes de aumentar la marcha, para poder conseguir una mayor potencia en éste

En las Figura 3-2, 3-3, 3-4 y 3-5, se observa el comportamiento del vehículo producto de las pruebas realizadas, desde donde se puede obtener la información de la presión del acelerador, la rapidez alcanzada y las revoluciones del motor desarrolladas en dicho momento. Con el fin de poder realizar un mejor análisis comparativo entre las diferentes variables, dado que estas poseen diferentes grados de magnitud, se decidió escalar a todas las variables en “por unidad”. Esto se realizó mediante la división de la rapidez y de las mediciones de rpm por su respectivo máximo valor alcanzado en cada prueba.

### Aceleración Rápida en Modo Sport

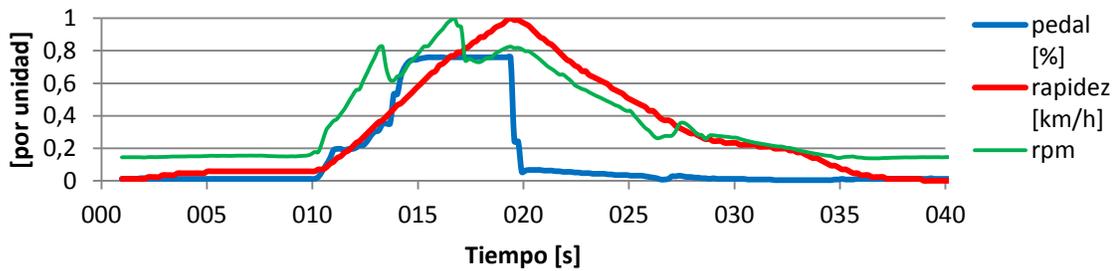


FIGURA 3-2: ACELERACIÓN RÁPIDA EN MODO "SPORT"

### Aceleración Lenta en Modo Sport

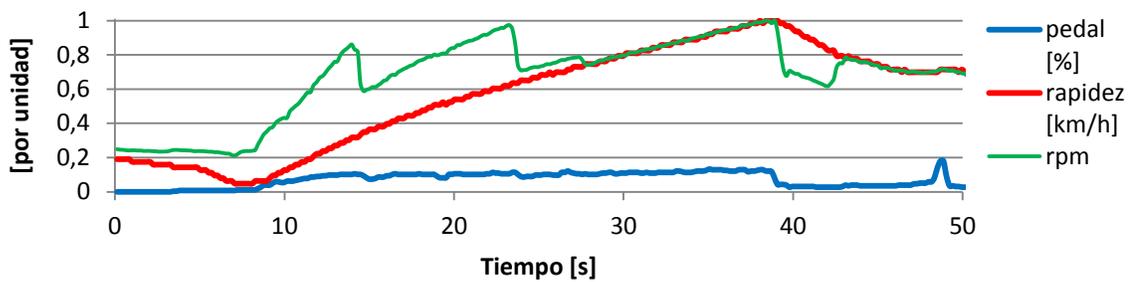


FIGURA 3-3: ACELERACIÓN LENTA EN MODO "SPORT"

### Aceleración Rápida en Modo Normal

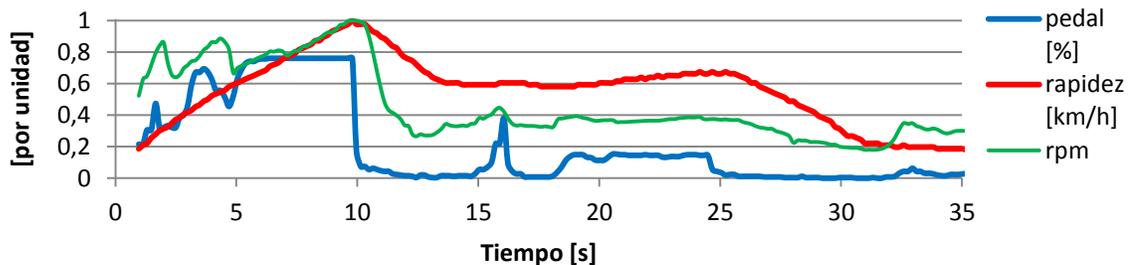


FIGURA 3-4: ACELERACIÓN RÁPIDA EN MODO "NORMAL"

### Aceleración Lenta en Modo Normal

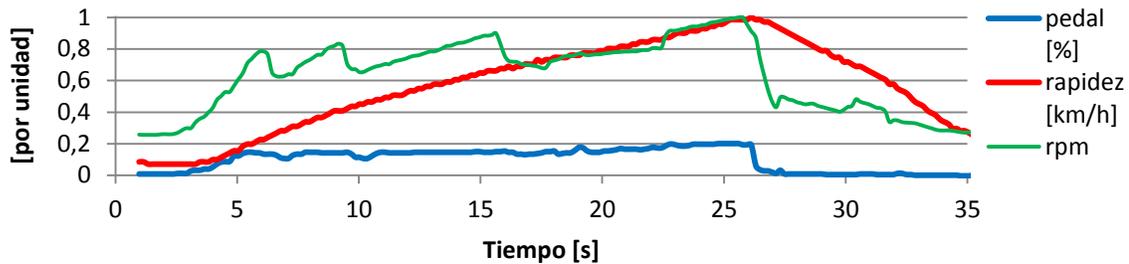


FIGURA 3-5: ACELERACIÓN LENTA EN MODO "NORMAL"

Al realizar el ajuste de escalamiento se permite analizar de mejor manera el comportamiento de los datos obtenidos en las pruebas, entregando experiencias tan valiosas como el hecho que las revoluciones del motor (responsables de incrementar la potencia del vehículo) no genera discontinuidades en la forma de la curva de velocidad cada vez que estas caen producto del cambio de marcha. Este punto es de gran ayuda al momento de implementar este actuador, ya que permite relacionar la fuerza longitudinal del modelo dinámico directamente con la presión del pedal sin considerar en número de revoluciones por minuto presentes en el motor.

#### 3.1.1.2 FRENO

Al no poseer datos empíricos del pedal del freno se decide utilizar una proporción directa entre el peso del vehículo, el coeficiente de roce del pavimento y el porcentaje de presión del pedal de freno, como se observa en la siguiente ecuación:

$$-F_x = Mg \cdot \mu \cdot P_f \quad (3.1)$$

donde:

- $-F_x$  : corresponde a la fuerza longitudinal que ejerce el vehículo para detenerse.
- $Mg$  : corresponde al peso del vehículo.
- $\mu$  : corresponde al coeficiente de adherencia entre el neumático y el suelo.
- $P_f$  : corresponde al porcentaje de presión del pedal de freno en por unidad.

Es fundamental tener presente que  $F_x$  no puede ser menor que cero ni superar el valor de la fuerza longitudinal que posea el móvil, lo que generaría un movimiento en reversa, imposible en la realidad para un pedal de freno.

El modelo Tiguan-Volkswagen®, posee la capacidad de decidir qué rueda y cuánto frenar, a través de un complejo sistema de control, con el fin de maximizar la seguridad del vehículo. Este dispositivo se suma al control ABS [36], lo que conlleva a que (3.1) sea una buena aproximación de un freno genérico, pero no corresponde a las reales características del vehículo, siendo trabajo futuro su mejor construcción.

### 3.1.2 DATOS EMPLEADOS

Los parámetros utilizados en el modelo del vehículo corresponderán a los datos reales del automóvil Volkswagen®-Tiguan, año 2010, entregados por el fabricante y expresados en la Tabla 3-1 y la Figura 3-6 [36] a continuación.

TABLA 3-1: PARÁMETROS DE VOLKSWAGEN® TIGUAN

Parámetros del vehículo a modelar (Volkswagen Tiguan)					
$M$	Masa	1590 [Kg]	$\rho$	Densidad de aire	1.225 [Kg/m <sup>3</sup> ]
$I_{zz}$	Inercia eje Z	2695 [Kg·m <sup>2</sup> ]	$\varepsilon$	Coefficiente aerodinámico	0.33
$l_f$	distancia eje delantero al CM	1.302 [m]	$A$	Área del vehículo	3.049974 [m <sup>2</sup> ]
$l_r$	distancia eje trasero al CM	1.302 [m]		Proporción Volante-rueda	1/14.7
$C_f$	Característica de neumático delantero en curva	7791 [Kg·m/s(rad)]		Aceleración 0 a 100 [km/h]	10.4 [s]
$C_r$	Característica de neumático trasero en curva	7791 [Kg·m/s(rad)]	$\mu$	Roce neumático-pavimento seco	0.8



FIGURA 3-6: DIMENSIONES DE VOLKSWAGEN® TIGUAN, ENTREGADAS POR EL FABRICANTE

### 3.1.3 IMPLEMENTACIÓN EN AMBIENTE DE SIMULINK-MATLAB®

La necesidad de diseñar un modelo dinámico del vehículo se genera con el fin de ayuda a la implementación de diferentes componentes de control, en particular su primera utilización es en el diseño, construcción y evaluación del control de bajo nivel, para manejar los actuadores de pedales y dirección. Luego, para ello es fundamental que las variables de entrada al vehículo virtual sean las mismas que las del vehículo real. La Figura 3-7, entrega el bloque del modelo realizado del vehículos en ambiente de MATLAB®-Simulink, donde se puede observar que las entradas corresponden al valor porcentual de la presión generada en los respectivos pedales, siendo el 100% la presión máxima sobre éstos.



FIGURA 3-7: MODELO DINÁMICO DEL AUTOMÓVIL VOLKSWAGEN TIGUAN

Por otro lado, el giro del volante se expresa utilizando el ángulo generado, en grados sexagesimales, con respecto a su posición natural, como se observa en la Figura 3-8.



FIGURA 3-8: VOLANTE, ÁNGULO DE GIRO

Las variables de salida corresponde a las necesarias para informar a los diferentes sistemas de control que se implementan en este trabajo, detalladas a la Tabla 3-2, no limitándose a éstas, de ser necesario en una próxima evaluación.

TABLA 3-2: OUTPUT MODELO DINÁMICO DEL VEHÍCULO.

$X[m]$	Coordenadas del centro de masa en metros
$Y[m]$	
$v [km/h]$	Rapidez real del vehículo
$A_y \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	Aceleración lateral del vehículo
$\delta [( )^\circ]$	Angulo de giro de las ruedas
$\psi [rad]$ $\psi \left[ \frac{rad}{s} \right]$ $F_{yf} [N]$ $\dot{x} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ $\dot{y} \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	Datos Internos del vehículo: <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\psi</math>: ángulo de giro con respecto al eje X del móvil</li> <li>• <math>\dot{\psi}</math>: velocidad de giro con respecto al eje X</li> <li>• <math>F_{yf}</math>: fuerza lateral en rueda delantera.</li> <li>• <math>\dot{x}</math> e <math>\dot{y}</math>: velocidad unitaria del móvil.</li> </ul>



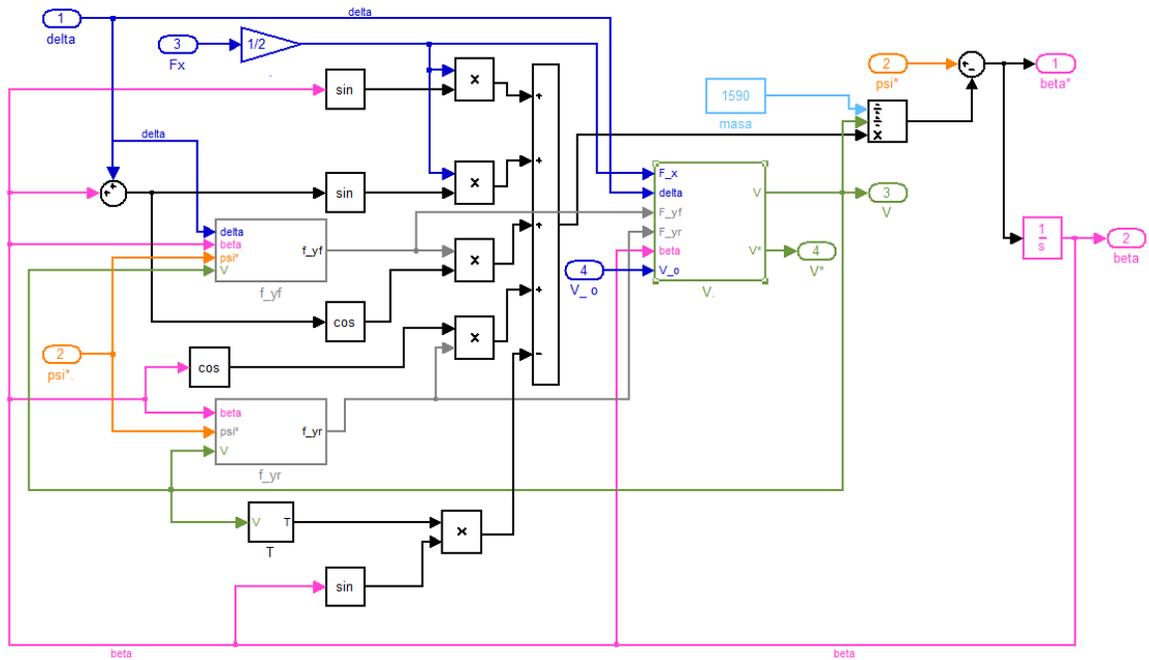


FIGURA 3-10: BLOQUE DE DIRECCIÓN

Dado que el modelo desarrollado es el de bicicleta, las fuerzas perpendiculares a los neumáticos delanteros ( $F_{yf}$ ) y traseros ( $F_{yr}$ ), son únicas por ejes. Estas, obtenidas de (2.5) y (2.6) respectivamente, se observan implementadas en los diagramas de bloques de la Figura 3-11 y la Figura 3-12

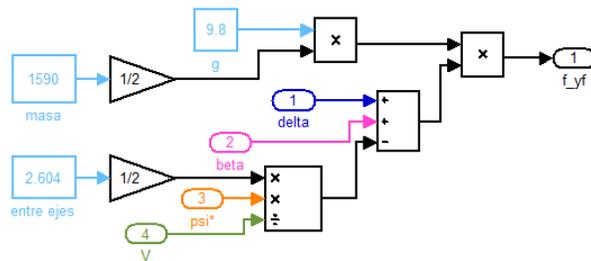


FIGURA 3-11: FUERZA PERPENDICULAR AL EJE DELANTERO

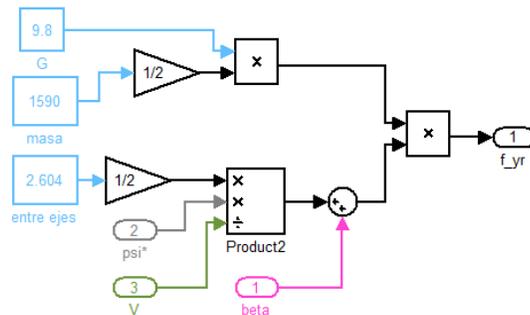


FIGURA 3-12: FUERZA PERPENDICULAR AL EJE TRASERO

Un punto que se debe tener en cuenta, es que se ha considerado el centro de masa del automóvil presente en el centro geométrico de éste. Esta simplificación permite considerar que la distancia entre el centro de masa y cada eje del vehículo es la misma e igual a la mitad de la distancia entre ejes. Por otro lado, también permite considerar que la masa del vehículo se distribuye equitativamente en cada eje. Luego, se definen los coeficientes que caracterizan el comportamiento de desplazamiento lateral de los neumáticos trasero y delantero sometidos a una curva ( $C_r$  y  $C_f$ , respectivamente), iguales y formados por el torque generado por cada eje producto de su propio peso y la distancia al centro de masa, y el arco generado por el movimiento giratorio.

La Figura 3-13 corresponde a la representación de (2.7), la fuerza de roce aerodinámico. El detalle a considerar es que el área del vehículo ( $A$ ) se calcula multiplicando las dimensiones del frente del vehículo entregadas en la Figura 3-6, el coeficiente aerodinámico de un vehículo tipo[37] y la densidad del aire.

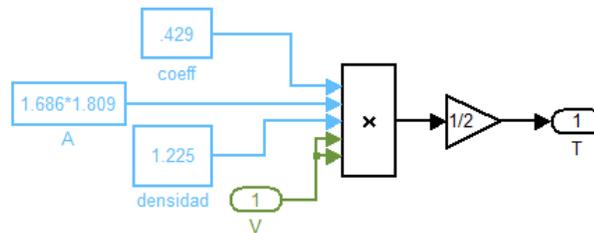


FIGURA 3-13: FUERZA DE ROCE AERODINÁMICO

La ecuación (2.3) entrega la velocidad del centro de masa del vehículo, esta ecuación, representada en la Figura 3-14, es obtenida de la integración de la aceleración longitudinal del movimiento. Luego, es posible ingresar la velocidad inicial del movimiento al entregar condiciones iniciales a la integración de la aceleración.

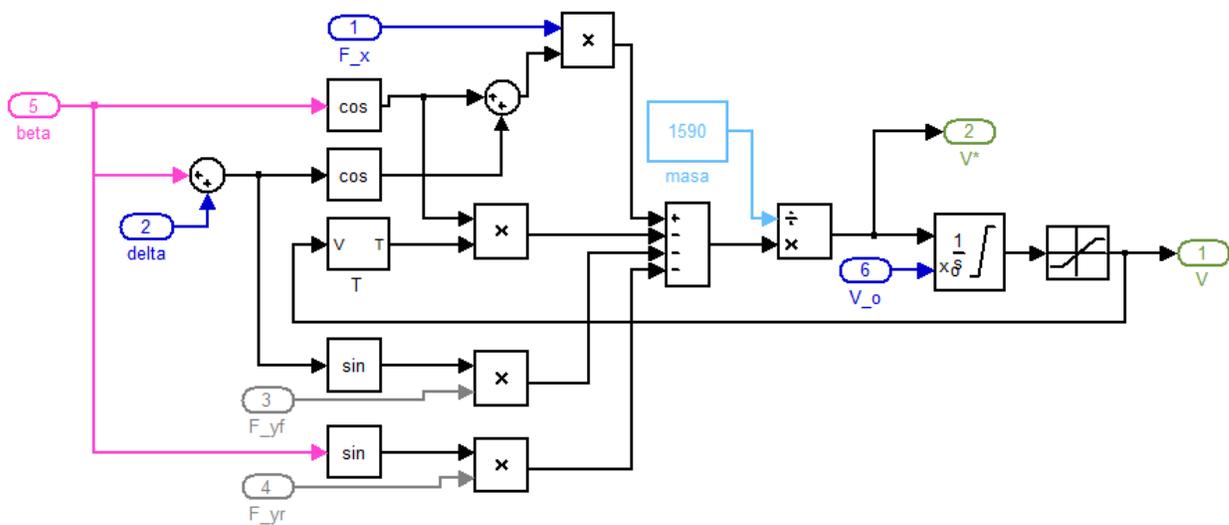


FIGURA 3-14: VELOCIDAD DEL CENTRO DE MASA

La ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** calcula el torque generado por las fuerzas tangenciales y su respectiva inercia rotacional, este torque es generado a partir de la disposición del cuerpo a girar en un eje perpendicular al plano, situado en el centro de masa de éste. A esta situación automovilísticamente se le conoce como derrape o guiñada, y el ángulo generado por el giro, con respecto al movimiento longitudinal del vehículo, se representa por la variable  $\psi$ .

La Figura 3-15 representa la implementación del sistema, y nuevamente, se implementa la evaluación de la condición inicial de la variable  $\dot{\psi}$ , obteniéndose el ángulo de partida del vehículo,  $\psi_o$ , lo que entrega al modelo dinámico la dirección y sentido en el instante cero. Cabe destacar, que el cálculo de  $I_{zz}$ , de la matriz de inercia, se realiza bajo el criterio que cada eje del automóvil posee exactamente la mitad de la masa total del mismo y están equidistantes del centro, como fue mencionado anteriormente.

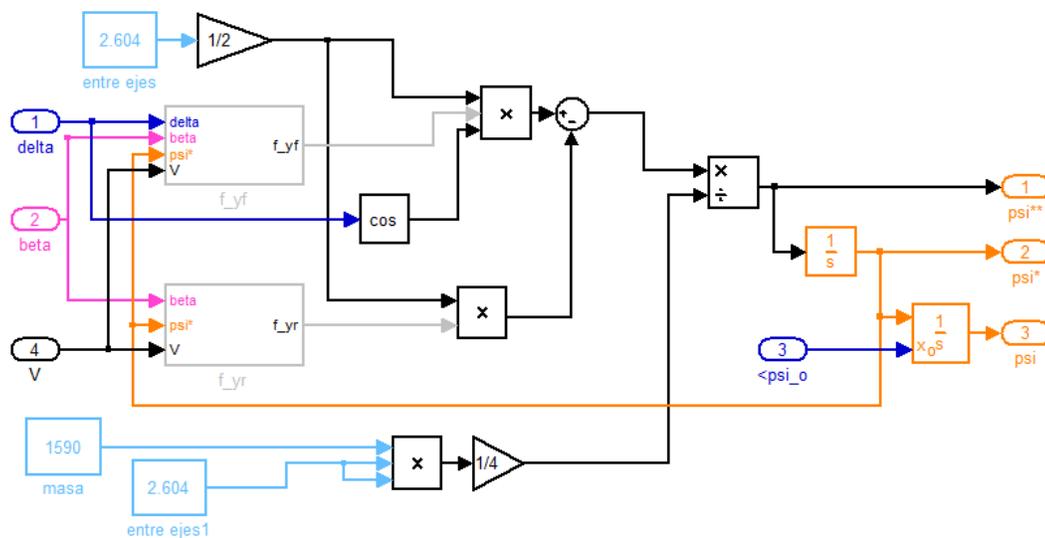


FIGURA 3-15: TORQUE DEL VEHÍCULO

Para obtener la rapidez instantánea que posee el móvil se utiliza (3.2), recurriendo a los vectores velocidad de cada uno de los ejes del vehículo, como se observó en el capítulo anterior en (2.4). Adicionalmente (3.2) integra un factor de escalamiento para entregar la velocidad del automóvil en parámetros tradicionales de esta,  $\left[\frac{\text{km}}{\text{h}}\right]$ .

$$v \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] = 3,6 \sqrt{\dot{x} + \dot{y}} \tag{3.2}$$

Para obtener el vector unitario de la velocidad del vehículo, se utilizan las (3.3) y (3.4), desprendiendo su resultado al dividir cada variable por la norma del vector velocidad. Al conocer este vector, es posible realizar la representación gráfica del vehículo, ya que este parámetro entrega la dirección y el sentido de desplazamiento del móvil, con lo cual posteriormente se confirmará la coherencia del movimiento realizado.

$$\hat{X} = \frac{\dot{X}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} \quad (3.3)$$

$$\hat{Y} = \frac{\dot{Y}}{\sqrt{\dot{X}^2 + \dot{Y}^2}} \quad (3.4)$$

En la Figura 3-16 se aprecia la implementación del radio de giro generado por el vehículo al cambiar la dirección de su trayectoria. El radio de giro interno corresponde al generado por la rueda interna de la curva realizada, así mismo el radio del centro de masa y externo corresponderían a los radios generados por el centro de masa y por la rueda externa, respectivamente. Cabe señalar que ante un movimiento realizado en línea recta por el automóvil, este no generara un radio obviamente, sin embargo, esto se puede representar matemáticamente como si el movimiento generara un radio infinito, como se puede desprender de (3.5).

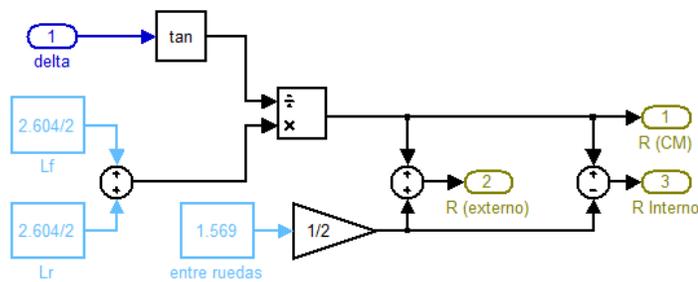


FIGURA 3-16: RADIO DE GIRO

$$R_{giro} = \frac{l_f + l_r}{\tan(\delta)} \pm \frac{a}{2} \quad (3.5)$$

con  $a = \begin{cases} +d & \text{Radio de giro externo} \\ -d & \text{Radio de giro interno} \\ 0 & \text{Radio de giro del Centro de Masa} \end{cases}$ ,

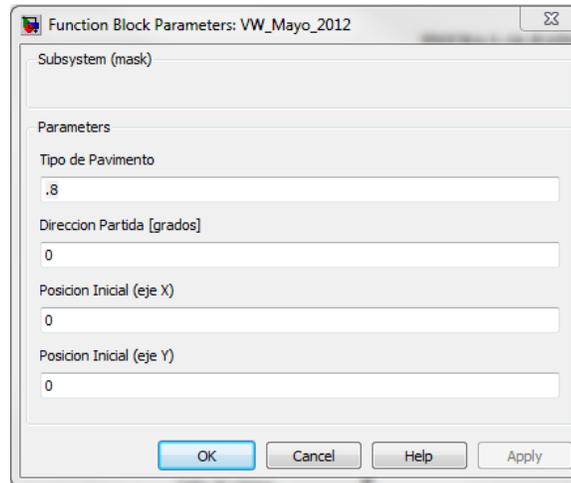
donde  $d$  corresponde a la separación entre las ruedas de un mismo eje.

El radio de giro fue generado como alternativa para el sistema de control de bajo nivel, a pesar de haber sido desechada la idea en segunda instancia [34], se decide mantenerlo presente como una opción a análisis en el futuro.

Finalmente en la Figura 3-17, se presenta la ventana de ingreso de los parámetros manipulables del modelo dinámico del vehículo. En la misma imagen, además se encuentran los parámetros que por defecto posee el modelo. Es importante señalar que los datos de posición inicial están en metros y que en la Tabla 3-3 se presentan una selección de coeficientes de roce entre el caucho y condiciones particulares de la superficie.

**TABLA 3-3: COEFICIENTES DE ROCE ENTRE NEUMÁTICOS DE CAUCHO Y DIFERENTES SUPERFICIES**

Coeficiente de Roce: Neumático-Camino	
Caucho - asfalto seco	0,8
Caucho-asfalto húmedo	0,7
Asfalto muy húmedo	0,5
Asfalto escarchado	0,3
hielo	0,1

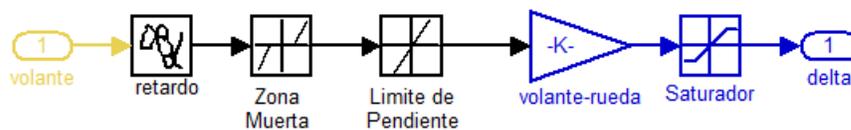


**FIGURA 3-17: PARAMETROS DEL MODELO DINÁMICO**

### 3.1.3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ACTUADORES

El bloque “Volante” es el responsable de entregar la razón de giro entre el manubrio y las ruedas del auto, expresada en la Tabla 3-1, adicionalmente también entrega la conversión entre grados y radianes, como se puede apreciar en (3.6)

$$\delta = volante \cdot \left(\frac{1}{14,7}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{180}\right) \tag{3.6}$$



**FIGURA 3-18: VOLANTE**

Es fundamental considerar que, debido a que este bloque corresponde a un actuador, debe contar con tres funciones que le den esta característica: retardo, zona muerta y limite de pendiente, como se observa en la Figura 3-18. Como no se pudieron realizar pruebas en el

automóvil, se decidió utilizar la intuición para valorar estos coeficientes, concluyendo los datos entregados en la Tabla 3-4.

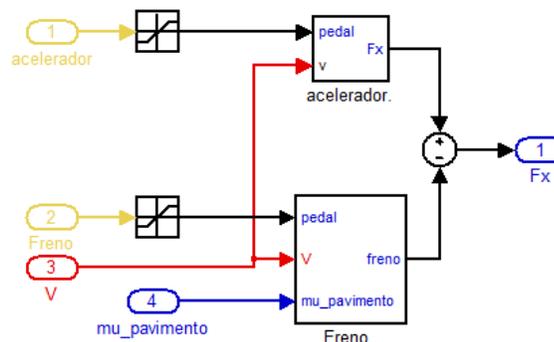
**TABLA 3-4: ACTUADOR VOLANTE**

Actuador del Volante	
Retardo	0,2 [s]
Zona Muerta	1°
Limite de Pendiente	$\left[ \frac{180^\circ}{s} \right]$

Por último, se integra un saturador para que este limite la señal de entrada al valor máximo de giro de los neumáticos.

Utilizando los datos entregados en la sección 3.1.1.1, se procede a implementar el bloque de los pedales. Este específicamente genera el valor de  $F_x$  en el modelo de bicicleta, a través de la interacción del freno y acelerador del automóvil. Esta interacción está dada por el aumento de  $F_x$  (al aumentar el valor del acelerador), o la disminución de  $F_x$  (al aumentar el valor del freno).

Es importante rescatar que los saturadores del freno y acelerador, ambos entregan rangos entre 0 y 100, ya que estos son las referencias extremas que puede tener un pedal. Consideraciones adicionales serán analizadas específicamente en cada bloque.



**FIGURA 3-19: PEDALES**

Al ser el acelerador otro actuador, también se necesita considerar que existe un retardo, una zona muerta y una tasa limite de cambio. Para obtener dichos valores, es necesario utilizar los datos obtenidos empíricamente, los que se pueden observar en las Figura 3-2, 3-3, 3-4 y 3-5.

Utilizando como patrón dichos gráficos, se procedió a encontrar la línea de tendencia que mejor representa estas 4 situaciones expresadas y luego de ello, se utilizan los datos de las Figura 3-20 y 3-21 para validar el modelo encontrado.

### Conducción Variada: Modo Sport

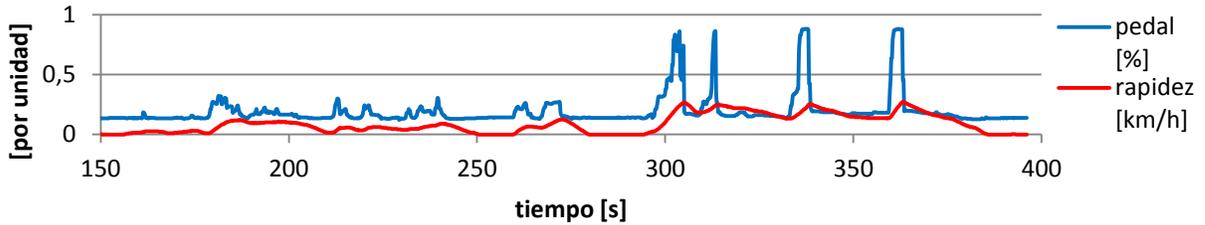


FIGURA 3-20: CONDUCCIÓN VARIADA, MODO SPORT

### Conducción Variada: Modo Normal

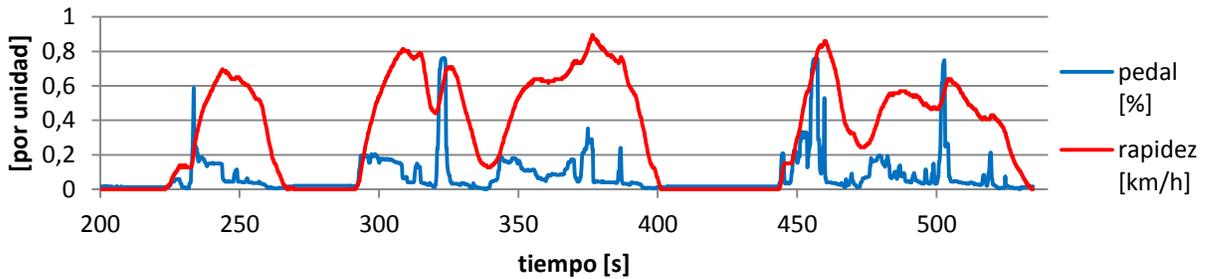


FIGURA 3-21: CONDUCCIÓN VARIADA, MODO NORMAL

Tras las pruebas realizadas, se calculan los coeficientes necesarios para igualar las reacciones virtuales y reales, obteniéndose los datos de la siguiente tabla.

TABLA 3-5: ACTUADOR PEDAL ACELERADOR

Actuador del Pedal Acelerador	
Retardo	0,4 [s]
Zona Muerta	2%
Limite de Pendiente	50 $\frac{[\%]}{[s]}$

Producto que los resultados no fueron totalmente satisfactorios en el seguimiento de las curvas, ya que su efectividad variaba para los diversos análisis, se decidió realizar la evaluación del acelerador por tramos de velocidad, imitando una caja de cambios.

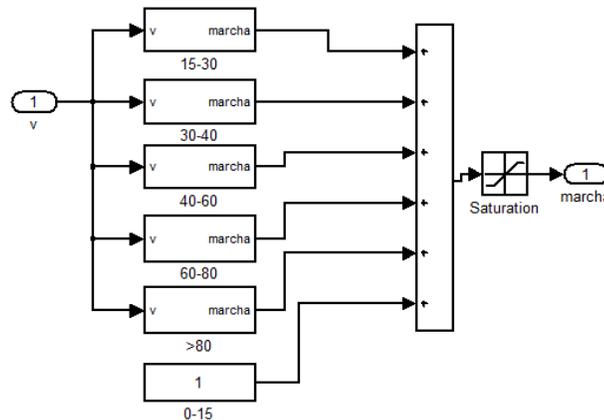


FIGURA 3-22: CAJA DE CAMBIOS

Este bloque entrega un valor entre 1 y 6, correspondiente al rango de velocidad en el que se encuentre el automóvil. En la Figura 3-23, se muestra el bloque capaz de interpretar una determinada presión en el pedal y transformarla en una fuerza de tracción determinada, dependiendo de la velocidad que posea en ese instante. Esta transformación es entregada por (3.7).

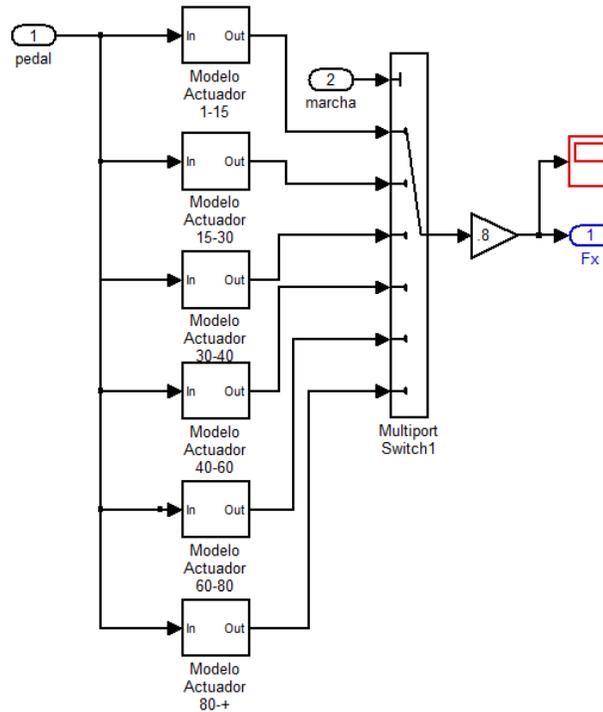


FIGURA 3-23: ACELERADOR- $F_x$

$$F_x = \begin{cases} 0,45 \cdot (6160 \cdot q)^{0,8} & \text{si } 0 < v < 15 \\ 0,45 \cdot (1960 \cdot q)^{0,8} & \text{si } 15 < v < 30 \\ 0,45 \cdot (1040 \cdot q)^{0,8} & \text{si } 30 < v < 40 \\ 0,45 \cdot (1380 \cdot q)^{0,8} & \text{si } 40 < v < 60 \\ 0,45 \cdot (940 \cdot q)^{0,8} & \text{si } 60 < v < 80 \\ 0,45 \cdot (26 \cdot q)^{0,8} & \text{si } v < 80 \end{cases} \quad (3.7)$$

Finalmente en la Figura 3-24, se aprecia el módulo de aceleración completo.

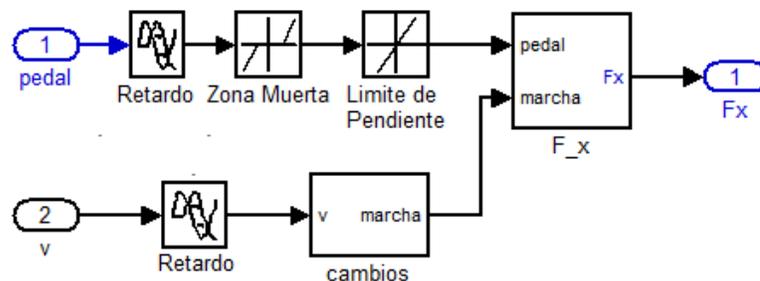


FIGURA 3-24: ACELERADOR

Como ya fue mencionado en la Sección 3.1.1.2, la relación con el pedal del freno es directa. Sin embargo, adicionalmente a la implementación de(3.1), es necesario considerar las características propias del actuador, expresados en los ya mencionados retardo, zona muerta y limitador de pendiente, como se observa en la Figura 3-25

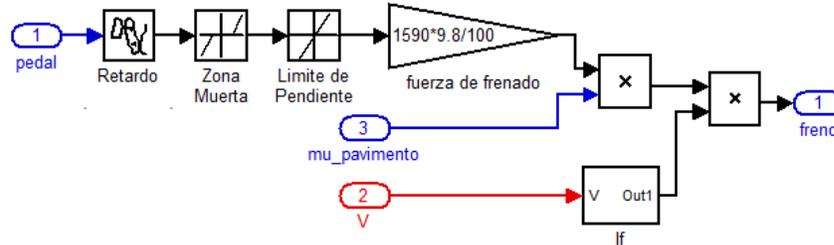


FIGURA 3-25: FRENO

TABLA 3-6: ACTUADOR, FRENO

Actuador del Freno	
Retardo	0,2 [s]
Zona Muerta	1%
Limite de Pendiente	$\left[ \frac{200\%}{s} \right]$

Otro punto importante de recalcar, es el hecho que el freno no puede reducir el valor de la velocidad por bajo de cero, es decir, producto de presionar el freno no se puede aplicar reversa. Es por ello que se incluye un bloque (denominado “if”) cuyo único fin es ignorar la presión presente en el pedal del freno y detener el vehículo cuando su velocidad sea menor a 0,001 [Km/h]

Para lograr una estandarización en la construcción del modelo dinámico, se decide implementar todos los datos y variables en unidades pertenecientes al sistema internacional. No obstante, los datos de entrada y salida del mismo se encuentran en unidades tradicionalmente utilizadas en vehículos, para una mayor facilidad en su uso posterior.

## 3.2 CONTROL DE DIRECCIÓN Y VELOCIDAD

La presente sección entrega el control de bajo nivel de velocidad y dirección, encargado de otorgar la cantidad necesaria de presión en los pedales de aceleración y freno para obtener una determina velocidad. Adicionalmente este bloque también es el responsable de generar un control para la reducción del error entre la referencia otorgada y el valor real del ángulo aplicado al volante. Este trabajo, necesario en un AGV, contribuye el paso previo a controles de nivel superior, como es el “Control Supervisor de Ruta” o el “Control de Evasión de Obstáculos en Ruta de Colisión”, que se explicarán en capítulos siguientes.

A continuación se explica el funcionamiento del Control de Dirección y Velocidad, diseñado e implementado por el Señor Felipe Cabello, como parte de su Trabajo de Título para optar a Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile [34].

Un detalle importante al momento de utilizar este control, es considerar que fue implementado en MATLAB® R2009a de 32 bits, siendo este último dato crucial, ya que este modelo no es compatible con versiones de MATLAB® de 64 bits anteriores al año 2011.

### 3.2.1 ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL

Para controlar la velocidad del vehículo se propone la estructura que se observa en la Figura 3-26. Dado que se decidió trabajar con un marco unificado de control para realizar la supervisión de un amplio intervalo de velocidades, en diferentes condiciones de terreno, se utilizará un solo controlador para lograr el seguimiento de velocidad, sin la necesidad de tener elementos independientes para realizar el Control de Asistencia en Carretera (ACC, por sus siglas en inglés) o el control en ambiente urbano (también conocido como control Stop&Go)

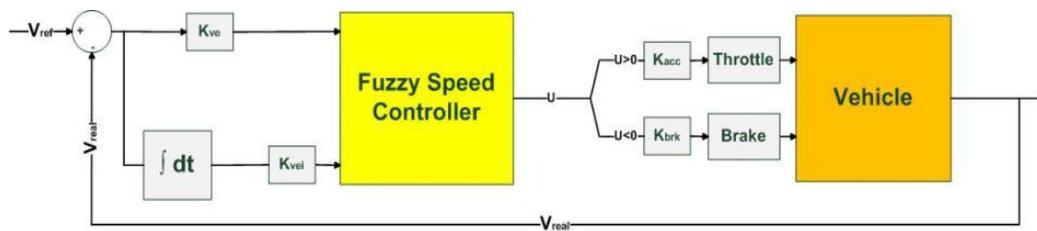


FIGURA 3-26: ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL[38]

Además, en el diseño de esta unidad, no se consideran controladores independientes para el acelerador y el freno, por lo que mediante una única señal de salida se determinará que actuador ejercerá la acción de control. Por lo tanto, para señales negativas el actuador utilizará el freno y para señales positivas el acelerador. Es importante mencionar que, en caso de existir la señal cero se considera que ninguno de los pedales está actuando. Aunque este esquema aumenta en cierta medida la complejidad del problema de control, este planteamiento es coherente con el hecho que en la práctica la aceleración y desaceleración del vehículo se realiza en la mayoría de los casos con el acelerador; exceptuando en situaciones de emergencia donde es el freno el que debe actuar.

La interacción entre los actuadores producto del esquema propuesto es un tema que deberá ser incorporado en la síntesis del controlador difuso. Teniendo en cuenta que se trata del diseño de un controlador de velocidad, los factores de acoplamiento entre la velocidad del vehículo y el ángulo de giro de las ruedas, especialmente a altas velocidades, no son considerados de manera explícita, pero resulta patente que en el caso de que sean relevantes pueden ser incorporados al sistema de control mediante reglas específicas que den cuenta de la relación entre dichas variables o pueden ser considerados en un control supervisor de más alto nivel que provea las referencias al sistema de control que aquí se propone.

### 3.2.2 CONTROLADOR DIFUSO DE VELOCIDAD

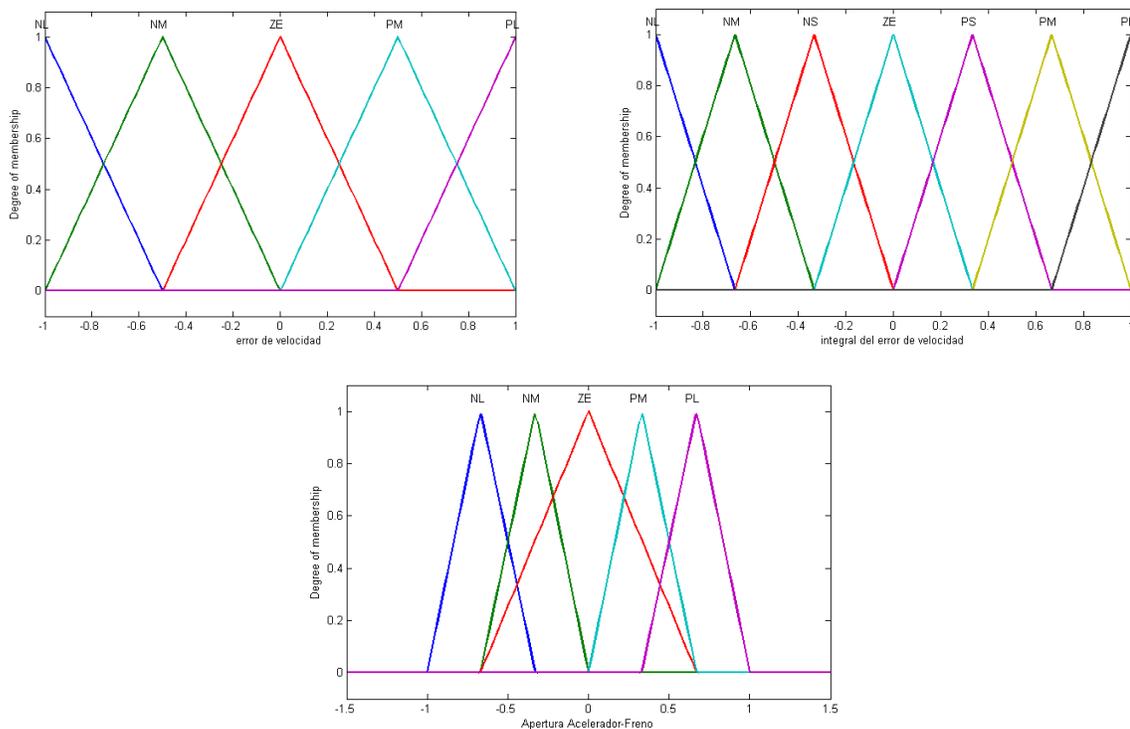
Para el diseño del controlador de velocidad del vehículo se consideran dos entradas: el error de velocidad ( $v_e$ ) y la integral del error de velocidad ( $v_{ei}$ ) definidas como:

$$v_e = v_{ref} - v_{real} \quad (3.8)$$

$$v_{ei} = \int_{t=0}^T v_e dt \quad (3.9)$$

La selección de las variables de entrada es un asunto de vital importancia en el diseño de la estrategia de control, y en este caso se seleccionaron pensando en reducir al máximo el error de la velocidad al alcanzar el régimen permanente. La salida del controlador en este caso corresponde a el porcentaje de la apertura del pedal de aceleración o el de freno, dependiendo del signo de la señal de salida como se aprecia en la Figura 3-26. Todas las variables del controlador se encuentran normalizadas y tienen un recorrido universal en el intervalo [-1 , 1].

Las funciones de pertenencia de todas las variables son triangulares. La elección de este tipo de funciones de pertenencia se basa en el hecho de que las funciones de este tipo son fácilmente implementables, sencillas de ajustar y optimizar.



**FIGURA 3-27: FUNCIONES DE PERTENENCIA DEL CONTROLADOR DIFUSO DE VELOCIDAD[38].**

Para el controlador diseñado se escogieron cinco conjuntos difusos para el error de velocidad y la salida del controlador, que incluían NL (negative large), NM (negative medium), ZE (zero), PM (positive medium) y PL (positive large); y siete para la integral del error, incluyendo los mismos cinco mencionados antes más NS (negative small) y PS (positive small), como se observa en la Figura 3-27. Cabe destacar, que en el diseño de las funciones de pertenencia de salida la variable lingüística ZE se traslapa de manera considerable con las variables lingüísticas NM y PM, esto es dado que la salida es única y según su signo se selecciona si se presiona el pedal de aceleración o el de freno, evitar que hayan constantes cambios de signos en la señal de salida, lo que se traduciría en alternar frecuentemente entre el

acelerador y el freno, impidiendo un conducción suave y aumentando el consumo de combustible.

La base de reglas propuestas está compuesta de 35 reglas simples, como se visualiza en la Tabla 3-7, las cuales apuntan a lograr un correcto seguimiento de velocidad, emulando el comportamiento de un conductor humano.

TABLA 3-7: BASE DE REGLAS DE CONTROLADOR DIFUSO DE VELOCIDAD [38]

		$v_{ei}$						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$v_e$	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NM	ZE
	NM	NL	NL	NM	NM	NM	ZE	PM
	ZE	NM	NM	ZE	ZE	ZE	PM	PM
	PM	NM	ZE	PM	PM	PM	PL	PL
	PL	ZE	PM	PL	PL	PL	PL	PL

Para el diseño de este controlador se utilizó la inferencia de Mamdani, considerándose la función MAX para la combinación de los consecuentes y el método del centro de gravedad para el proceso de defusificación.

Las funciones de pertenencia de las variables del controlador, al igual que los factores de normalización y desnormalización fueron ajustados preliminarmente en base a información provista por fabricantes de automóviles y conductores expertos, siendo posteriormente ajustados según los resultados obtenidos en las pruebas a fin de mejorar el desempeño del controlador.

### 3.2.3 CONTROLADOR DIFUSO DE DIRECCIÓN.

Como es habitual en el diseño de los controladores, las variables de entrada del controlador difuso tienen relación con la variable controlada del sistema, que en el caso del movimiento lateral del vehículo corresponde al ángulo  $\delta$  de las ruedas delanteras. Por otra parte, la variable de salida del controlador difuso tiene relación con la variable manipulada del sistema, en este caso es natural considerar el ángulo del volante [34]. Es importante recordar que la relación entre el ángulo del volante y ángulo de la rueda es lineal, como lo muestra la(3.6),

Al igual que en la mayoría de los casos, se decide monitorear el error formado por la diferencia existente entre el ángulo referencial de las ruedas y su valor real, como muestra (3.10), donde  $\delta_{ref}$  es la referencia de ángulo del sistema,  $\delta_{real}$  es el ángulo real del sistema y  $\delta_e$  es el error entre estos 2 ángulos.

$$\delta_e = \delta_{ref} - \delta_{real} \tag{3.10}$$

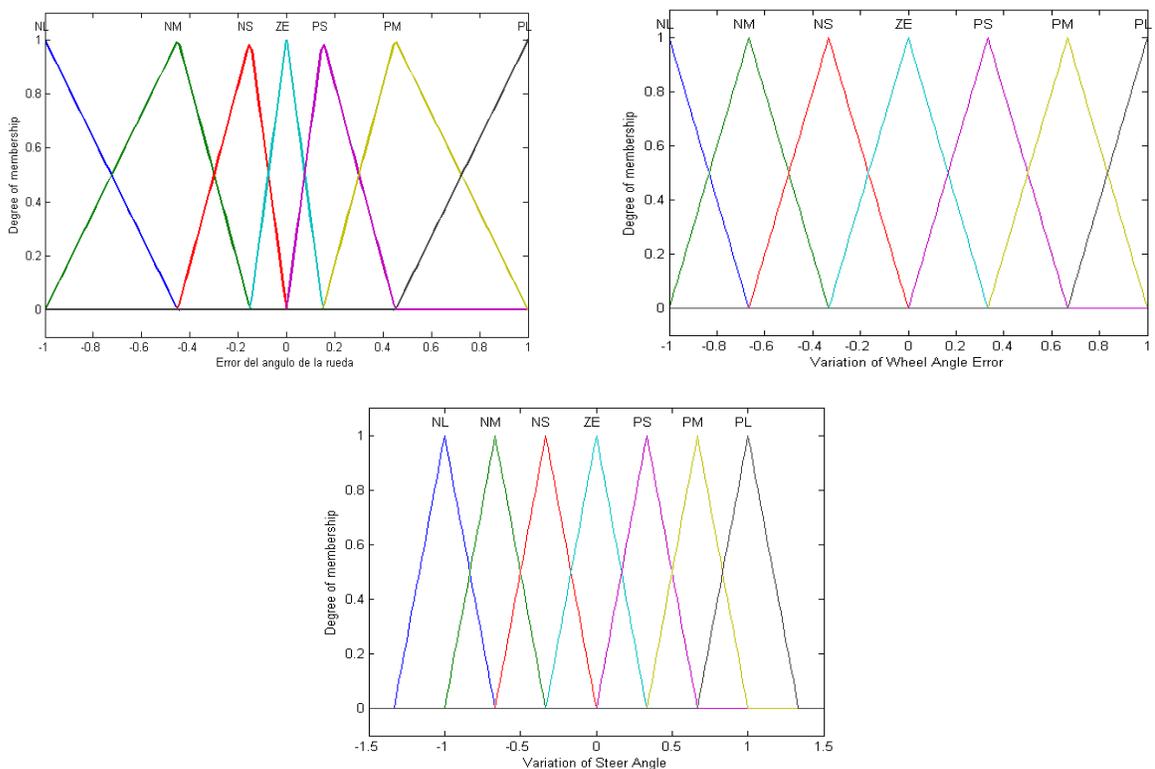
Como segunda variable de entrada al controlador de dirección, se escoge la variación del error de ángulo de las ruedas que se define de la siguiente forma:

$$\delta_{ed} = \Delta\delta_e = \delta_e(k) - \delta_e(k-1) \tag{3.11}$$

Considerando las características poco intuitivas de los conjuntos difusos asociados al error de ángulo en las ruedas, la definición de estos se realiza tomando como referencia la información publicada en trabajos previos que abordan esta problemática y fundamentalmente al conocimiento aportado por conductores expertos a través de pruebas empíricas.

En el caso de la segunda variable de entrada, se observa que ésta presenta aparentemente menos dificultades que el error de ángulo para la definición de sus conjuntos difusos. Físicamente la variación del ángulo de las ruedas se asocia con la velocidad angular con que las ruedas se mueven, sin embargo, la variación angular de las ruedas no es una variable medida, por lo que no se dispone información directa que permita establecer los conjuntos difusos. Luego, la definición del rango de valores se debe realizar a partir de información indirecta o mediante la realización de pruebas empíricas

En la Figura 3-28 se observan las funciones de pertenencia del controlador difuso de dirección, donde las 3 funciones están compuestas por 7 conjuntos, denominados: Negativo Grande (NL), Negativo Mediano (NM), Negativo Pequeño (NS), Cero (ZE), Positivo pequeño (PS), Positivo Mediano (PM) y Positivo Grande (PL). Finalmente en Tabla 3-8 se entregan la base de reglas para el controlador.



**FIGURA 3-28: FUNCIONES DE PERTENENCIA DE CONTROLADOR DIFUSO DE DIRECCIÓN [34].**

**TABLA 3-8: MAPA DE REGLAS PARA EL CONTROL DIFUSO DE DIRECCIÓN [34]**

$\Delta u$		$\Delta \delta_e$						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$\delta_e$	NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
	NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
	NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
	ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
	PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
	PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

### 3.3 CONTROL SUPERVISOR DE RUTA DEL VEHÍCULO

El control supervisor corresponde al módulo que entrega la dirección de alto nivel del AGV, siendo el bloque encargado de guiar al vehículo por una determinada trayectoria, con el fin de alcanzar una posición final conocida. Esta tarea corresponde al trabajo de título de un alumno del departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de Chile, teniendo como fecha de término fines del semestre primavera del año 2012. Producto que este módulo es fundamental para el control de evasión de obstáculos, se decide construir de una manera sencilla y solo como apoyo para probar el control evasor, dejando como tarea futura su implementación efectiva.

Para lograr conducir el móvil, el control se alimentará de la información de estados del vehículo y con ello controlará, en una primera instancia, el ángulo de giro del volante. Adicionalmente este control deberá ser capaz de calcular la modificación que se requiere efectuar en dicho ángulo, considerando la velocidad del vehículo, para con ello asegurar una conducción suave y segura. Finalmente, el control de alto nivel, deberá estimar la velocidad propicia para trasladarse en una ruta determinada, modificando no solo el volante, sino también la referencia de la velocidad, con el fin de construir el desplazamiento óptimo del vehículo. Este último punto no es parte integral de este documento.

#### 3.3.1 DISEÑO DE LA ESTRATEGIA DE CONTROL

Para implementar el control de seguimiento de trayectoria se calcula el ángulo  $\alpha$  que se genera entre el vector que define localmente la trayectoria deseada y la recta formada entre el centro de masa del vehículo y un punto a 100 metros de éste, sobre la trayectoria, como muestra la Figura 3-29. Es importante recordar que el ángulo  $\psi$  corresponde al ángulo generado entre el vector velocidad del vehículo y el eje X absoluto, mientras que el ángulo  $\theta$  representa a la pendiente de la ruta realizada con respecto al mismo eje.

Se define al par ordenado  $(\bar{X}, \bar{Y})$  como el centro de masa del vehículo, el cual será conocido; y el punto  $(100_x, 100_y)$  como el punto de contacto entre la prolongación del centro de masa sobre la ruta deseada a 100 metros de distancia. También es conocido el punto de inicio del vehículo, así como su dirección de partida (ángulo  $\Psi_0$ ). La trayectoria se iniciará en el origen del eje coordenado, y tendrá una pendiente conocida  $\theta$ .

Siendo conocido el origen de la trayectoria y la pendiente, se puede definir un vector  $\vec{T}$  que entregue la dirección de propagación del camino deseado, siendo de la forma:

$$\vec{T} = [1, m(\theta)]^T \quad (3.12)$$

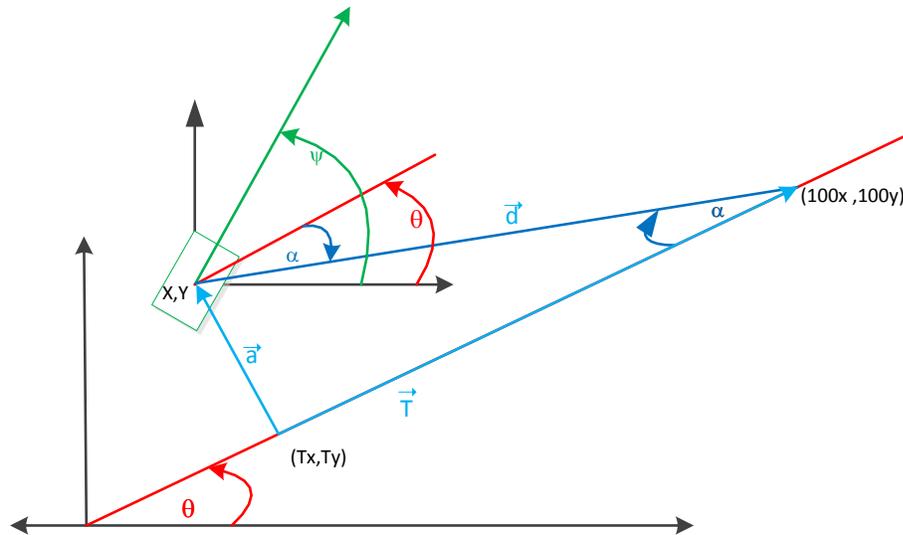


FIGURA 3-29: CONTROL SUPERVISOR

Se define como vector desplazamiento al generado desde el centro de masa del vehículo a un punto a 100 metros de distancia sobre la trayectoria,  $(100_x, 100_y)$ . Siendo de la forma:

$$\vec{d} = [100_x - \bar{X}, 100_y - \bar{y}]^T \quad (3.13)$$

donde  $|\vec{d}| = 100 [m]$ <sup>4</sup>

Finalmente, utilizando el teorema de Pitágoras, fácilmente se puede calcular los valores del punto  $(100_x, 100_y)$  conociendo el origen arbitrario  $(X_0, Y_0)$

$$100_x = X_0 + 100 \cos(\theta) \quad (3.14)$$

$$100_y = Y_0 + 100 \text{sen}(\theta). \quad (3.15)$$

Para que el punto  $(100_x, 100_y)$  tenga coherencia a lo largo de la ruta, es fundamental conocer el par ordenado  $(X_0, Y_0)$ . Para ello, se define el vector  $\vec{a}$ , como la magnitud generada entre el centro de masa del vehículo y el punto más cercano de la trayectoria a él, denominado  $(T_x, T_y)$ , según se observa en la Figura 3-39.

$$\vec{a} = [\bar{X} - T_x, \bar{Y} - T_y]^T \quad (3.16)$$

La obtención de  $(T_x, T_y)$ , se realiza utilizando un sistema de ecuaciones con la ecuación general de la recta (3.17), como se muestra a continuación:

<sup>4</sup> Se define  $|\vec{d}| = 100 [m]$ , dado que es la mínima distancia de visión de los sensores.

$$y = m(x - x_0) + y_0 \quad (3.17)$$

Si  $m(\theta)$  es la pendiente de la trayectoria, entonces la pendiente de  $\vec{a}$  será  $-\frac{1}{m(\theta)}$ , luego:

$$\left. \begin{aligned} T_y &= m(T_x - 0) + 0 \\ T_y &= \frac{-1}{m} (T_x - \bar{X}) + \bar{Y} \end{aligned} \right\}$$

por lo tanto:

$$T_x = \left( \frac{\bar{x}}{m} + \bar{y} \right) \frac{m}{1 + m^2} \quad (3.18)$$

$$T_y = \left( \frac{\bar{x}}{m} + \bar{y} \right) \frac{m^2}{1 + m^2}. \quad (3.19)$$

Una vez obtenido el punto móvil  $(T_x, T_y)$  y conocido el centro de masa del vehículo, fácilmente se puede calcular el ángulo  $\alpha$ , a través de trigonometría:

$$|\alpha| = \arcsen\left(\frac{|\vec{a}|}{|\vec{d}|}\right) \quad (3.20)$$

El problema acarreado de calcular de esta forma dicho ángulo, es que solo se obtiene su módulo, y por ende no es posible conocer a qué lado de la trayectoria se encuentra el móvil. Para solucionar este dilema, tan solo es necesario calcular el producto cruz entre los vectores  $\vec{a}$  y  $\vec{T}$ , como se observa en la Figura 3-30, estos vectores son perpendiculares y por ende su resultado solo entregara una componente, siendo el signo de ésta el signo correspondiente del ángulo  $\alpha$ .

$$\text{signo}(\alpha) = \text{signo}(\vec{a} \times \vec{T}) \quad (3.21)$$

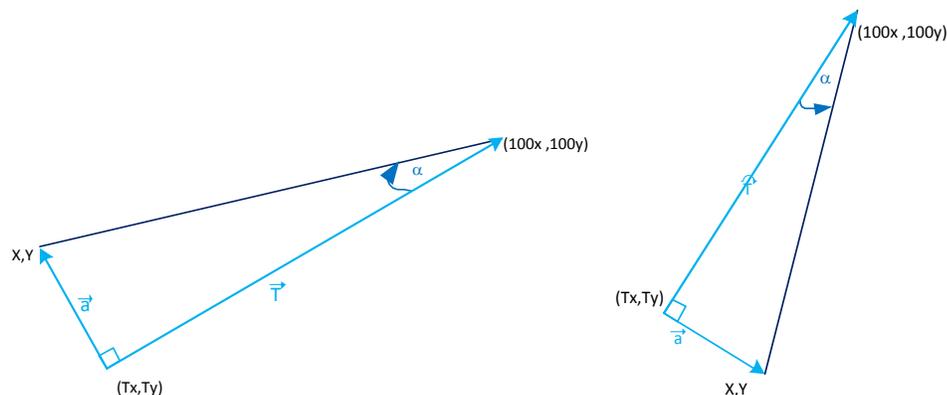


FIGURA 3-30: OBTENCIÓN DE MÓDULO DE  $\alpha$  Y SIGNO

Finalmente, se planea que el centro de masa del vehículo se dirija en dirección a la ruta deseada, alcanzándola en un punto a 100 metros de distancia denominado  $(100_x, 100_y)$ . Para ello se fuerza a que el centro de masa del vehículo se dirija a dicho punto, esto es conseguido evaluando el ángulo formado entre el vector velocidad del vehículo ( $\psi$ ) y la pendiente de la ruta a

la que desea converger ( $\theta$ ), y restando a esta magnitud el ángulo  $\alpha$  antes calculado, como se observa en la Figura 3-31. Obtenido este resultado es posible determinar la dirección, con respecto al sistema coordenado, que debe desarrollar el AGV para converger a la ruta establecida. Al ángulo que determina la dirección de desplazamiento del centro de masa en el modelo dinámico expuesto en la sección (2.2) y observado en la Figura 2-3, se le determina como ángulo  $\beta$ , luego en (3.22) se expone el valor que  $\beta_{new}$  debe poseer para el desplazamiento requerido en función de las variables antes expuestas.

$$\beta_{new} = (\psi - \theta) - \alpha \quad (3.22)$$

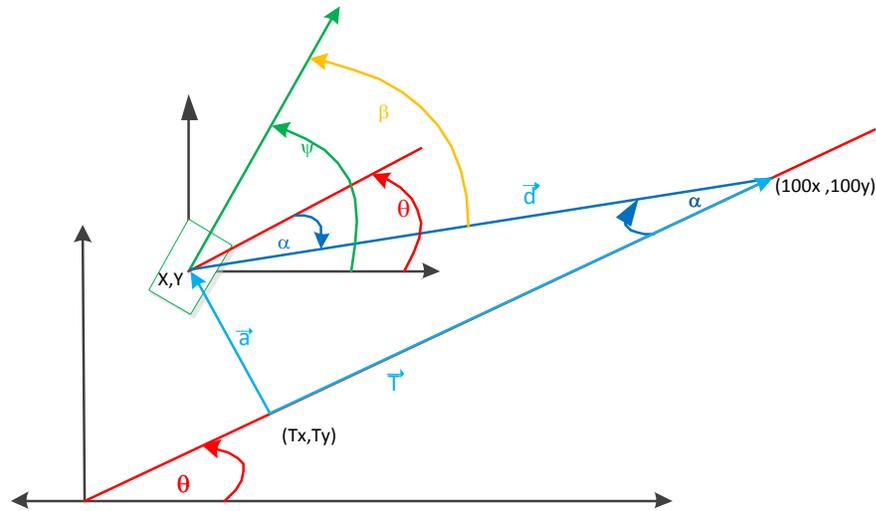


FIGURA 3-31: OBTENCIÓN DE ÁNGULO  $\beta$

Para poder dirigir el centro de masa del vehículo en este ángulo requerido ( $\beta_{new}$ ), se requiere conocer el ángulo de giro del volante (ángulo  $\delta$ , del modelo dinámico, Figura 2-3) que permite obtenerlo, para ello se utiliza la ecuación (2.5) que entrega la fuerza lateral de la rueda delantera. Luego el ángulo  $\delta_{new}$  de las ruedas que se necesita es:

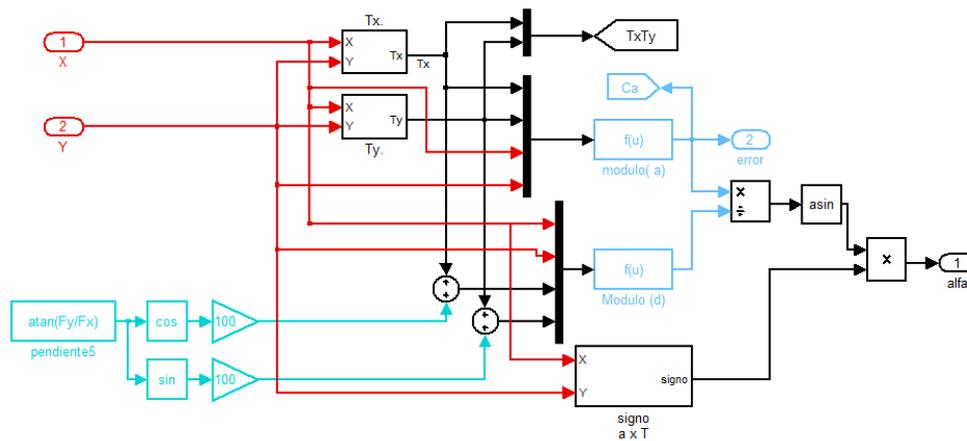


FIGURA 3-32: BLOQUE  $\alpha$

$$\delta_{new} = \frac{F_{yf}}{C_f} - \beta_{new} + \frac{l_f}{v} \dot{\psi} \quad (3.23)$$

### 3.3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL SUPERVISOR

En la Figura 3-32 se ilustra la implementación del ángulo  $\alpha$ , utilizando (3.20) y (3.21), es importante acotar que se define como error del sistema a la diferencia existente entre el centro de masa del vehículo y su punto más cercano a la trayectoria deseada  $(T_x, T_y)$ , definido como el modulo del vector  $|\vec{a}|$ .

Al utilizar el control diseñado en la sección anterior, se generan problemas en la convergencia del sistema, como se observa en la Figura 3-33, el error comienza a aumentar a medida que avanza el tiempo. Observando la Figura 3-34, es claro que en los primeros 20 segundos intenta converger en la ruta, sin embargo el valor ingresado al volante es tan alto que tras alcanzar la ruta, alcanzando un mínimo error, este continua en dicha dirección no logrando converger.

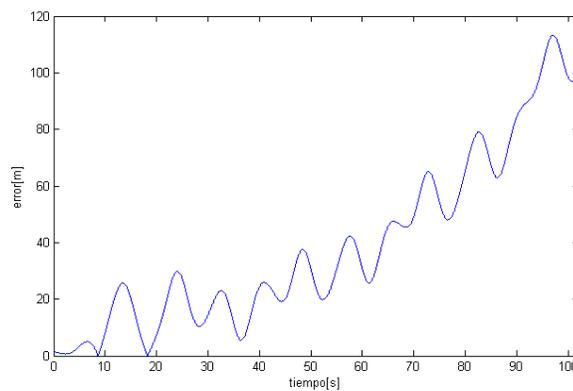


FIGURA 3-33: ERROR DE CONVERGENCIA, CONTROL SIN GANANCIA

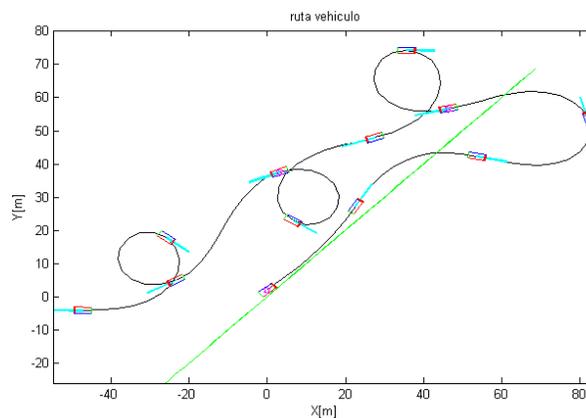
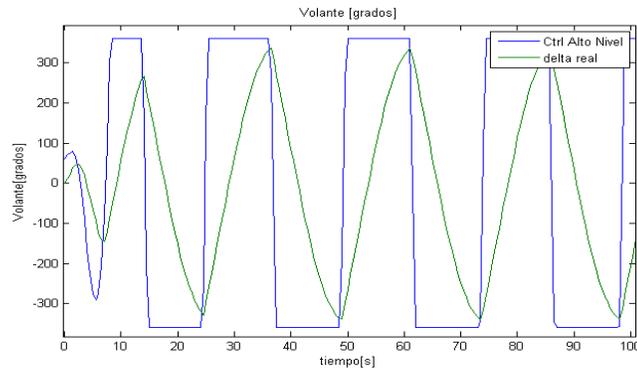


FIGURA 3-34; RUTA SIN CONTROL DE GANANCIA (TOMA DE MUESTRA CADA 10 SEGUNDOS)

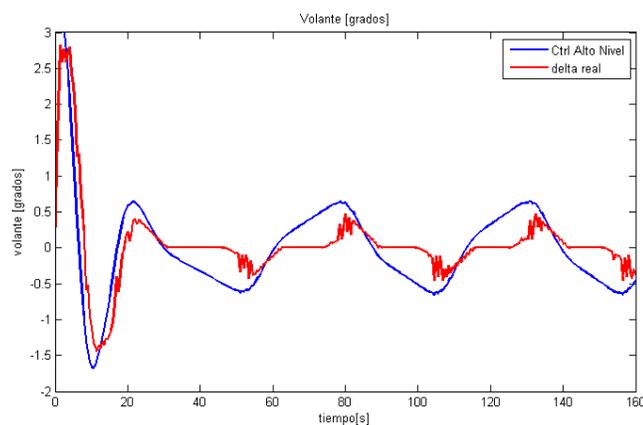
La ruta posterior al segundo 40 confirma este análisis, ya que tras divergir del camino deseado, este comienza a realizar bruscos giros intentado alcanzar nuevamente la ruta, fallando en este cometido producto del elevado valor de la señal entregada al ángulo del volante.

La Figura 3-35, muestra el comportamiento del volante, confirmando que las ordenes entregadas a él son extremadamente elevadas tras pasado solo 5 [s], luego de lo cual adquiere el valor máximo permitido únicamente alternando el signo sin modificar su magnitud. Por otra parte se observa en color verde como el vehículo intenta alcanzar dichas órdenes, a pesar de su extremadamente alto valor, no teniendo el tiempo suficiente para alcanzarlas y finalmente divergiendo del esperado valor cero de error.



**FIGURA 3-35: VOLANTE CONTROLADO SIN GANANCIA<sup>5</sup>**

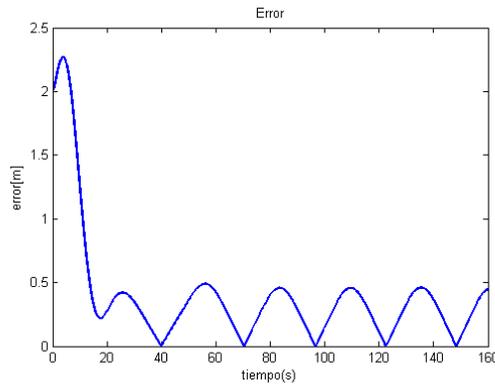
Para solucionar este problema, se decidió implementar una ganancia en el controlador que redujera el valor aplicado al ángulo del volante. Este valor se calculó empíricamente, evaluando la ruta realizada y la reducción del error, con lo que se obtiene satisfactorios resultados. Al observar la Figura 3-36 se aprecia cómo, gracias a esta nueva ganancia, el valor entregado al ángulo del volante corresponde a valores coherentes con respecto a la experiencia de conductores.



**FIGURA 3-36: VOLANTE CONTROL SUPERVISOR CON GANANCIA.**

<sup>5</sup> El valor  $\delta$  es normalizado utilizando la relación existente entre el volante y el ángulo de las ruedas, para poder conseguir una escala comparativa entre las diferentes variables gráficamente.

La Figura 3-37, entrega el valor del error del móvil. Observándose claramente como este converge en la ruta en menos de 20 [segundos], oscilando tras esto en ella con un período de prácticamente 1 [minuto], y una amplitud no superior a los 50 [cm] con respecto a la ruta trazada. Importante es señalar que el vehículo inicia su viaje a 2 [m] de distancia de la trayectoria, con un ángulo de partida de  $3^\circ$  con respecto a la misma y una velocidad constante de  $30 \left[ \frac{km}{h} \right]$ .



**FIGURA 3-37: ERROR DEL CONTROL SUPERVISOR CON GANANCIA**

La ruta observada en la Figura 3-38, revela que una oscilación completa la realiza el móvil en aproximadamente 500 [m] longitudinales. Según la norma de Vialidad Urbana, del ministerio de Vivienda y Urbanismo [39], una ruta local y troncal debe poseer como mínimo un ancho de 7 [m] para 2 pistas en doble sentido, sin embargo a medida que la velocidad aumenta este ancho debe aumentar. En promedio las rutas urbanas poseen un ancho cada una de 3,75 [m], considerando esto se obtiene que el error de convergencia del control supervisor es de 13,3%, luego con ello se confirma que el vehículo no traspasa la línea de la calzada, aun en una vía con el mínimo de ancho permitido.

Un ejemplo práctico y sencillo para la comparación del comportamiento del vehículo es el hecho que entre la Avenida Beauchef y la calle Plaza Ercilla existe una distancia de 300[m], siendo 245[m] el largo de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile<sup>6</sup>, además una cuadra promedio mide entre 100 a 150 [m]. Con ello se reafirma, la coherencia del control supervisor a  $30 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , sin embargo a velocidades diferentes la convergencia no es tan rápida ni acotada. Por esta razón, se repite la experiencia para un rango acotado de valores, en primera instancia el AGV en construcción éste no deberá realizar recorridos superando los  $40 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , luego se repite la experiencia para valores inferiores a  $50 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , disminuyendo la velocidad en  $10 \left[ \frac{km}{h} \right]$  por vez, obteniéndose los valores observados en la Tabla 3-9.

<sup>6</sup> Datos obtenidos a través de Google Earth.

TABLA 3-9: GANANCIAS POR VELOCIDAD DEL CONTROL SUPERVISOR DE RUTA.

Velocidad $\frac{km}{h}$	Ganancia
10	0.17
20	0.13
30	0.09
40	0.05
50	0.05

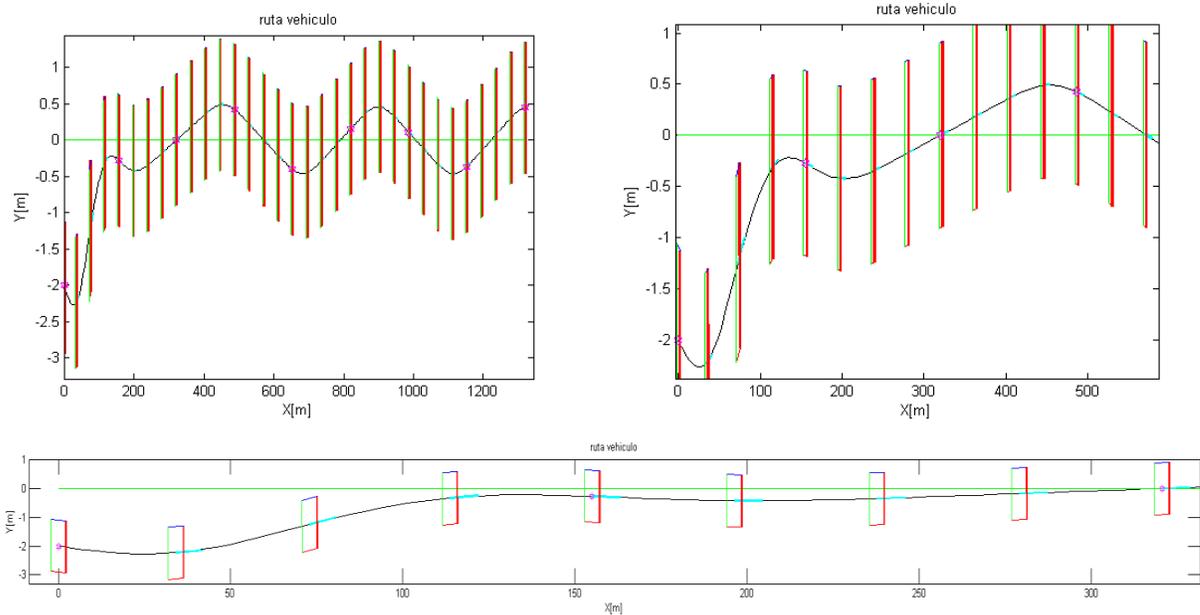


FIGURA 3-38: RUTA CONTROLADA CON GANANCIA

Para poder conocer el rango completo de velocidades se utilizan los datos calculados en la Tabla 3-9, y se realiza una aproximación polinomial de la forma:

$$gain = K + \frac{C_1}{v} + \frac{C_2}{v^2} + \frac{C_3}{v^3} \quad (3.24)$$

obteniéndose el siguiente resultado:

$$gain = -0.19 + \frac{14}{v} - \frac{200}{v^2} + \frac{960}{v^3} \quad (3.25)$$

donde el valor obtenido por la ganancia oscila, disminuyendo a medida que aumenta la velocidad, entre los valores 0,17 y 0,05.

Finalmente en la Figura 3-39, se observa la implementación en ambiente de MATLAB®-Simulink del control supervisor. En esta ocasión no se utilizan las unidades pertenecientes al sistema internacional de medida, para poder ser coherentes con la adquisición de datos y la respectiva implementación de estos en el modelo los que están en diferentes sistemas de medida.

La Figura 3-40 presenta el bloque de parámetros. Cabe señalar que el único dato a entregar al control supervisor corresponde a la pendiente, entregada por las coordenadas finales del recorrido.

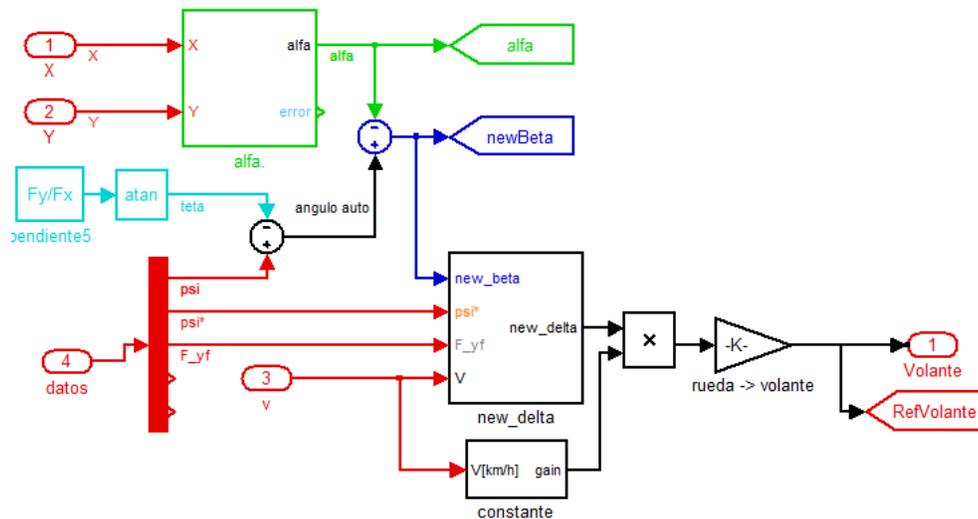


FIGURA 3-39: CONTROL SUPERVISOR DE RUTA

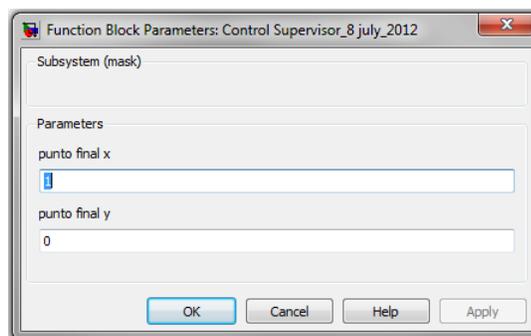


FIGURA 3-40: PARÁMETROS DEL CONTROL SUPERVISOR DE RUTA

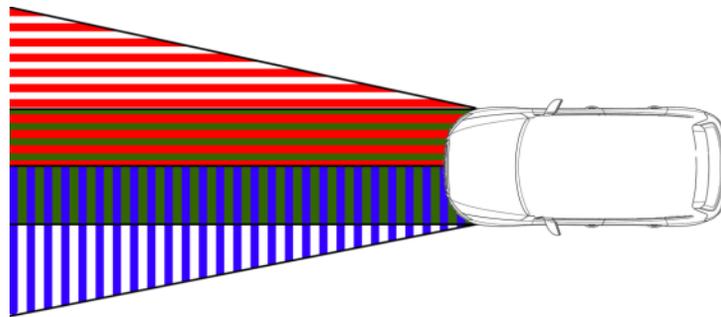
### 3.4 DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS

Para poseer un control supervisor de ruta y contar con una estrategia eficaz de control de evasión de obstáculos, es necesario contar con una estrategia que entreguen una ruta factible y detecte la presencia de potenciales objetos en el camino. Para ello, el AMTC ha integrado diversos dispositivos en busca de la detección de caminos y objetos; abarcando laser, cámaras digitales y radares enumerados en en la Tabla 3-10. Sin embargo, esta amplia gama de sensores aún se encuentran en estudio y desarrollo, por lo tanto, para la detección de objetos en el presente trabajo, es necesario diseñar una estrategia asumiendo que existe la posibilidad de interpretar la información entregada por los sensores que se instalaran en el AGV. Ésta esta compuesta por 3 áreas en frente del vehículo, según se muestra en la Figura 3-41, donde las áreas achuradas corresponden a los flancos (derecho en rojo, izquierdo en azul), mientras que el área sombreada, en verde, corresponde al zona centro. Es importante notar que el centro corresponde a un caso

particular de cada flanco, como se observa en la misma figura, no existiendo un área exclusiva para el centro.

**TABLA 3-10: DISPOSITIVOS EMPLEADOS EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS DE RUTA.**

Dispositivo	Característica
LADAR SICK LD-MRS 400102K HD SCANNER	ángulo de 85° 4 capas Alcance de 250 [m]
LADAR SICK LMS151-10100K SCANNER LASER OUTDOOR	Scanner de medición láser ángulo 180°, resolución 0.25° Alcance de 80 [m]
RADAR Delphi ESR[40]	Largo Alcance: rango 174 [m] ±10° Corto Alcance : rango 60 [m] ±45°
IMU Crossbow NAV440[41]	GPS y aGPS Acelerómetro y Giroscopios
Cámara MANTA G-046 [42]	Resolución: 780 x 580 píxeles Velocidad de Captura: 67 img/s Tamaño de píxel: 8.3µm Velocidad de transmisión de hasta 125 Mbyte/s



**FIGURA 3-41: REPRESENTACIÓN GRAFICA DEL SENSOR VIRTUAL.**

El objeto se define como una función de distribución Gaussiana bivaluada, o de variables conjuntamente Gaussianas, de la forma:

$$f_{XY}(x, y) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y 2\pi \sqrt{1 - \rho^2}} e^{\left( -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[ \frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x \sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right)} \quad (3.26)$$

Con cada componente Gaussiana de la forma  $X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$  e  $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y)$ , donde

$$\rho = \frac{E\{(X - \mu_x)(Y - \mu_y)\}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.27)$$

Se define el coeficiente de correlación  $\rho = 0$ , lo que permite facilitar el análisis de la obstrucción al no existir una relación lineal entre las variables [43].

Para simplificar el objeto detectado se considera éste como una circunferencia y no como una elipse, utilizando la mayor desviación estándar entre ambas componentes como radio, según muestra la Figura 3-42.

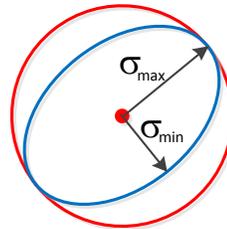


FIGURA 3-42: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA BIVARIADA

Además, gracias a la característica de la suma de distribución Gaussiana, si se detecta más de un objeto contiguo en el camino, esto equivaldría a una nueva función de la forma:

$$X + Y \sim N\left(\mu_x + \mu_y, \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}\right) \quad (3.28)$$

donde  $X \sim N(\mu_x, \sigma_x)$  e  $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y)$ , considerándose esta nueva función como el obstáculo en el camino, como se observa en la Figura 3-43.

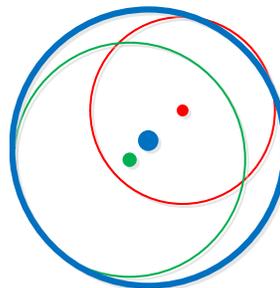


FIGURA 3-43: SUMA DE FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA.

Se sabe de la literatura [44], y como se observa en la Figura 3-44, que en el intervalo de  $3\sigma$  (3 desviaciones estándar) se posee un 99,9% de posibilidad de contener el objeto. Luego se decide que el móvil debe evadir un obstáculo circular de centro en  $(\mu_x, \mu_y)$  y de radio  $3\sigma$ , asegurando casi en un 100% que no existirá colisión con el objeto.

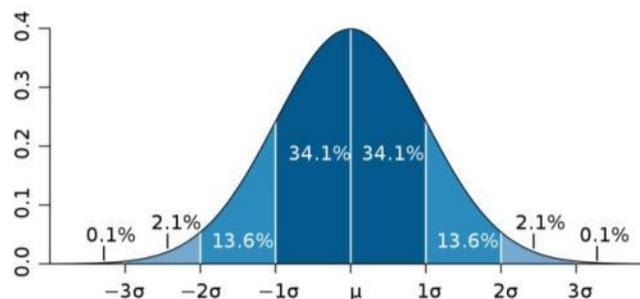


FIGURA 3-44: FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN GAUSSIANA.

Para obtener la distancia lateral  $D_L$  al objeto, se traza una recta entre el centro de masa del vehículo y el centro de la obstrucción, definiendo a esta distancia menos el largo del auto y el rango de seguridad ( $3\sigma$ ) como la distancia lateral entre el vehículo y el obstáculo.

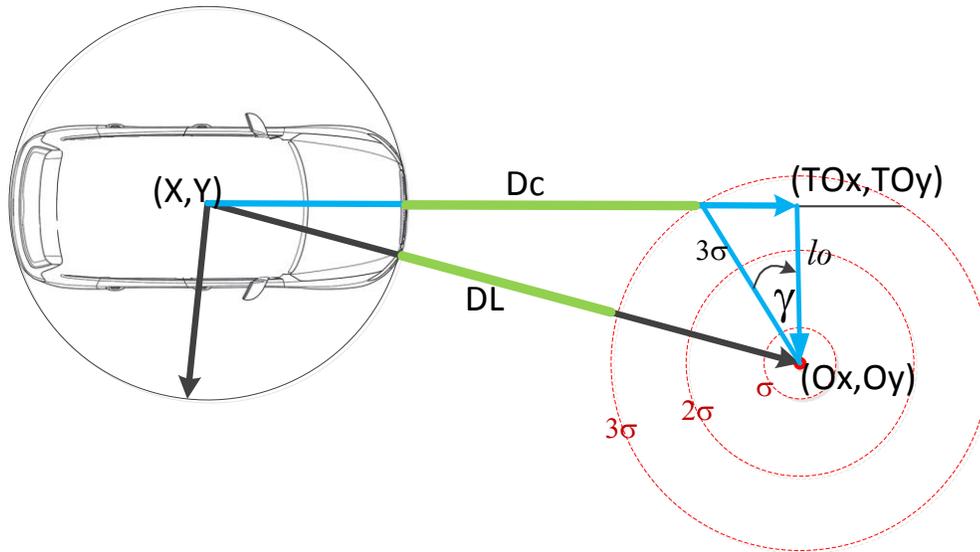


FIGURA 3-45: OBJETO DETECTADO AL CENTRO Y DERECHA DEL VEHÍCULO

$$D_L = \sqrt{(O_x - \bar{X})^2 + (O_y - \bar{Y})^2} - l_f - 3\sigma \quad (3.29)$$

Del mismo modo, para calcular la distancia central al obstáculo, se proyecta el centro de masa del móvil y el centro del obstáculo de tal forma que generen una perpendicular entre ambos, en el punto  $(T O_x, T O_y)$ . Luego  $D_c$  corresponderá a la distancia entre el punto perpendicular, antes mencionado, y el centro del móvil, menos el largo del móvil y la distancia de seguridad, como se observa en (3.30):

$$D_c = \sqrt{(T O_x - \bar{X})^2 + (T O_y - \bar{Y})^2} - l_f - 3\sigma * \text{sen}(\gamma) \quad (3.30)$$

donde,

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_0}{3\sigma}\right) \quad (3.31)$$

y

$$l_0 = \sqrt{(O_x - T O_x)^2 + (O_y - T O_y)^2}. \quad (3.32)$$

Finalmente para definir el lado al que se encuentra el obstáculo, se calcula el producto cruz entre las proyecciones, obteniéndose:

$$\begin{aligned} \text{lado} &= \text{signo}(\vec{l}_0 \times \vec{D}_c) \\ &= \text{signo}((O_x - T O_x)(T O_y - \bar{Y}) - (O_y - T O_y)(T O_x - \bar{X})) \end{aligned} \quad (3.33)$$

luego:

$si\ lado \geq 0 \Rightarrow Izquierda$

$si\ lado < 0 \Rightarrow Derecha$

Es importante considerar que el rango de visión de los sensores no sobrepasa 100[m]; distancia máxima entregada por la disposición de los sensores reales.

Para respetar las áreas entregadas en la Figura 3-41, es necesario limitar matemáticamente el sensor virtual previamente enunciado. El sensor central sólo observará en un área rectangular del ancho del vehículo, mientras que el rango de los sensores laterales se encuentra limitado por la disposición, capacidad y utilidad del sensor real.

Luego, si el segmento “ $l_0$ ” menos el rango de seguridad supera la mitad del ancho del vehículo, el obstáculo no se encuentra en la zona central del vehículo:

$$si\ l_0 - 3\sigma \geq \frac{anchoAuto}{2} \Rightarrow D_C = 120[m] \quad (3.34)$$

Si el segmento “ $l_0$ ” es mayor que la mitad del ancho del vehículo más el rango máximo de visión lateral, considerado en función de  $\sigma$  en la implementación, el obstáculo no se encuentra en la zona lateral del vehículo

$$si\ l_0 \geq \frac{anchoAuto}{2} + 4.5\sigma \Rightarrow D_L = 120[m] \quad (3.35)$$

La Figura 3-46 presenta el bloque de “Parámetros del Sensor” conformado por las coordenadas del centro de la obstrucción (la media gaussiana), su desviación estándar, y los rangos de seguridad y límite lateral de los sensores.

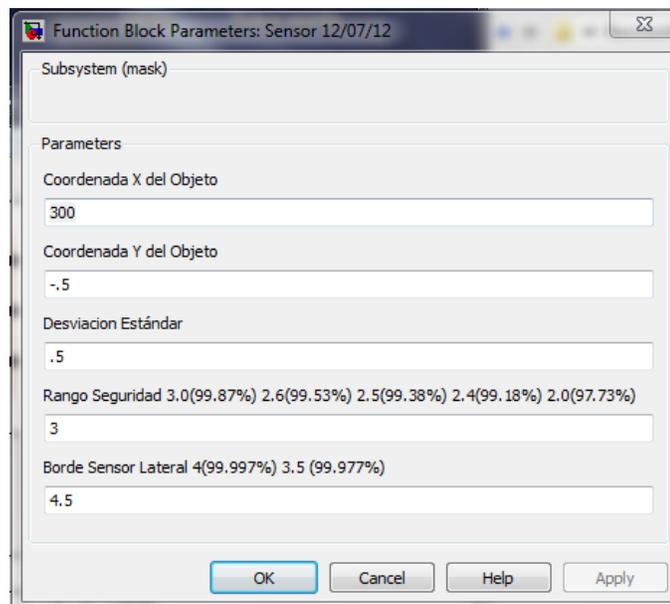


FIGURA 3-46: BLOQUE DE PARÁMETROS DEL SENSOR

### 3.5 ESTRATEGIA DE CONTROL DIFUSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS EN RUTA DE COLISIÓN

Para realizar un controlador que evite obstáculos es necesario controlar tanto la referencia del ángulo del volante como la referencia de la velocidad. Para ello, se intervendrán las señales generadas por el “Control Supervisor de Ruta”, como se observó en la Figura 3-1. La estrategia de “Control para la Evasión de Obstáculos en Ruta de Colisión”, se genera utilizando una ganancia proporcional a la cercanía del objeto, con la cual se desvía al vehículo de su ruta originalmente trazada, adicionalmente se disminuye la velocidad según sea necesario. Este módulo es alimentado por la información proveniente de los sensores determinado por cual flanco y con qué proximidad se encuentra dicho obstáculo.

Una vez detectada la presencia de un obstáculo se desencadenan una seguidilla de análisis y acciones con el fin de evitar la colisión con dicha obstrucción [30], como se observa en la Figura 3-47. En la figura no solo se considera el análisis del control de evasión de obstáculos, además se adiciona la estrategia de control que intenta prever la posibilidad que el vehículo se vuelque y que se explica en secciones posteriores.

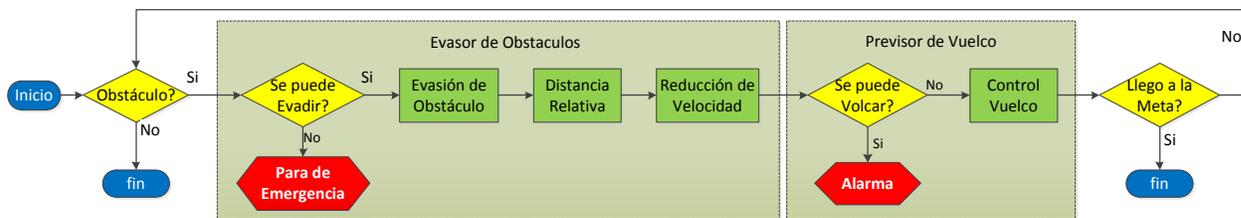


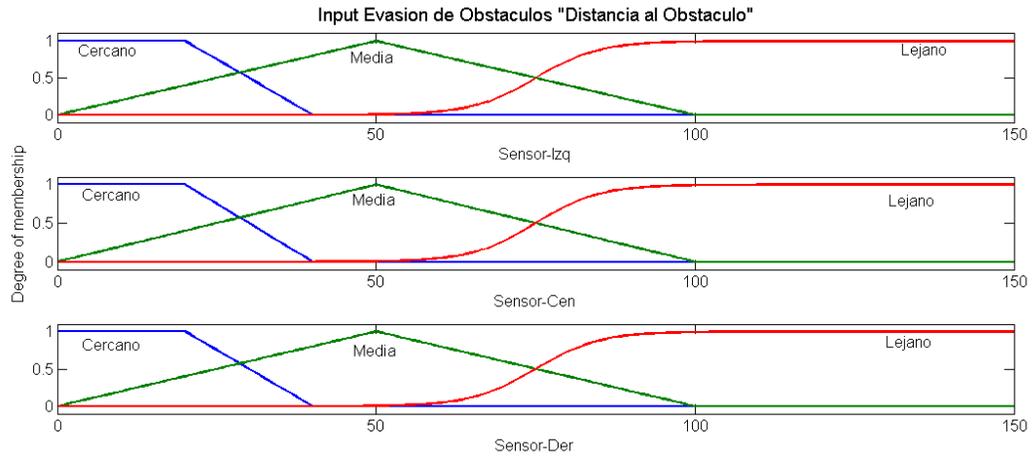
FIGURA 3-47: PROTOCOLO DE EVASION DE OBSTACULOS

#### 3.5.1 DISEÑO DE MODULO EVASOR DE OBSTÁCULOS

Una vez identificada la posibilidad de colisión con un objeto en ruta, se procede a desviar la dirección del desplazamiento del vehículo hacia el costado libre o con obstrucción más lejana. Para ello, es necesario analizar la cercanía del obstáculo y como esta cambia en el tiempo  $\Delta d = d(t) - d(t - 1)$ , con esto último pudiendo detectar si la obstrucción se acerca, aleja o no se mueve, relativamente, del vehículo.

Para realizar el control de este móvil se decide utilizar 6 variables de entrada, conformadas por el par distancia y cambio de distancia ( $\Delta d$ ) de cada uno de las zonas.

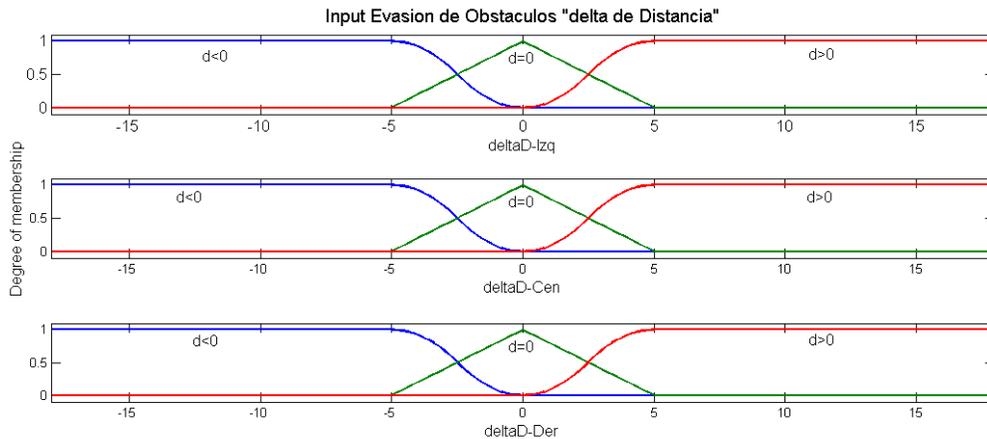
Las variables de distancia al obstáculo, observadas en la Figura 3-48, constan de 3 conjuntos difusos denominados “Cercano”, “Medio” y “Lejano”. Estos son de la forma trapezoidal, triangular y tipo función “S”, respectivamente, los 2 primeros conjuntos cumplen los requisitos necesarios y permiten una fácil implementación al ser lineales, por otro lado, el tercer conjunto correspondiente a una función del tipo “S”, es seleccionada para definir el conjunto “Lejano” por ser abierto en su extremo derecho.



**FIGURA 3-48: INPUT EVASIÓN DE OBSTÁCULOS: DISTANCIA AL OBSTÁCULO [m]**

Las variables del cambio de distancia ( $\Delta d$ ) de cada zona, observadas en la Figura 3-49, constan de 3 conjuntos difusos cada una, donde se expresa el comportamiento relativo del objeto respecto al vehículo autónomo. Si la distancia del obstáculo es creciente ( $\Delta d > 0$ ) se deduce que el objeto posee una velocidad mayor que el móvil, por otro lado, si la distancia es constante ( $\Delta d = 0$ ) el objeto y el móvil poseen la misma rapidez. Finalmente, si la distancia es decreciente ( $\Delta d < 0$ ), el objeto posee una menor velocidad que el móvil o simplemente está detenido, siendo este último caso el que genera la posibilidad de colisionar.

Para formar los conjuntos se utilizaron funciones del tipo “S” y “Z”, para que estos fuesen abiertos en sus extremos, mientras que el conjunto  $\Delta d = 0$  corresponderá a una triangular por los criterios antes mencionados.



**FIGURA 3-49: INPUT EVASIÓN DE OBSTÁCULOS: CAMBIO DE DISTANCIA AL OBSTÁCULO [m]**

La Figura 3-50 presenta la variable de salida del sistema, la cual entrega el valor necesario de giro del volante para evitar el obstáculo. Esta variable está conformada por 8 conjuntos, los cuales se construyen de formas triangulares y trapezoidales, para optimizar recursos. Estas funciones entregan el valor del giro que se desea realizar siendo las extremas el Máximo Giro a la Derecha (MaxGDer) y Máximo Giro a la Izquierda (MaxGIzq) valor deseado en el caso que un

obstáculo este extremadamente cercano. Las funciones Gran Giro a la Derecha (GranGDer), Gran Giro a la Izquierda (GranGIzq), Giro a la Derecha (GiroDer) y Giro a la Izquierda (GiroIzq) corresponden a las utilizadas para evadir el objeto con anticipación y seguridad. La función “Cero” es aplicada en el caso que no exista un obstáculo, con lo cual, no se le ordenara girar el volante. Por último, se configura la función triangular “Centrar”, esta tendrá como fin regresar el ángulo del volante a cero tras quedar libre la zona central, ya que tras cambiar la dirección y comenzar a evadir un obstáculo se desea que el móvil no se aleje en demasía de la ruta original, esta función busca mantener paralela la dirección del vehículo a la ruta deseada, sin encontrarse al objeto.

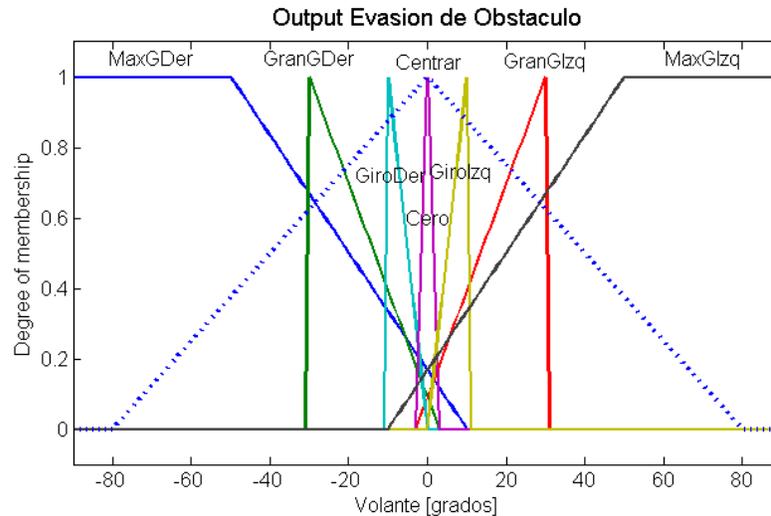


FIGURA 3-50: OUTPUT EVASIÓN DE OBSTÁCULOS: SEÑAL APLICADA AL ÁNGULO DEL VOLANTE.

Para construir la base de reglas de este conjunto, se utilizan criterios de conducción humana. La idea es emular lo que realizaría un conductor experto en presencia de esta situación. Por ejemplo, si un objeto se encuentra cerca por el área central y el flanco derecho, y a la vez se comienza a reducir esta distancia, se puede intuir que es necesario realizar un Gran Giro a la Izquierda para evadir dicho obstáculo. Siguiendo esta misma lógica se confecciona una tabla con las reglas necesarias en los diferentes casos factibles, observada en la Tabla 3-11.

TABLA 3-11: BASE DE CONOCIMIENTO DE EVASOR DE OBSTÁCULO

Sensor Derecho			
Distancia	Cerca	Media	Lejos
$\Delta d < 0$		GranGIzq	Cero
$\Delta d = 0$	GiroIzq	GiroIzq	GiroDer
$\Delta d > 0$	Cero	Cero	Cero
Sensor Izquierdo			
Distancia	Cerca	Media	Lejos
$\Delta d < 0$		GranGDer	Cero
$\Delta d = 0$	GiroDer	GiroDer	GiroIzq
$\Delta d > 0$	Cero	Cero	Cero

Si	Objeto Cercan por Izquierda	&	Objeto Lejano por Centro	&	$\Delta d - Izq < 0$	$\Rightarrow$	GiroDer
Si	Objeto Cercan por Derecha	&	Objeto Lejano por Centro	&	$\Delta d - Der < 0$	$\Rightarrow$	GiroIzq
Si	Objeto Cercan por Izquierda		&	Objeto Cercan por Centro		$\Rightarrow$	MaxGDer
Si	Objeto Cercan por Derecha		&	Objeto Cercan por Centro		$\Rightarrow$	MaxGIzq
Si	Objeto Lejano por Centro				$\Rightarrow$	CentrarVolante	

### 3.5.2 DISEÑO DE MÓDULO DE DISTANCIA RELATIVA

Como medida de estandarización para la obtención de una distancia al objeto, es necesario considerar un criterio denominado en esta ocasión de “Distancia Relativa”. El fin de éste es poder evaluar en términos absolutos que tan cerca del objeto se encuentra el vehículo. Este bloque es fundamental para poder calcular el coeficiente  $\lambda$ , que permite determinar los pesos respectivos de la orden del ángulo del volante supervisor y la señal generada por el control de evasor de obstáculos (Figura 3-1); también es este valor quien ayuda a la determinación de la reducción de velocidad necesaria.

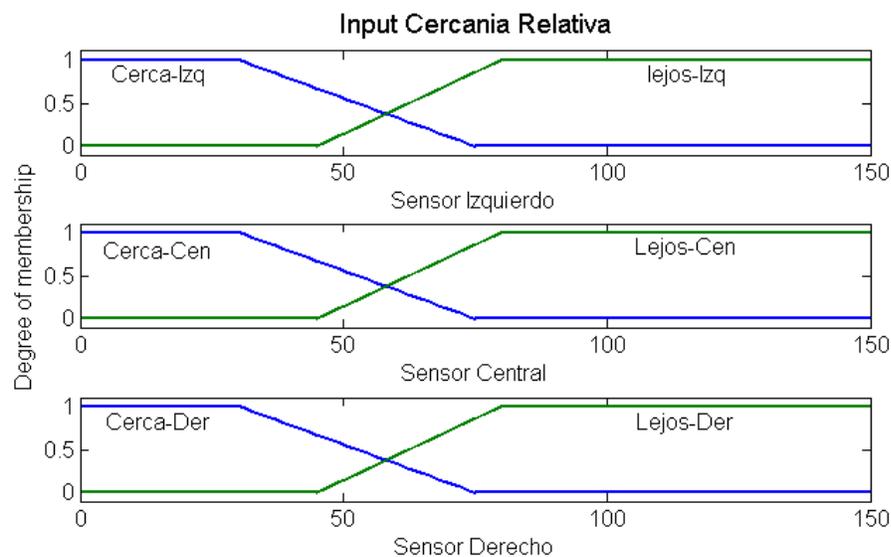


FIGURA 3-51: INPUT CERCANÍA RELATIVA [m]

El módulo de “Cercanía Relativa” estará compuesto por 3 variables de entrada, cada una correspondiente a cada área del sensor. Cada variable de entrada se conforma por 2 conjuntos difusos, el cercano y el lejano, como se observa en la Figura 3-51, ambos de forma trapezoidal.

En la Figura 3-52, se presenta la variable de salida, correspondiente a un valor adimensional entre 0 y 1, donde el primero representa la inexistencia de un objeto en la ruta y el segundo corresponde a la proximidad inmediata de este. Los conjuntos difusos son conformados por 2 trapezoides, que tienen como mayor característica que sus respectivos centros de masa se encuentran en cero (cuando el obstáculo está lejos) y en uno (cuando el obstáculo está cerca).

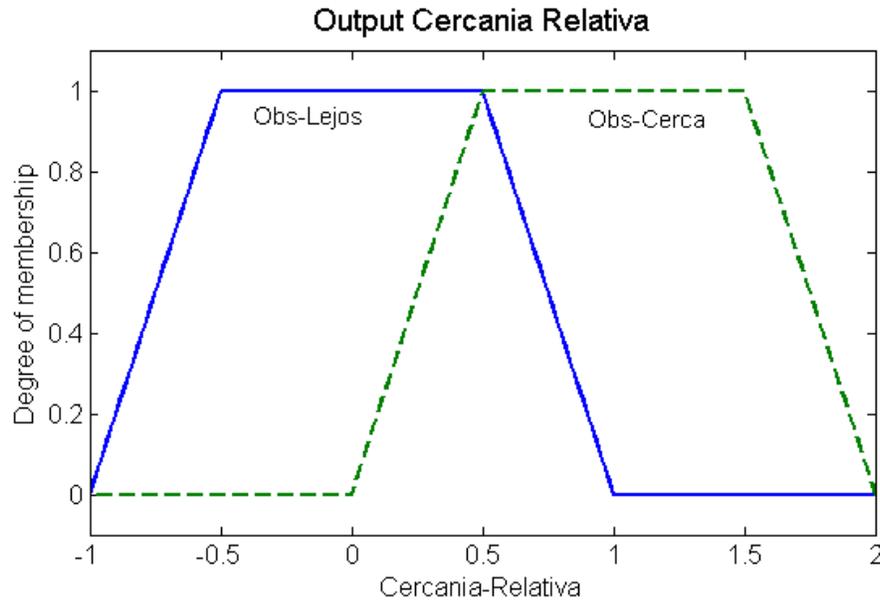


FIGURA 3-52: OUTPUT CERCANÍA RELATIVA

La base de conocimiento en este caso no es natural como para otros. La razón es que se está tratando con variables que no son habitualmente tratadas. Sin embargo, se utiliza como criterio la seguridad del vehículo, luego basta con que solo una de las áreas detecte el obstáculo para que active el alto grado de cercanía, por otro lado se necesita que el obstáculo no esté presente en 2 áreas para activar el grado de baja cercanía, obteniéndose de esta forma la base de conocimiento expuesta en la Tabla 3-12

TABLA 3-12: BASE DE CONOCIMIENTO DE CERCANÍA RELATIVA

Si	Objeto Lejano por Izquierda	&	Objeto Lejano por Derecha	⇒	C.R. Baja
Si	Objeto Lejano por Izquierda	&	Objeto Lejano por Centro	⇒	C.R. Baja
Si	Objeto Lejano por Derecha	&	Objeto Lejano por Centro	⇒	C.R. Baja
Si	Objeto Cercano por Izquierda			⇒	C.R. Alta
Si	Objeto Cercano por Centro			⇒	C.R. Alta
Si	Objeto Cercano por Derecha			⇒	C.R. Alta

### 3.5.3 DISEÑO DE MÓDULO DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD

Al encontrarse en ruta de colisión con un obstáculo, la experiencia dicta como primera medida la reducir de velocidad, adicionalmente, esta medida tiene como valor agregado que permite realizar la evasión con más tiempo, más suave y con mayor seguridad.

Tras detectada la obstrucción, se evalúa no sólo la velocidad que posee el vehículo en el instante, sino además es necesario evaluar la tasa de cambio de velocidad que posee el móvil y fundamentalmente la cercanía relativa al objeto en colisión.

La variable de entrada de la “Cercanía Relativa”, observada en la Figura 3-53, está conformada por 4 conjuntos difusos, 2 de los cuales (las centrales) corresponden a funciones de pertenencia en forma de pi, estas se seleccionan de dicha forma para entregarle una componente no lineal al sistema. La función “Cercana” corresponde a una función tipo “S” entregando el intervalo final abierto del sistema. Por último, se integra al sistema una función adicional, denominada “Muy Lejos”, que tiene como finalidad informar al control cuando no existan obstrucciones en el camino, y con ello no entregar una reducción de velocidad.

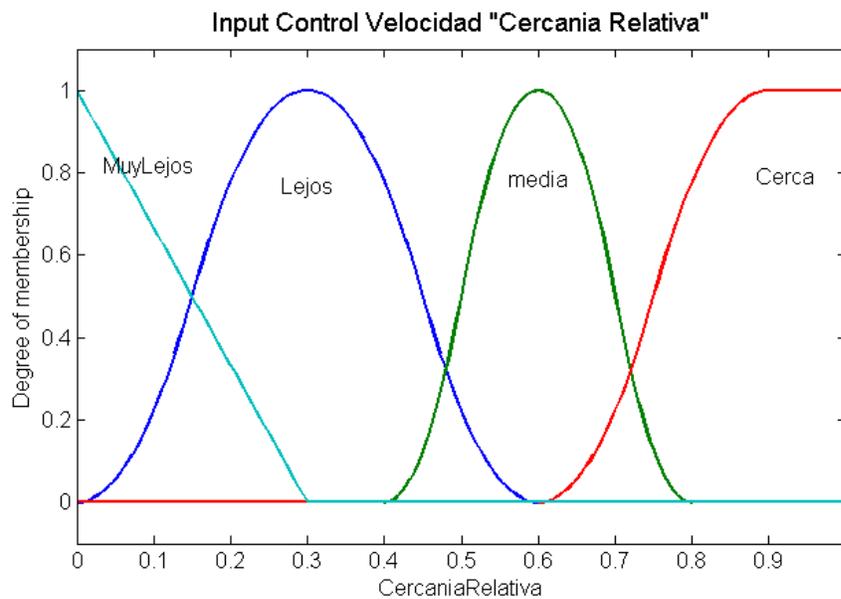
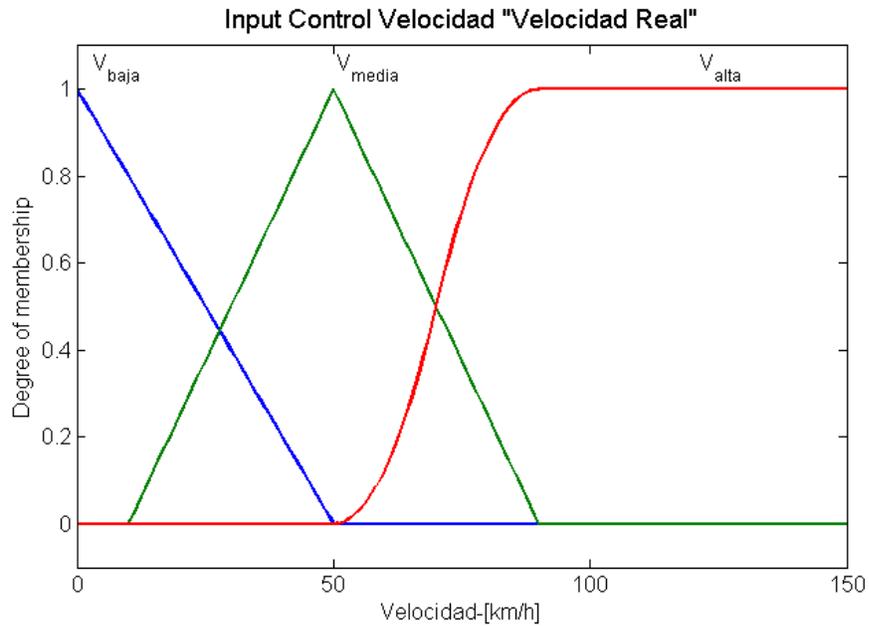


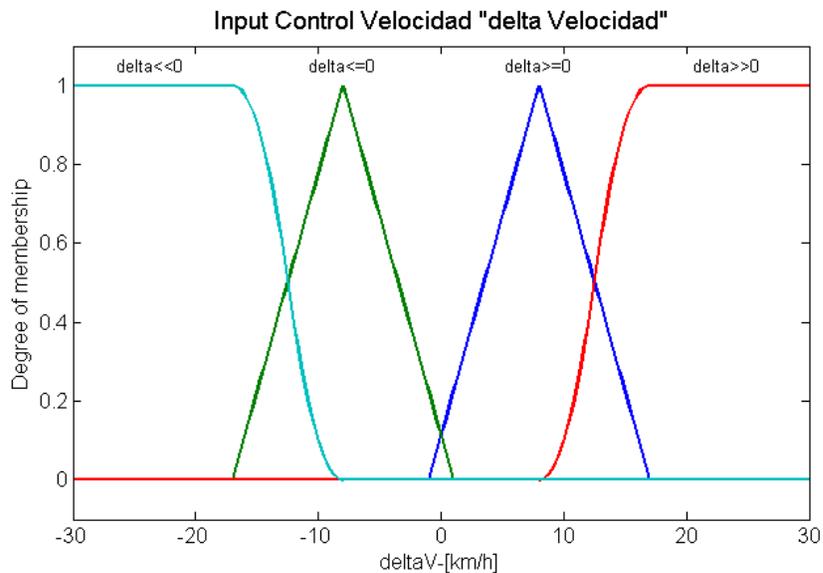
FIGURA 3-53: INPUT REDUCCION DE VELOCIDAD: CERCANIA RELATIVA

La Figura 3-54, enseña los conjuntos difusos de la variable de velocidad real, la que permite considerar que rango de rapidez posee el vehículo instantáneamente, según esta, calcular la reducción necesaria. La variable esta conforma por 2 funciones triangulares, expresando los conjuntos de baja y media velocidad, mientras que el conjunto de alta velocidad es una función del tipo “S” para poseer un intervalo abierto. Es importante destacar que en una primera etapa de la implementación del AGV, este no debería sobrepasar los  $50 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , siendo la tercera función de esta variable trabajo aplicable en etapas posteriores del control del AGV.



**FIGURA 3-54: INPUT REDUCCIÓN DE VELOCIDAD: VELOCIDAD REAL**

La tercera variable de entrada del control corresponde a la variación de velocidad que posea el móvil ( $\Delta v = v(t) - v(t - 1)$ ). Esta variable, observada en la Figura 3-55, es la encargada de informar al sistema que clase de variación posee la rapidez del móvil, y de esta forma se intenta mejorar la orden aplicada a él, por ejemplo, exigirle al móvil que reduzca la velocidad cuando el control supervisor ya lo ha ordenado. Por otro lado también existe la posibilidad que el control supervisor este ordenando aumentar la velocidad, y en la presencia de una obstrucción, esta variable informará que la reducción deberá ser mayor que la presupuestada inicialmente.

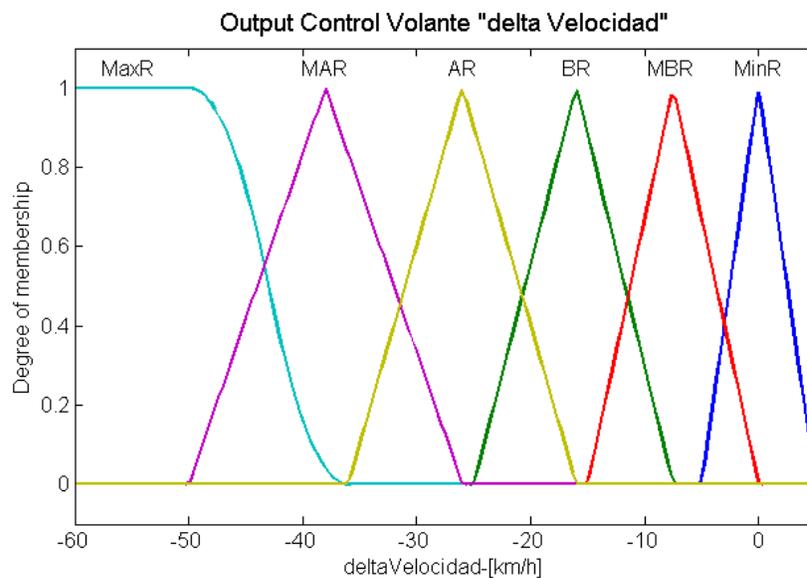


**FIGURA 3-55: INPUT REDUCCIÓN DE VELOCIDAD: VARIACIÓN DE VELOCIDAD**

Los conjuntos difusos que entregan los grandes cambios, poseen las funciones “S” y “Z”, para considerarlas como intervalos abiertos. Las funciones centrales, de forma triangular, consideran los cambios menores de velocidad, adicionalmente ambas sobrepasan el valor de cero, el fin de esto es impedir que el control cambie bruscamente al alternar el signo de la variación de velocidad.

Es importante comentar que tanto la variable de velocidad real como la de variación de velocidad, se decidió implementar en la unidad de  $\left[\frac{km}{h}\right]$ , para realizar un análisis más sencillo dado que esta es la unidad que habitualmente se maneja en el concepto automotriz.

La Figura 3-56 finalmente entrega los conjuntos difusos de salida, evaluados en  $\left[\frac{km}{h}\right]$ , para ser consecuente con las variables de entrada del modelo y la referencia entregada por el control supervisor de ruta. Esta está conformada por conjuntos difusos triangulares, denominados: Muy Alta Reducción (MAR), Alta Reducción (AR), Baja Reducción, Muy Baja Reducción (MBR) y Mínima Reducción (MinR). Donde este último tiene como centro de masa el cero, siendo encargado de entregar dicho valor cuando una obstrucción se encuentra a una distancia lo suficiente lejana. La función de pertenencia Máxima Reducción (MaxR) corresponde a un intervalo abierto, generado por una función de tipo “Z”.



**FIGURA 3-56: OUTPUT REDUCCIÓN DE VELOCIDAD**

Utilizando la lógica antes expuesta, se confecciona la base de conocimientos para la reducción de velocidad, siendo esta expuesta en la Tabla 3-13.

Para evitar problemas tras superar el obstáculo, es necesario que la velocidad no se recupere inmediatamente. La aceleración brusca tras evadir el obstáculo provocaría un alejamiento de la ruta deseada, por ende, retardaría considerablemente la convergencia en el camino dado. Luego, se decide adicionar a la reducción de velocidad un limitador de pendiente, suavizando de esta forma el regreso a la velocidad original.

**TABLA 3-13: BASE DE REGLAS DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD**

Si	C.R. es Muy Lejana	⇒	Mínima Reducción
$\Delta v \gg 0$			
	Vel. Baja	Vel. Media	Vel. Alta
C.R. es Cerca	Muy Alta Reducción	Muy Alta Reducción	Máxima Reducción
C.R. es Media	Alta Reducción	Muy Alta Reducción	Muy Alta Reducción
C.R. es Lejos	Baja Reducción	Alta Reducción	Muy Alta Reducción
$\Delta v > 0$			
	Vel. Baja	Vel. Media	Vel. Alta
C.R. es Cerca	Alta Reducción	Muy Alta Reducción	Muy Alta Reducción
C.R. es media	Baja Reducción	Baja Reducción	Muy Alta Reducción
C.R. es Lejos	Muy Baja Reducción	Baja Reducción	Alta Reducción
$\Delta v \leq 0$			
	Vel. Baja	Vel. Media	Vel. Alta
C.R. es Cerca	Alta Reducción	Alta Reducción	Muy Alta Reducción
C.R. es Media	Baja Reducción	Baja Reducción	Alta Reducción
C.R. es Lejos	Mínima Reducción	Muy Baja Reducción	Baja Reducción
$\Delta v \ll 0$			
	Vel. Baja	Vel. Media	Vel. Alta
C.R. es Cerca	Baja Reducción	Alta Reducción	Alta Reducción
C.R. es Media	Muy Baja Reducción	Baja Reducción	Alta Reducción
C.R. es Lejos	Mínima Reducción	Mínima Reducción	Muy Baja Reducción

### 3.5.4 DISEÑO DE MÓDULO DE PREVENCIÓN DE VUELCO

Existe la posibilidad que el vehículo al intentar evitar un obstáculo o simplemente al girar en una curva, derrape o incluso pueda volcarse en la ruta. Es por esto, que es necesario controlar la aceleración lateral del vehículo, causante de estas situaciones. Por normativas y estudios nacionales e internacionales[39] [45], se sabe que una aceleración lateral de  $3\left[\frac{m}{s^2}\right]$  se considera aceptable en buenas condiciones de adherencia y con independencia de la velocidad longitudinal, ahora bien, si la aceleración es inferior a los  $2\left[\frac{m}{s^2}\right]$  esta incluso puede ser imperceptible para los integrantes del móvil. Por otro lado, si la aceleración del vehículo supera los  $4\left[\frac{m}{s^2}\right]$ , el peligro aumenta considerablemente, dependiendo de la calidad del camino, esto podría desencadenar en el derrape o incluso en el vuelco del vehículo.

Teniendo en cuenta todo esto, y la tendencia de la aceleración lateral  $(\Delta a_y = a_y(t) - a_y(t-1))$ , se decide reducir la velocidad longitudinal con el fin de disminuir la aceleración tangencial del vehículo, siendo esto cuadráticamente directo como se observa en (3.36).

$$a_c = \frac{v^2}{R} \quad (3.36)$$

A pesar del respaldo matemático, la experiencia dicta que el presionar el freno lejos de reducir el peligro podría provocar el vuelco, sólo siendo conveniente la reducción de velocidad producto de la desaceleración natural del vehículo, o sea dejando de presionar el pedal del acelerador. Para conseguir esto último, se decide reducir la velocidad en menor medida que en el modulo de control de velocidad, así mismo al adquirir una aceleración peligrosa, solo se activará una alarma, despreciando la posibilidad de un freno de emergencia que podría desencadenar en mayores problemas como ya fue comentado.

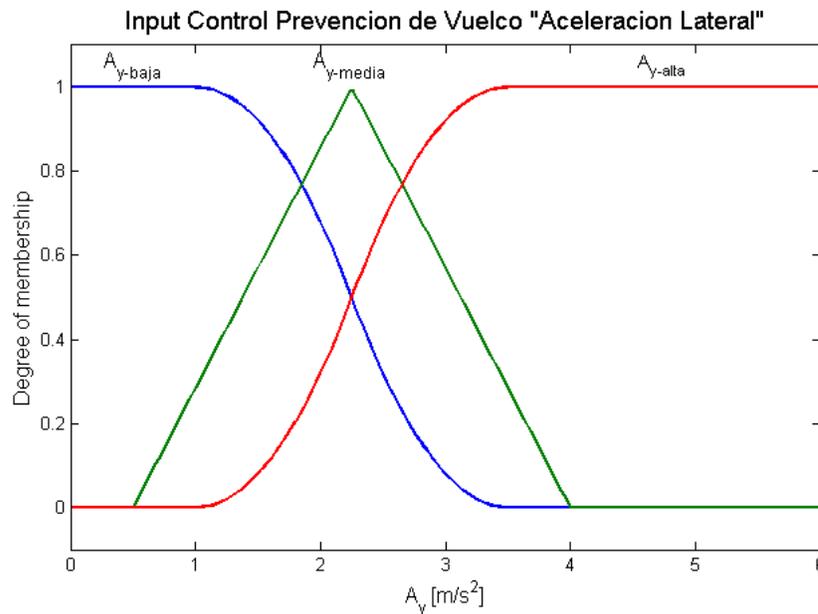
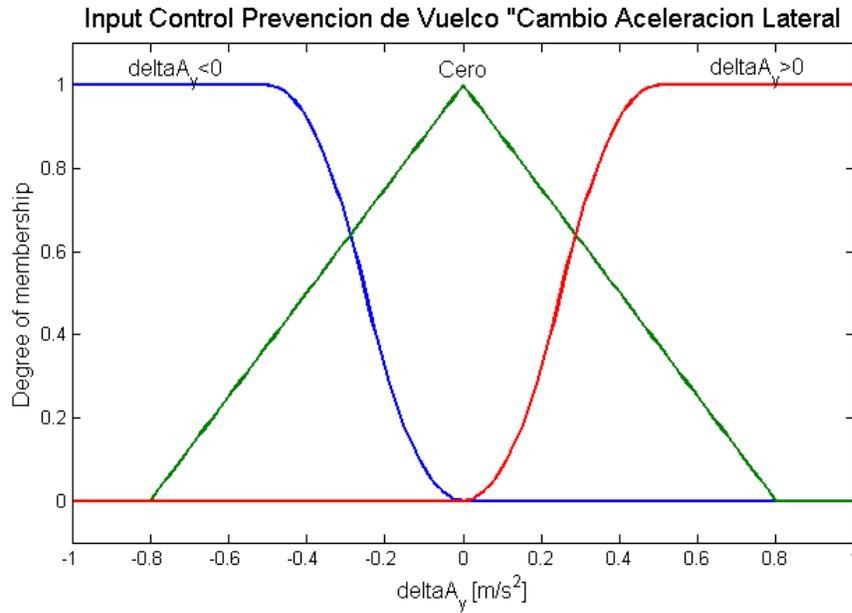


FIGURA 3-57: INPUT PREVENCIÓN DE VUELCO: ACELERACIÓN LATERAL.

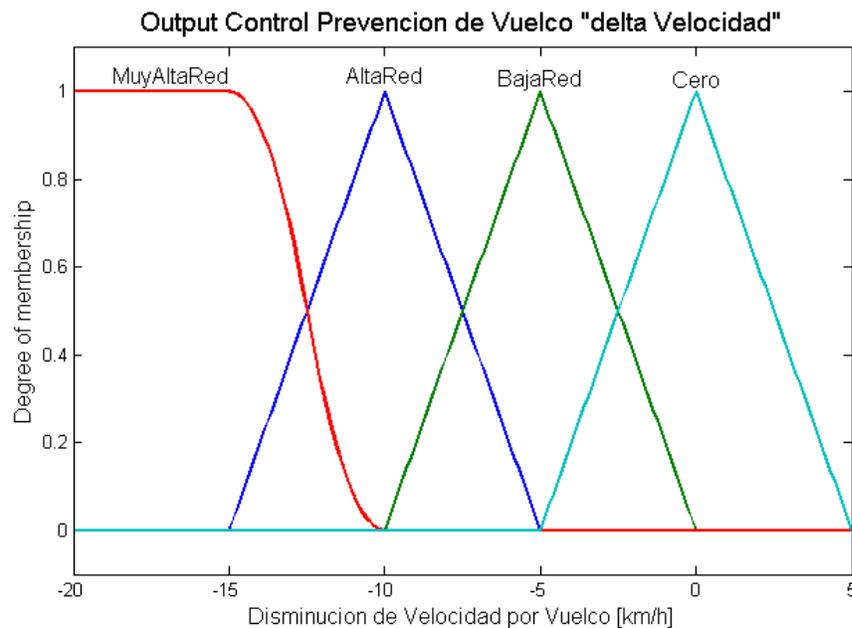
La Figura 3-57 entrega los conjuntos de pertenencia que conforman la primera variable de entrada del sistema, la evaluación de la aceleración tangencial. Esta variable está conformada por 3 conjuntos difusos, utilizando las funciones abiertas para los extremos y una triangular para el valor medio. El conjunto difuso de aceleración alta adquiere su máximo valor a los  $3,5 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , intentando evitar alcanzar los peligrosos  $4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , del mismo modo el centro de masa de la función triangular “Aceleración media”, se encuentra bordeando los  $2 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , intentando prever una aceleración que sea sensible a los usuarios del vehículo. Dado que no es posible aplicar los frenos, los valores de los conjuntos difusos buscan ser reconocidos con anticipación.

La segunda variable de entrada del sistema corresponde al cambio de aceleración lateral, la razón de esta variable es considerar si la aceleración lateral se está reduciendo o aumentando, condición necesaria para saber cómo intervenir la velocidad en busca de una reducción de la aceleración tangencial. Es lógico que si la aceleración tangencial se está reduciendo, producto del control supervisor de ruta o incluso de la reducción de velocidad para evitar obstáculos, no es necesario intervenirla, por otro lado, si esta aceleración se está incrementando, es el momento propicio de intervenir.



**FIGURA 3-58: INPUT PREVENCIÓN DE VUELCO: CAMBIO DE ACELERACIÓN LATERAL**

La variable de salida, al igual que en la reducción de obstáculos por objetos, se considera una variación de la velocidad referenciada por el control supervisor, puntualmente entregando la cantidad de  $\left[\frac{km}{h}\right]$  necesarios que se debe bajar. En la Figura 3-59, se presenta los 4 conjuntos difusos conformantes de la variable de salida, notando que la reducción de este no supera los  $20\left[\frac{km}{h}\right]$ , a diferencia de los  $60\left[\frac{km}{h}\right]$  entregados por el control de “Reducción de Velocidad”.



**FIGURA 3-59: OUTPUT PREVENCIÓN DE VUELCO**

Comprendiendo los criterios necesarios para la reducción de la aceleración, se confecciona la base de conocimiento para la prevención de vuelcos del automóvil, la cual se observa en la Tabla 3-14

**TABLA 3-14: BASE DE REGLAS DEL CONTROL PREVENCIÓN DE VUELCO**

	<b>Aceleración Alta</b>	<b>Aceleración Media</b>	<b>Aceleración Baja</b>
$\Delta a_y < 0$	Alta Reducción	Baja Reducción	Cero
$\Delta a_y = 0$	Alta Reducción	Baja Reducción	Cero
$\Delta a_y \geq 0$	Muy Alta Reducción	Alta Reducción	Baja Reducción

Tras la aplicación de estas instrucciones, al igual que con el bloque de Reducción de Velocidad, es necesario limitar la rapidez con la que se recupera la velocidad referencial del móvil.

### **3.5.5 SELECCIÓN DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD Y ÁNGULO APLICADO AL VOLANTE PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS.**

Tras la aplicación de los módulos que reducen la velocidad, es necesario implementar un criterio que permita discriminar entre las dos opciones de reducción de velocidad. Para resolver este problema simplemente se decide optar por el criterio que entregue la mayor reducción de velocidad, al considerar que esta opción incorpore adecuadamente la solución de ambos problemas. Una vez aplicada esta reducción, es a esta misma señal a la que se limita la pendiente de recuperación de velocidad referencial, facilitando una suave transición de la velocidad real. Otro punto a considerar es que no se puede reducir más velocidad de la que se posee, de ocurrir esto no solo se generaría una detención total, sino que es posible invertir el sentido de desplazamiento del vehículo, lo que claramente es imposible de realizar solo aplicando el freno del vehículo. Para prevenir esto se decide instalar un saturador dinámico, cuyo límite superior sea de valor cero, ya que estos módulos no aumentan la velocidad del móvil, y cuyo límite inferior este entregado por la velocidad instantánea que se posee el vehículo en ese momento.

La implementación en ambiente de MATLAB®-Simulink que da a conocer el módulo encargado de evaluar la reducción de velocidad aplicada, corresponde al observado en la Figura 3-60.

Para discriminar entre las opciones generadas por los dos controladores que actúan sobre el valor aplicado al ángulo del volante, ya sea el control supervisor de ruta o el control para la evasión de obstáculos, se decide implementar un criterio que determine una ganancia (o peso), dependiente de la distancia a la se encuentre del obstáculo, para determinar qué valor será aplicado al ángulo del volante.

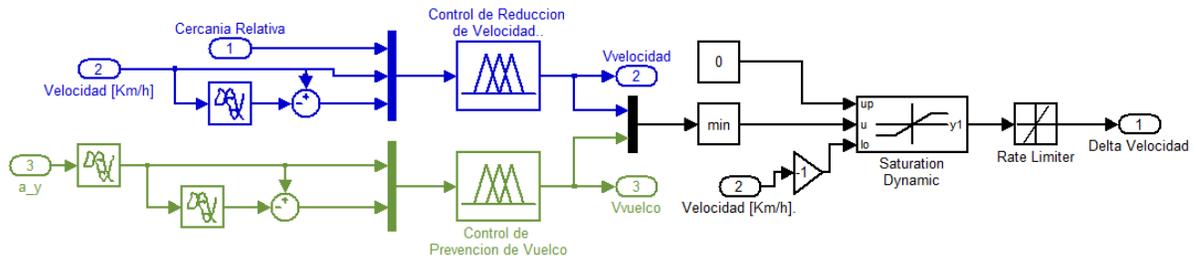


FIGURA 3-60: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA REDUCCIÓN DE VELOCIDAD.

Para interpretar la distancia a la que se encuentra el objeto, se decide utilizar el módulo de “Cercanía Relativa”, el cual entrega un valor de proximidad acotado entre cero y uno respecto del obstáculo. Luego, para calcular el peso que determine la relación entre las variables se decide utilizar una función tipo sigmoidea (Figura 3-61), ya que esta permite entregar mayor importancia a uno u otro caso dependiendo el grado de cercanía sin poseer bruscos cambios como es el caso de una función lineal. La ecuación sigmoidea que conforma el peso de la función y que se grafica en la Figura 3-61, se expresa en (3.37).

$$\lambda = \frac{1}{1 + e^{-15(CR-0.5)}} \quad (3.37)$$

donde  $CR$  corresponde al valor obtenido en la función de Cercanía Relativa.

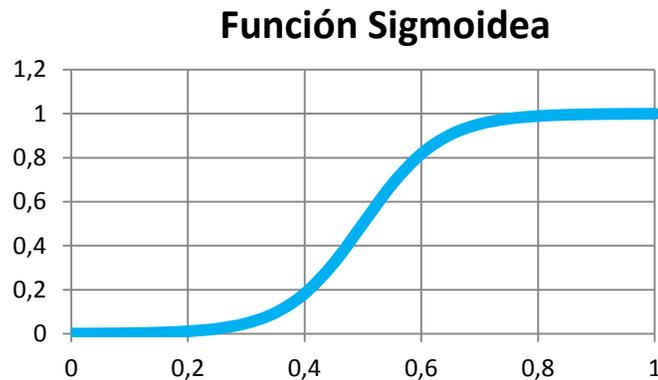


FIGURA 3-61: FUNCIÓN SIGMOIDEA

Finalmente, la aplicación de cada control estará determinada al peso generado por dicho  $\lambda$ , de la forma observada en (3.38), siendo consecuente con el diagrama propuesto en la Figura 3-1.

$$VolanteAplicado = Volante_{ControlSupervisor}(1 - \lambda) + Volante_{EvasorObstaculos} * \lambda \quad (3.38)$$

Es importante señalar que se seleccionó esta determinada función sigmoidea para considerar los extremos pertenecientes exclusivamente a el control supervisor de ruta, en el caso de menor pertenencia y al control evasor de obstáculos, en el caso de mayor pertenencia, para con ello evitar imprecisiones en los casos extremos.

### 3.5.6 CONTINGENCIAS: ALARMA Y PARADA DE EMERGENCIA

En el intento de evadir un obstáculo existe la posibilidad que este sea tan masivo que el vehículo no pueda rodear, o simplemente, que éste se encuentre tan cerca que el radio de giro del vehículo no alcance a evitarlo. También existe la posibilidad que un móvil, a distancia relativa constante del AGV, frene bruscamente, debiéndose detener rápidamente para evitar colisionar al vehículo que antecede al AGV.

Para prever accidentes en estas condiciones, se considera necesario aplicar una política de seguridad por proximidad de obstáculos, para la cual se decide recurrir al criterio desarrollado por la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (CONASET), perteneciente al Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (MTT) del Gobierno de Chile, sobre la distancia de seguridad entre 2 vehículos en ruta [46].

Para determinar la distancia segura de detención es necesario conocer el trayecto en que se desplazada un vehículo entre la detección de un potencial peligro y la reacción que realiza un chofer para evitarla; y los metros que tarda un vehículo en detenerse, producto de la adherencia de los neumáticos a la superficie de contacto, una vez presionado el freno.

Luego, se define como distancia de reacción al desplazamiento que realiza el móvil entre la aparición del suceso y el instante donde el conductor aplica la presión en el freno, observado en (3.39). El tiempo de reacción ( $t_{pc}$ ) de una persona joven en condiciones normales y aptas para manejar, se estipula en no menor a los 0,75 [s] considerándose como el tiempo promedio de esta reacción bordeando el segundo. Por otro lado, se estima que el sistema computacional implantado en el vehículo en conjunto con el respectivo actuador debería poseer un tiempo de reacción de alrededor de 200[ms], sin embargo, por medida de seguridad, se prefiere evaluar esta reacción en  $t_{pc} = 0,5[s]$ .

$$d_{reaccion}[m] = \frac{v \left[ \frac{km}{h} \right]}{3.6} * t_{pc}[s] \quad (3.39)$$

Adicionalmente, se define como distancia de frenado al desplazamiento generado por el móvil una vez aplicado los frenos a fondo, esta distancia estará determinada por el cuadrado de la velocidad que se posea y el coeficiente de fricción dinámico entre los neumáticos y la superficie ( $\mu$ ), como se observa en (3.40), obtenida del trabajo no conservativo y el cambio de energía cinética.

Es importante señalar que esta distancia no considera el efecto producido por sistemas de ayuda al frenado, como por ejemplo los frenos ABS, los que reducen la distancia de frenado, decidiendo ignorarlos en el modelo. Lo que conlleva una mayor tolerancia de error y por ende mayor robustez con respecto a la seguridad.

$$d_{frenado}[m] = \frac{\left(v \left[\frac{km}{h}\right]\right)^2}{2 * g * 3.6^2 * \mu} \quad (3.40)$$

Finalmente, se define como distancia de detención total a la suma de la distancia de frenado ( $d_{frenado}$ ) más la distancia de reacción ( $d_{reaccion}$ ) del vehículo:

$$d_{detencion} = d_{reaccion} + d_{frenado} \quad (3.41)$$

Una vez determinada la distancia de detención total, se define a esta magnitud como la máxima aproximación que se debe poseer entre el vehículo y un obstáculo inmediatamente anterior a él.

Luego, para evitar que el AGV colisione, ya sea con un obstáculo masivo estático o un vehículo que reduzca explosivamente su velocidad, se genera un criterio de seguridad consistente en la activación del freno de emergencia en las siguientes condiciones:

$$Si \ d_{detencion} > d_{Derecha} \ \& \ d_{detencion} > d_{Centro} \ \Rightarrow \ Frenar$$

o

$$Si \ d_{detencion} > d_{Izquierda} \ \& \ d_{detencion} > d_{Centro} \ \Rightarrow \ Frenar$$

donde

- $d_{Izquierda}$  : corresponde a la distancia del vehículo a la obstrucción por el flanco izquierdo
- $d_{Centro}$  : corresponde a la distancia del vehículo a la obstrucción por el centro
- $d_{Derecha}$  : corresponde a la distancia del vehículo a la obstrucción por el flanco derecho

Como fue analizado en la Sección 3.5.4, la aceleración lateral en un vehículo no debe sobrepasar los  $4 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ , ya que este se considera el límite de seguridad ante la posibilidad de derrape o vuelco. Como también fue analizado, la factibilidad de reducir fuertemente la velocidad longitudinal para del mismo modo reducir la aceleración tangencial, por lo expresado en la (3.36), no es factible producto que el bloqueo de las ruedas incrementa la posibilidad de vuelco. Es por esto que se considera que al sobrepasar los  $4 \left[\frac{m}{s^2}\right]$  y que esta aceleración continúe incrementándose, se genere una alarma de advertencia de peligro, luego:

$$Si \ a_y > 4 \left[\frac{m}{s^2}\right] \ \& \ \Delta a_y > 0 \ \Rightarrow \ ¡Alarma!$$

Una vez activada la alarma se deben considerar algún criterio de seguridad para reducir la probabilidad de vuelco, este análisis se plantea como trabajo futuro, para realizarlo en una siguiente implementación. Independiente de esto, se plantea como posible solución para reducir la factibilidad de volcarse ordenando al vehículo que realice un giro en el volante en sentido contrario al giro que provoco la emergencia. Adicionalmente es importante informar que el vehículo Tiguan de Volkswagen® año 2010, ya viene integrado de fabrica con un sistema que reduce la posibilidad de que se genere un vuelco, definiendo que rueda y en qué grado es necesario frenarlas para evitarlo.

### 3.5.7 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DIFUSO PARA LA EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Una vez implementadas las estrategias difusas de control se analiza su comportamiento ante el espectro de valores que puede tomar cada una de las variables de entrada. Para ello se muestran la magnitud de salida de cada módulo por la variación de 2 de sus variables a través de un manto de soluciones. Esto se logra tras implementar los conjuntos generados en el diseño utilizando el editor de control difuso, perteneciente al toolbox de MATLAB®

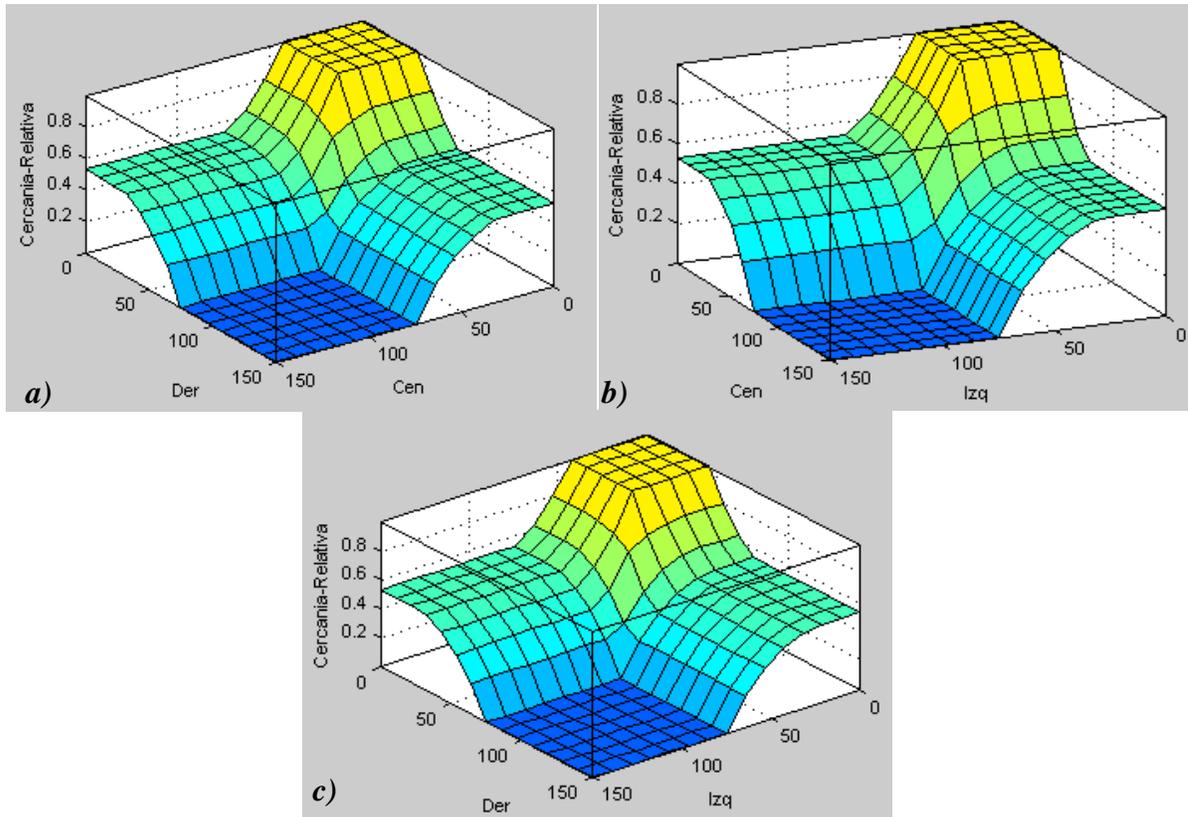


FIGURA 3-62: MANTO DE SOLUCIONES DE MODULO DE “CERCANÍA RELATIVA”

La Figura 3-62 presenta el comportamiento que posee la señal de salida del control difuso de “Cercanía Relativa”, el cual no revela sorpresas respecto de lo planteado en el diseño. Luego, solo si 2 señales consideran al obstáculo cercano, la “Cercanía Relativa” se considera lejana, mientras que si el obstáculo se acerca solo por un flanco el modulo prestara atención a este. En particular el comportamiento ante la variación de valores de las señales de entrada genera un manto suave y sin imperfecciones, esto se debe fundamentalmente a la cantidad reducida, pero efectiva, de reglas implementadas en este caso.

En el caso módulo para el “Control de Reducción de Velocidad”, observado en la Figura 3-63, se presenta 3 mantos: la interacción entre la señal de “Cercanía Relativa” y “Velocidad Real del AGV”(a), la interacción entre las señales de “Cercanía Relativa” y “Variación de Velocidad” (b), y la relación entre “Variación de Velocidad” y la “Velocidad Real del AGV” (c), respectivamente. A diferencia del caso recién estudiado, en este módulo se utilizan entradas de diferente naturaleza, luego las pareja formadas gráficamente no generan mantos simétricos.

Como fue diseñado, la señal que fuertemente determina la reducción de velocidad en el vehículo corresponde a la proveniente del control de cercanía relativa, coherente con el hecho que es ésta la que entrega el peligro a la conducción, esta apreciación es fácilmente comprobable al observar la fuerte tendencia que entrega la “Cercanía Relativa” a la reducción de velocidad en las 2 primeras imágenes.

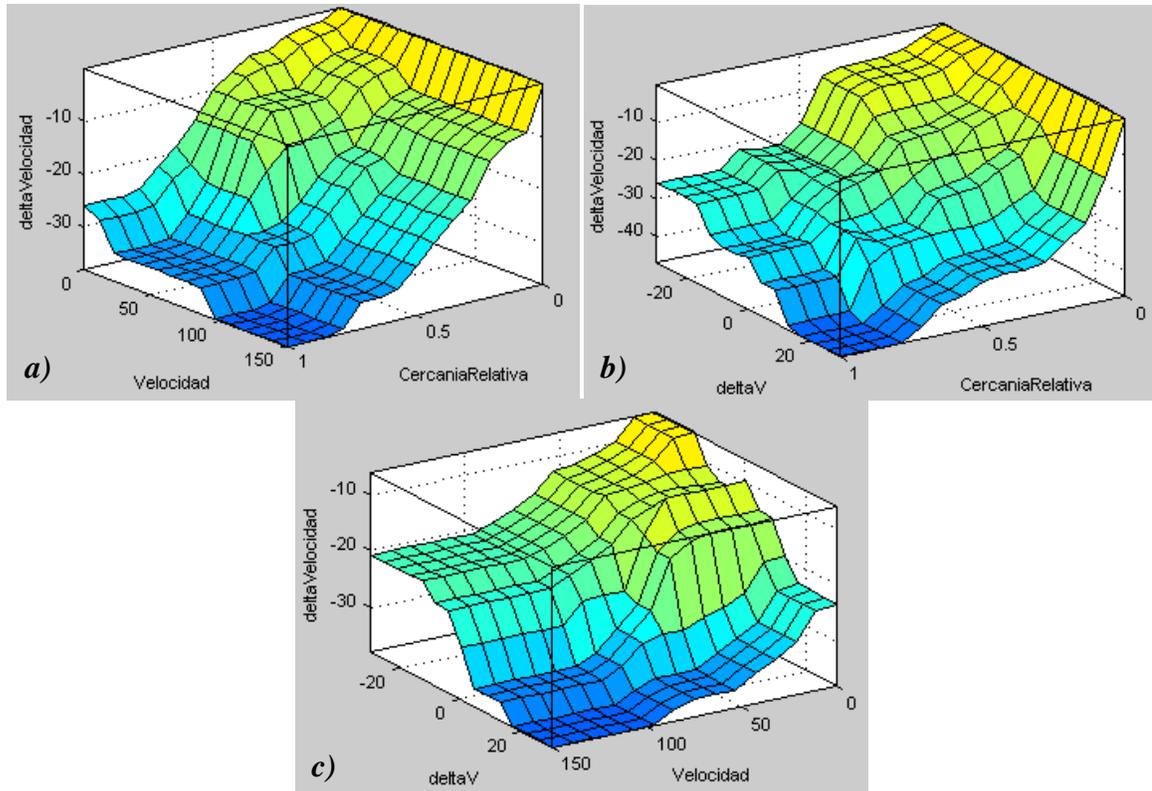


FIGURA 3-63: MANTO DE SOLUCIONES DE MÓDULO DE “REDUCCIÓN DE VELOCIDAD”

Al observar el comportamiento del manto realizado por el control de Prevención de Vuelco, graficado en la Figura 3-64, se aprecia el comportamiento de reducción de velocidad entregado solo por 2 variables, el valor de la aceleración lateral instantánea presente en el vehículo y su respectiva tendencia de cambio en el tiempo.

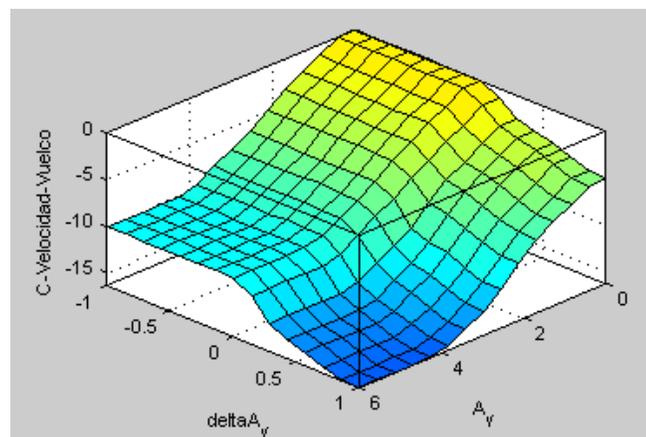


FIGURA 3-64: MANTO DE SOLUCIONES DE MÓDULO DE "PREVENCIÓN DE VUELCO"

Producto de la gran cantidad de variables manejadas por el bloque responsable de la generación del ángulo del volante necesario para la evasión de obstáculos, se decide imprimir las parejas de variables más significativas y representativas según la base de conocimiento entregada en la sección anterior. La Figura 3-65 entrega los mantos generados por: *a)* Sensor Izquierdo v/s Sensor Central, *b)* Sensor Izquierdo v/s Sensor Derecho, *c)* Sensor Derecho v/s Sensor Central, *d)* Sensor Izquierdo v/s variación de distancia del sensor Izquierdo, *e)* variación de distancia de sensor derecho v/s variación de distancia del sensor izquierdo, *f)* Sensor Derecho v/s variación de distancia de sensor derecho, *g)* Sensor Central v/s variación de distancia sensor Izquierdo, *h)* Sensor Central v/s variación de distancia sensor derecho, *i)* Sensor Izquierdo v/s variación de distancia de sensor derecho, y *j)* Sensor Derecho v/s variación de distancia de sensor Izquierdo.

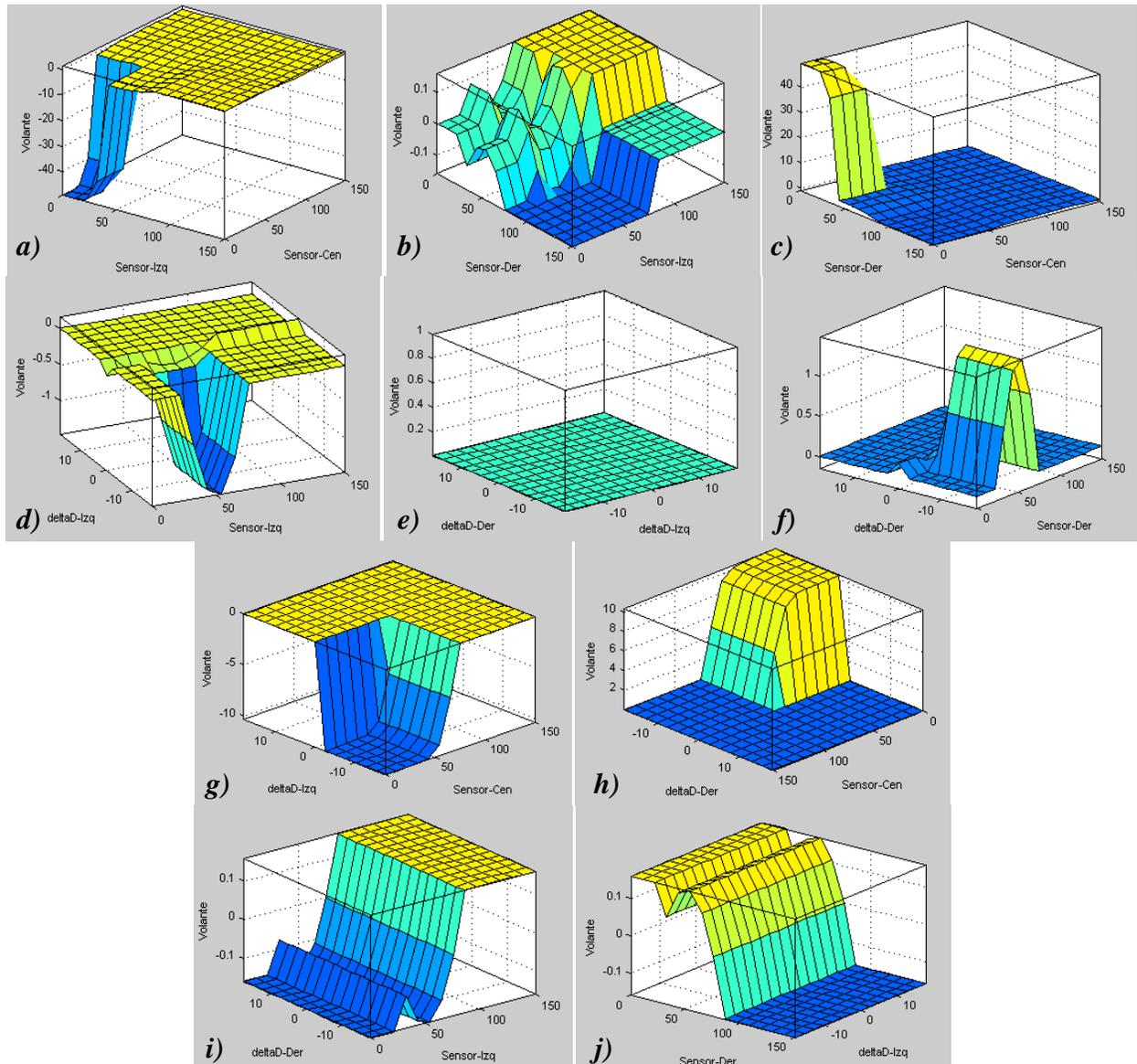


FIGURA 3-65: MANTO DE SOLUCIONES DE MÓDULO DE "EVASOR DE OBSTÁCULOS"

Al analizar el comportamiento de los pares de variables observados en la Figura 3-65, se aprecia claramente como se forman pares de espejos, respecto de la señal generada, entre las subfiguras *a)-c)*, *d)-f)*, *g)-h)* e *i)-j)*. Adicionalmente a eso, se rescata la presencia de la

subfigura *b*), que entrega un comportamiento no relevante entre los sensores izquierdo y derecho, del mismo modo el par *i*)-*j*) revela que tampoco existe una relación entre el cambio de distancia de un flanco con respecto al flanco contrario, al no sobrepasar  $\pm 0,15^\circ$  el valor de salida, en ambos casos. Por otra parte la subfigura *e*) revela la no relación entre las variaciones de distancia de los sensores izquierdo y derecho, todo esto dentro del marco generado de reglas para dicho controlador.

Tras finalizar el diseño y posterior a la configuración en MATLAB® de las funciones difusas para controlar el vehículo ante la aparición de un obstáculo, se procede a implementar en ambiente de Simulink, perteneciente a MATLAB®, como se observa en la Figura 3-66.

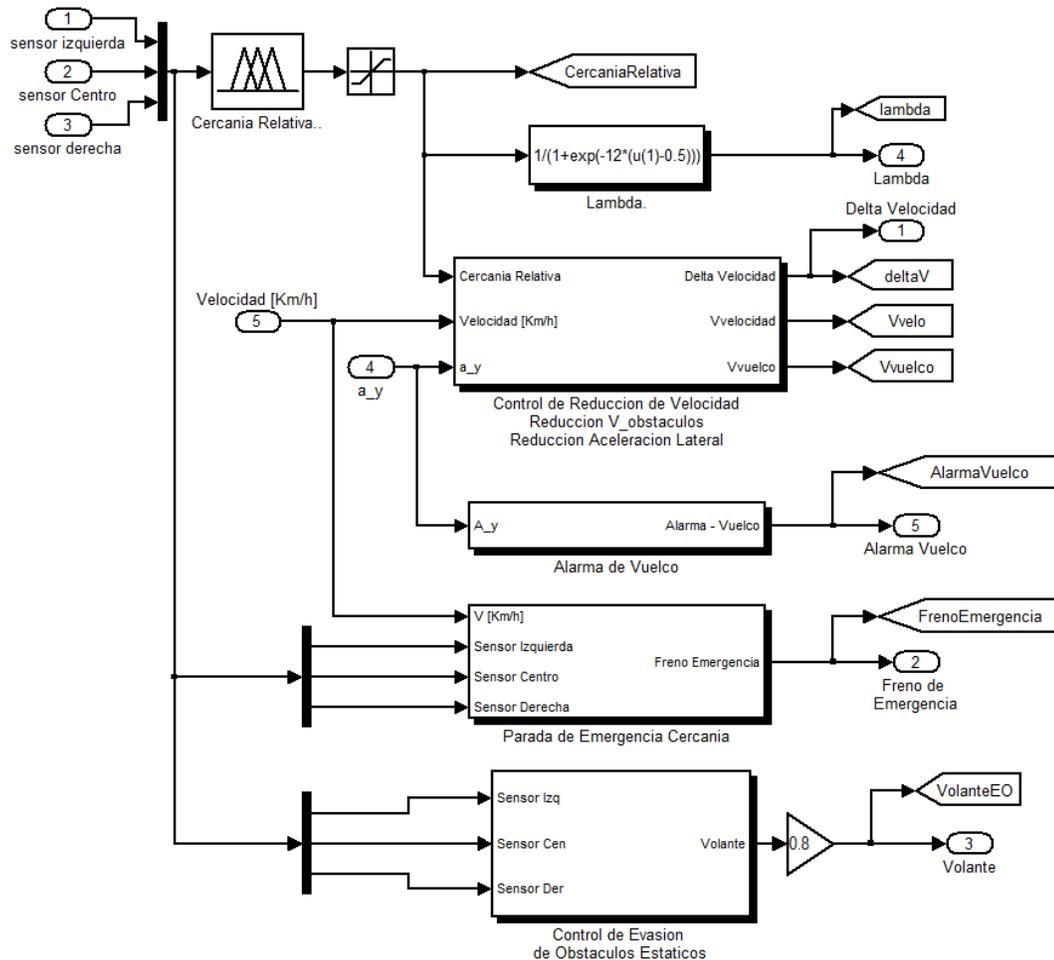


FIGURA 3-66: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA FUNCIÓN DE EVASIÓN DE OBSTACULOS

En este diagrama de bloques se crean sub-bloques que contengan parte de la implementación, con el fin de ayudar al orden visual de este. El bloque encargado de controlar la reducción de velocidad fue detalladamente explicado en la Figura 3-60, perteneciente a la sección anterior. Los bloques de “Alarma de Vuelco” y “Parada de Emergencia por Obstáculo Cercano” solo poseen en su interior la función “if” respectiva<sup>7</sup> y el bloque “Control de Evasión de

<sup>7</sup> Diagramas de Bloque de implementación en Anexo

Obstáculos Estáticos” solo posee la construcción de las variaciones de distancia ( $\Delta d$ ), como se muestran en la Figura 3-67

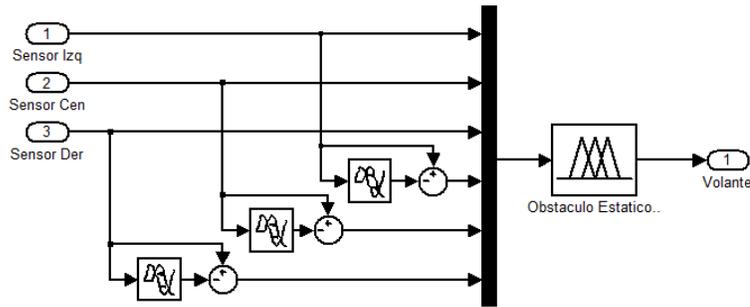


FIGURA 3-67: DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CONTROL DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS.

Es importante señalar que en la implementación se integra un saturador en la señal de salida del control difuso de Cercanía Relativa, entre los valores 0 y 1, para impedir ambigüedades y acotar dicho parámetro a los valores estipulados en el diseño.

Además se considera necesario adicionar una ganancia de valor 0,8 a la señal de salida del control de “Evasión de Obstáculos Estáticos”, para optimizar el valor aplicado en el ángulo del volante y conseguir resultados más eficientes y precisos, siendo estos resultados analizados en el siguiente capítulo.

La implementación también cuenta con una serie de bloques denominados “gato”, cuyo fin es almacenar los datos relevantes de cada simulación.

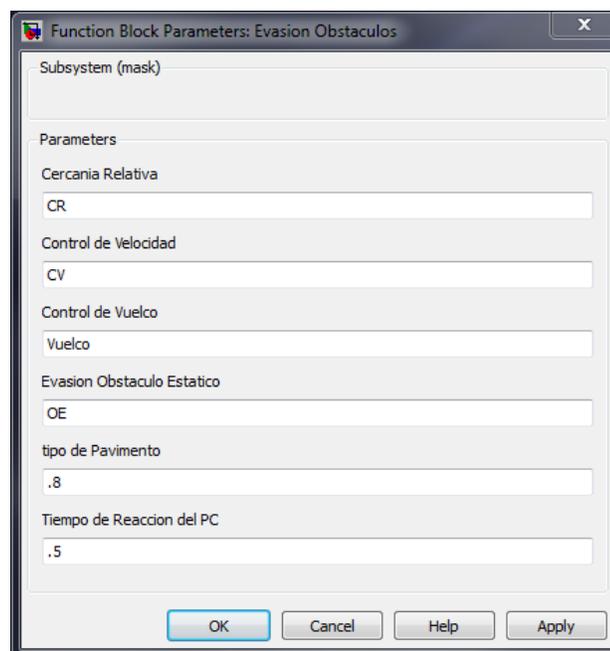


FIGURA 3-68: PARÁMETROS DEL CONTROL DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En la Figura 3-68 se observa los parámetros controlados para la evasión de obstáculos, donde los primeros 4 corresponden a los controladores difusos de las 4 componentes que

configuran la evasión de obstáculos. Adicionalmente es necesario ingresar el coeficiente de fricción entre el neumático y el camino (el cual debe ser el mismo ingresado en el bloque del automóvil) y el tiempo de reacción estimado del sistema computacional y actuador del vehículo.

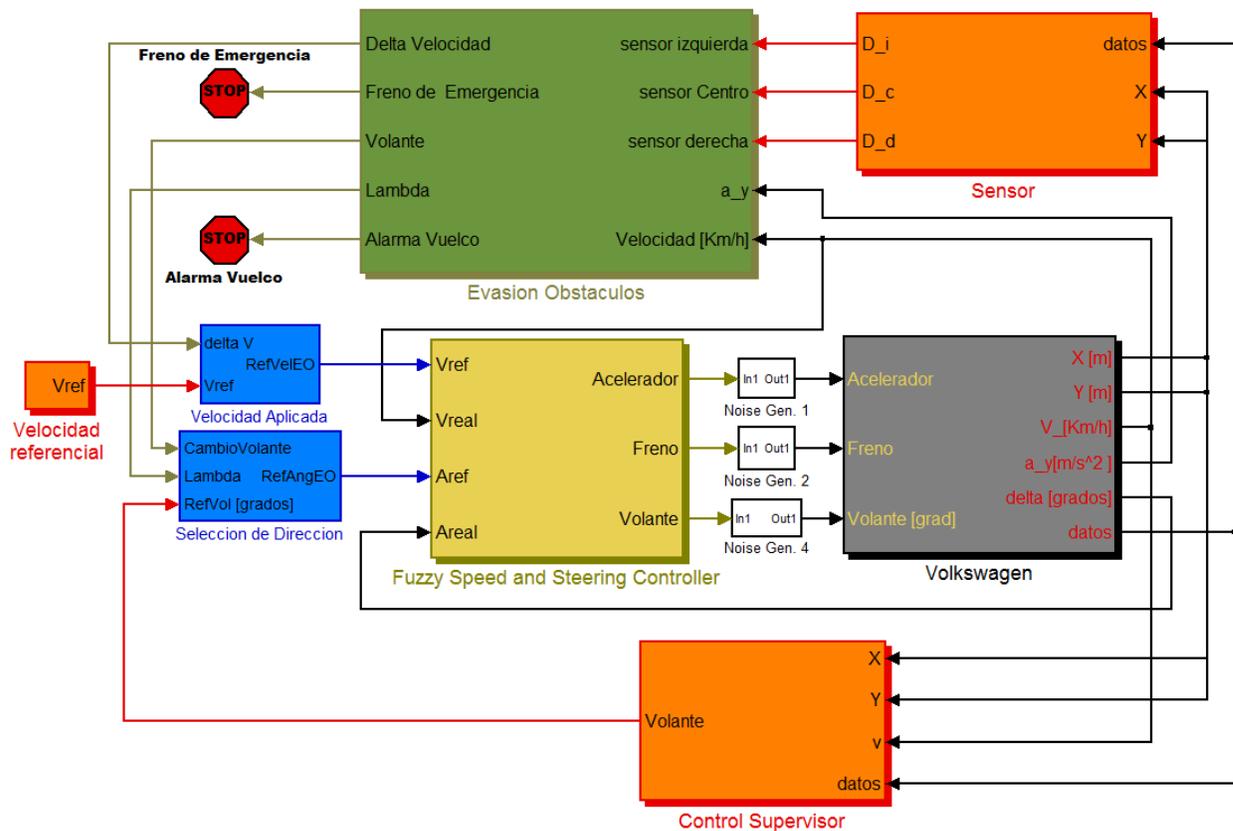


FIGURA 3-69: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SIMULACIÓN

Finalmente el diagrama entregado en la Figura 3-69 corresponde a la implementación de todos los actores presentes en la simulación del modelo dinámico, el cual se guía por un ruta planeada en presencia de un obstáculo estático, conducido a través de un controlador de bajo nivel y considerando un robusto sistema de seguridad. Adicionalmente, buscando mayor robustez en el análisis del sistema completo, se consideran funciones generadoras de ruido blanco entre las señales generadas por el control de bajo nivel y los actuadores del modelo dinámico del vehículo Volkswagen® Tiguan.

Como última implementación se integra un sub-boque que contenga todos los gráficos y valores manejados por el usuario, manera de acceder de forma simple a ellos y que facilite su estudio y análisis.

### 3.6 COMENTARIOS

En este capítulo se presentó la implementación del sistema completo que considera un modelo virtual de un vehículo, a través de ecuaciones dinámicas, implementado en MATLAB®-Simulink, el cual pretende modelar el comportamiento del automóvil Tiguan de la empresa

Volkswagen año 2010, para la evaluación de estrategias de control en particular las de evasión de obstáculos.

Para la evaluación y criterios a seguir en la presencia de un obstáculo en ruta de colisión, además del modelo, fue necesario implementar un controlador de bajo nivel el cual permita la interacción entre referencias naturales, como es el ángulo que se desea girar el volante y la velocidad que se desea alcanzar, con respecto a los actuadores del vehículo, correspondientes al valor necesario a aplicar en el volante y en los pedales, respectivamente. Esto se logra implementado el modelo desarrollado en una memoria del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Chile [34].

Adicionalmente, para la obtención del camino por el cual el vehículo se desplaza en ruta de colisión se diseña e implementa un “Control Supervisor de Ruta”, que pese a ser considerado provisorio, ya que esta tarea corresponde al trabajo de título en desarrollo de otro estudiante, obtuvo resultados satisfactorios, entregando valores acotados con respecto a su error permanente tiempo y distancia, de convergencia y oscilación.

Para la detección de obstáculos, fue necesario considerar un diseño e implementación de un sensor que emulara la adquisición de datos. Este se construyó buscando la forma más eficiente de interpretar datos que son entregados al control de evasión de ruta y poder ser evaluados de una forma satisfactoria. Para el alcance de esta memoria, se considera que la información entregada por los sensores corresponde a una función probabilística Gaussiana bivariada, de medias  $\mu_x$  y  $\mu_y$ , y desviación estándar  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  conocidas, considerando el objeto como una circunferencia centrada en  $(\mu_x, \mu_y)$  y de radio igual a  $3 * \max(\sigma_x, \sigma_y)$ .

Por último, el presente capítulo concluye con el diseño e implementación de las funciones difusas que conforman el completo control de evasión de obstáculos, consistente en un módulo encargado de evaluar la cercanía relativa al obstáculo que se encuentre en ruta de colisión, un módulo encargado de decidir cuánto reducir la velocidad para poder evadir dicho obstáculo, y un complejo criterio que entregue el valor necesario a la referencia del ángulo del volante para sortear la obstrucción con una seguridad del 99,9%. Además se integra un protocolo de seguridad ante la presencia de un obstáculo imposible de rodear o la posibilidad de que el vehículo derrape o pueda volcase, esto último intentado generando una reducción de velocidad calculada por un criterio difuso ante la evaluación de la aceleración lateral y su variación.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS OBTENIDOS

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir del análisis, diseño e implementación del modelo dinámico tipo bicicleta, emulando un Volkswagen® Tiguan año 2010, para efectos de aplicar en él las pruebas de validación de la estrategia de control de evasión de obstáculos. Para todo ello, primero es necesario realizar un análisis de coherencia y efectividad del modelo dinámico implementado. Posteriormente, se analiza el comportamiento del mismo móvil ante la presencia de obstáculos que bloquean la ruta originalmente trazada. Todas estas pruebas son realizadas en ambiente de MATLAB®-Simulink versión r2009a para Windows de 64 bits.

## 4.1 VALIDACIÓN DEL MODELO DINÁMICO TIPO

### BICICLETA

Para descartar la aparición de movimientos no deseados o incoherentes en la simulación de la trayectoria del automóvil, por ejemplo cambios instantáneos de su dirección o posición, giros o rotaciones sobre sus ejes vertical, longitudinal y/o transversal, o “teletransportación”, se diseña un protocolo de pruebas de la simulación en el mismo software MATLAB®. Esta prueba consiste en la adquisición de datos del movimiento simulado, provenientes de las 4 esquinas del vehículo, con una frecuencia de 5 segundos entre cada toma de datos, dibujando el auto en cada ocasión y trazando la ruta generada por el centro de masa, además, se traza el vector velocidad del vehículo

En la Figura 4-1 se puede apreciar en color cian el vector velocidad del vehículo; además el cuadrado negro corresponde al centro de masa, la barra verde a la puerta derecha y la barra roja al frente del automóvil.

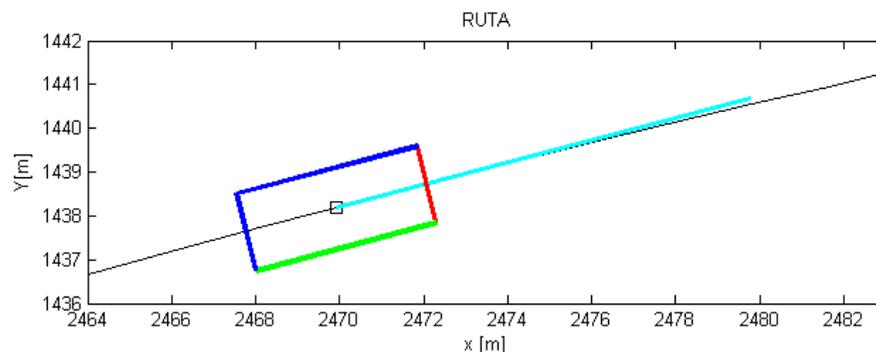
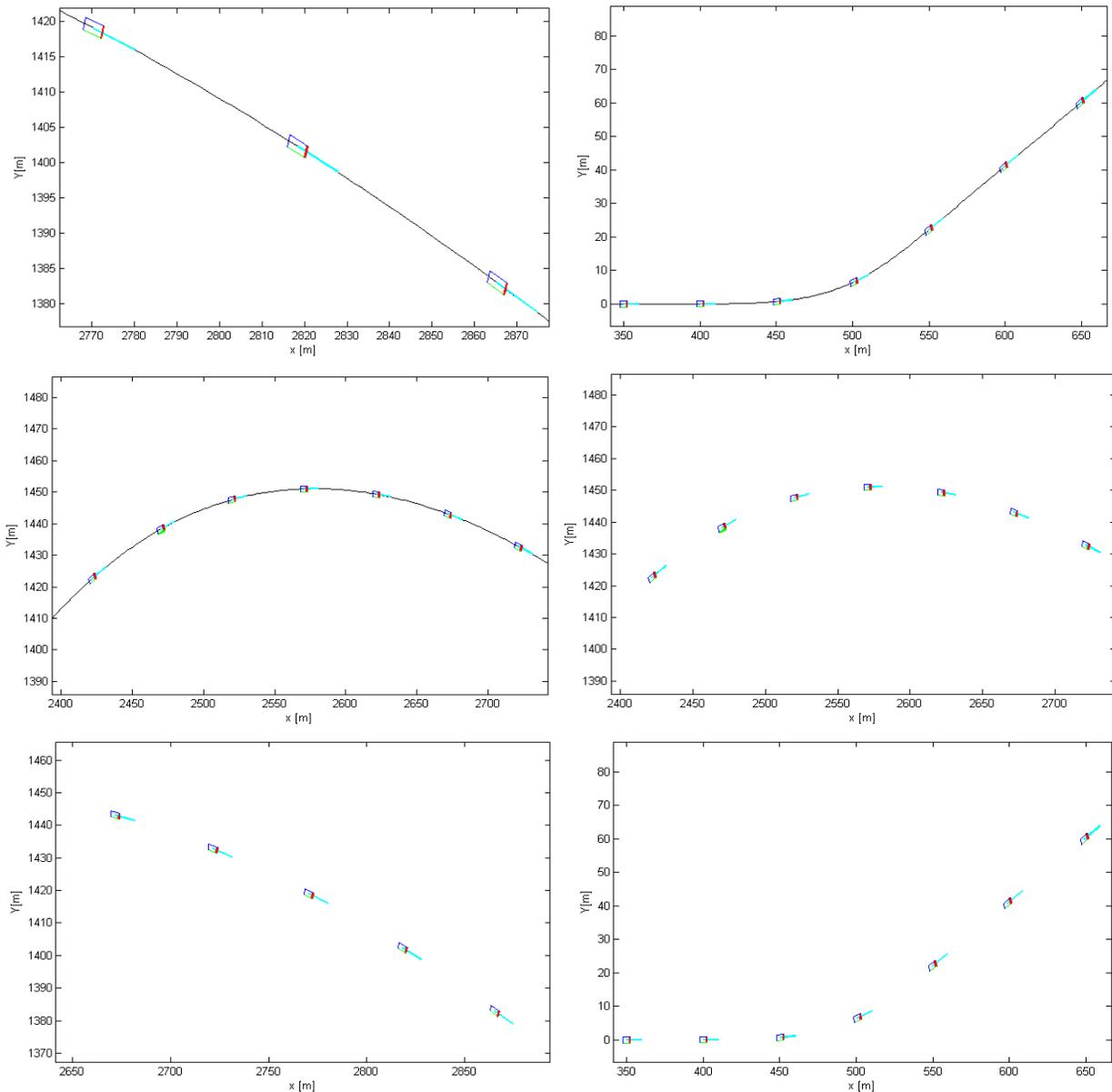


FIGURA 4-1: DIBUJO DE VEHÍCULO VIRTUAL

Una vez definida la composición del vehículo se realiza una ruta aleatoria con el fin de estudiar el comportamiento del vehículo al realizar curvas en ésta. Los resultados, expuestos en la

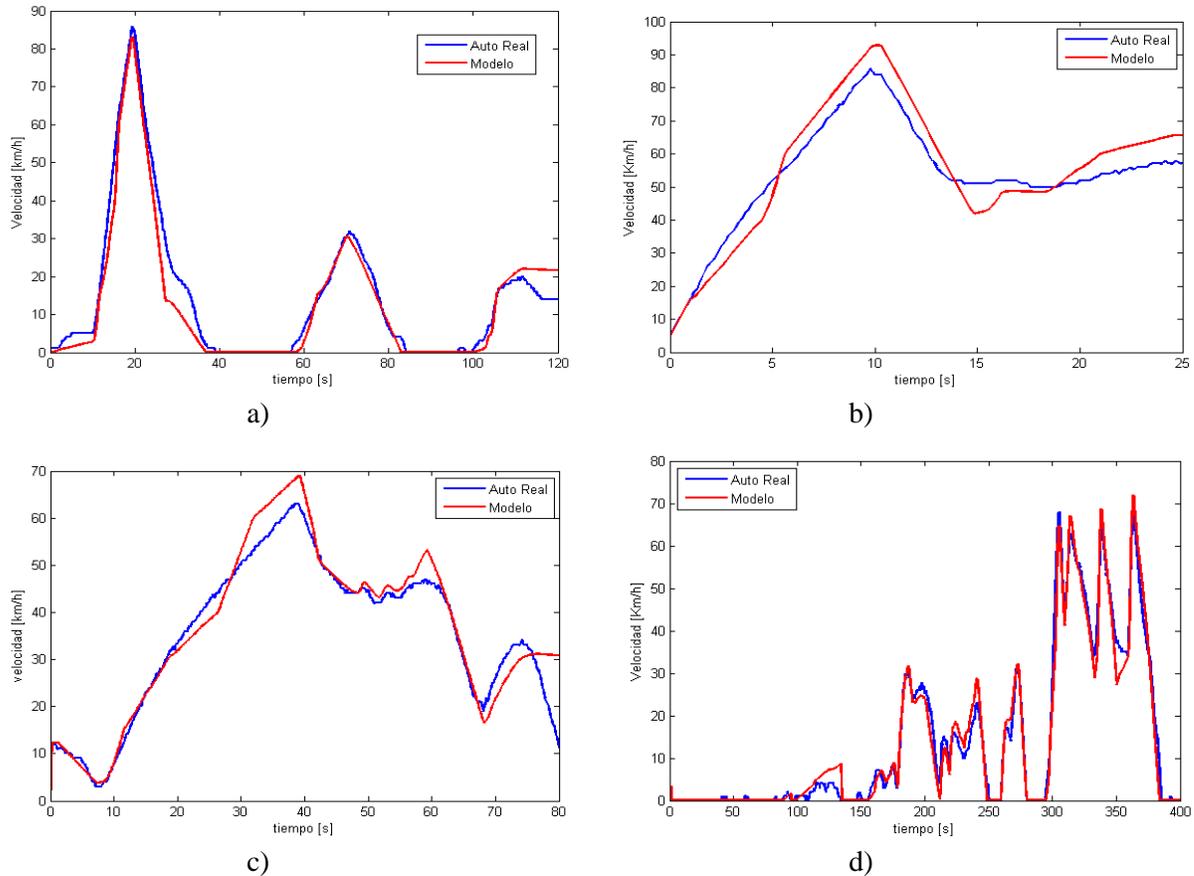
Figura 4-2, revelan con claridad que el recorrido del vehículo es ordinario y sin ninguna anomalía. Y con ello, es fácil ratificar la coherencia del desplazamiento del vehículo.



**FIGURA 4-2: VALIDACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL VEHÍCULO.**

Una vez ratificada la coherencia del vehículo, se analiza el comportamiento del pedal de aceleración. Para ello, se genera un nuevo set de datos de velocidad del vehículo, utilizando la información poseída de la presión realizada sobre el pedal del acelerador, adicionando la presión realizada al pedal del freno. Producto de que este último dato no fue adquirido, se estima interpretando como los instantes donde se presiona el pedal de freno, a los instantes en los cuales no se aplica el acelerador. Dado que lo evaluado es el comportamiento del móvil ante la acción del pedal del acelerador, se fija la intensidad de presión del pedal del freno arbitrariamente, para que esta calce con la pendiente de reducción de velocidad del vehículo, sin perder objetividad en el análisis de la aceleración (positiva) del modelo.

Tras obtener la velocidad del vehículo utilizando el modelo generado en el presente documento, esta se compara con la velocidad real del vehículo adquirida al momento de generar la información de presión del pedal. Estos resultados, observados en la Figura 4-3, entregan satisfactorios resultados, al poseer un seguimiento coherente de la velocidad real.



**FIGURA 4-3: VALIDACIÓN DEL ACELERADOR**

Los resultados obtenidos revelan un comportamiento consistente con los datos adquiridos experimentalmente desde el punto de vista global; sin embargo, en ocasiones puntuales se ven diferencias de hasta  $15 \left[ \frac{km}{h} \right]$  entre la velocidad real y la modelada. En la Tabla 4-1, se presenta un estudio cuantitativo de las 4 pruebas desarrolladas como validación, para con ello obtener un mejor análisis del comportamiento del modelo simulado.

Analizando los datos entregados en la Tabla 4-1, se observa que el promedio del error absoluto general, consistente en la unión de los datos de todas las pruebas, no excede los  $3 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , equivalente a menos del 3,5% con respecto a la mayor velocidad alcanzada. Sin embargo, el máximo valor alcanzado por el error es  $15,92 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , correspondiente al 18,53%, alcanzado en la primera prueba, lo que indica que es necesario afinar aún más los valores. Adicionalmente, el error cuadrático medio reafirma lo concluido con anterioridad, entregando una media global de  $3,95 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , variando en menos de una unidad con respecto del error absoluto, y equivalente a tan solo un 4,6 % de error. Es fundamental considerar que en el modelo no se integra la pendiente del

camino a la que el vehículo es expuesto, lo que generara una variación en la velocidad respecto a la misma presión de pedal considerando la misma condición inicial de velocidad. Finalmente se establece que el modelo actúa satisfactoriamente, dado que una reducción mayor del error asimila no sólo al modelo del automóvil deseado, si no también considera las características determinadas del camino, y más importante que eso, se estaría modelando la forma de conducción del chofer que realizo las pruebas.

**TABLA 4-1: VALIDACIÓN DE ACELERADOR**

Validación del Acelerador.						
	Prueba a)	Prueba b)	Prueba c)	Prueba d)	Media Global	[unidad]
Error Medio Absoluto	2,51	5,32	2,38	1,73	<b>2,99</b>	[Km/h]
Max velocidad	85,93	85,89	63,00	69,00	<b>85,93</b>	[Km/h]
Porcentaje $e_{medio}$ <sup>8</sup>	2,92	6,19	3,78	2,51	<b>3,47</b>	[%]
Mayor error	15,92	9,07	12,00	14,24	<b>15,92</b>	[Km/h]
Porcentaje $e_{max}$ <sup>9</sup>	18,53	10,56	19,04	20,64	<b>18,53</b>	[%]
Error Cuadrático Medio (RMS)	4,06	5,87	3,11	2,76	<b>3,95</b>	[Km/h]
Porcentaje $RMS$	4,73	6,83	4,93	4,00	<b>4,60</b>	[%]

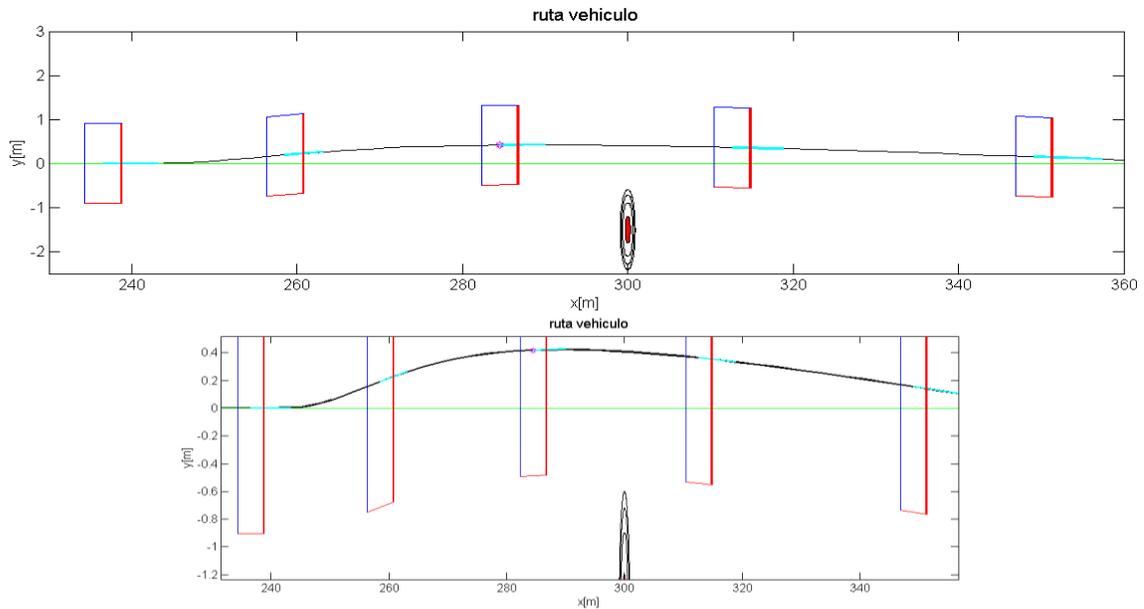
## 4.2 EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

Tras la implementación del control diseñado en el capítulo anterior, y la interconexión de los diferentes módulos responsables del completo control del AGV, se procede a evaluar ante diferentes obstrucciones, en posiciones y dimensiones variadas, el controlador de evasión de obstáculos, obteniendo los siguientes resultados:

La Figura 4-4 muestra la ruta del vehículo generada por la existencia de un obstáculo de desviación estándar  $\sigma = 0,3$  [m] centrada a 300 [m] de distancia y alejado en 1,5[m] de la ruta trazada, a una velocidad de  $30 \left[ \frac{km}{h} \right]$ . En dicha figura se dibuja el vehículo, en sus proporciones reales, cada 5 segundos, adicionalmente en verde se observa la trayectoria deseada. El obstáculo, como fue expresado en un capítulo anterior, corresponde a una función de probabilidad Gaussiana, luego esta se expresa en forma de un círculo de fondo rojo utilizando como radio el valor de  $\sigma$ . Adicionalmente, se dibujan 3 circunferencias de diferentes radios, para plasmar los diferentes rangos de seguridad, donde,  $2\sigma$  correspondiente a 97,7% de convergencia,  $2,6\sigma$  correspondiente al 99,5% de convergencia y  $3\sigma$  correspondiente al 99,9%.

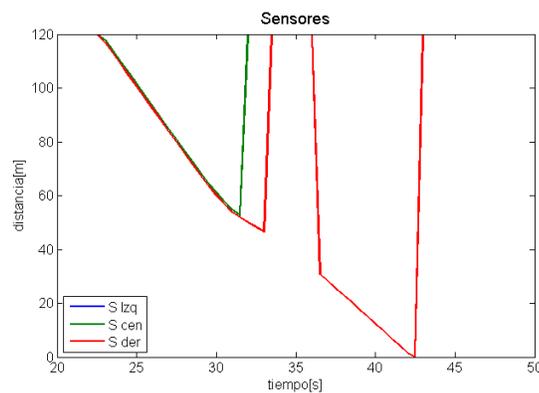
Finalmente, gracias a la Figura 4-4, se puede confirmar que el vehículo en todos los instante plasmados evita al obstáculo con una seguridad de al menos un 99,9%.

<sup>8</sup>  $Porcentaje_{e_{medio}} = \frac{Error\ Medio}{Max\ Velocidad} \cdot 100$   
<sup>9</sup>  $Porcentaje_{e_{max}} = \frac{Mayor\ Error}{Max\ Velocidad} \cdot 100$

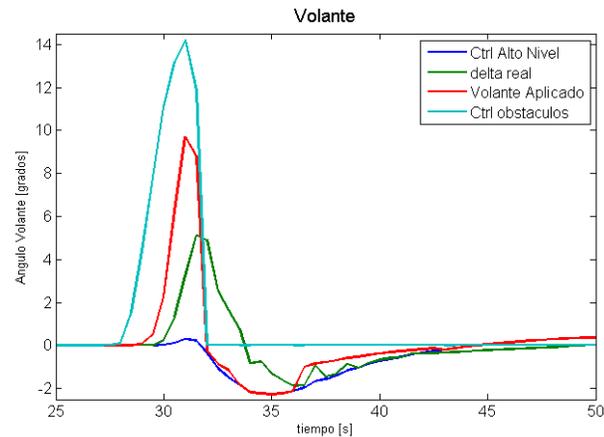


**FIGURA 4-4: RUTA DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 0,3[m]$**

La Figura 4-5 corresponde a los datos obtenidos por el sensor ante la proximidad de un obstáculo. En la figura se observa que a contar de los 25 segundos la distancia, tanto en la zona derecha del sensor como en la central, comienza a disminuir su valor. Tras 6 segundos, como se espera, es el sensor central el que primero deja de percibir el obstáculo, un par de segundos después es el sensor lateral el que deja de percibirlo, lo que es esperado ya que se busca que solo la zona central del vehículo no presente obstrucción. Posteriormente, a los 36 segundos, reaparece la señal de cercanía al objeto explosivamente por el flanco derecho, esto se debe a que tras dejar de percibir el obstáculo el vehículo es guiado por el control supervisor de ruta nuevamente a converger al camino originalmente planteado. Al percatarse de la reaparición del obstáculo, el vehículo continúa paralelamente a este hasta sobrepasarlo. Esto último es fácilmente comprobado, ya que a pesar de la reducción del valor de distancia lateral nunca existe la aparición de un valor en la zona central del vehículo. Ratificado al observar la Figura 4-6, donde, tras el instante 36, el valor de la señal aplicada al ángulo del volante es espontánea y fuertemente limitada, por la señal de control de evasión de obstáculos, logrando rodear al obstáculo de manera correcta.

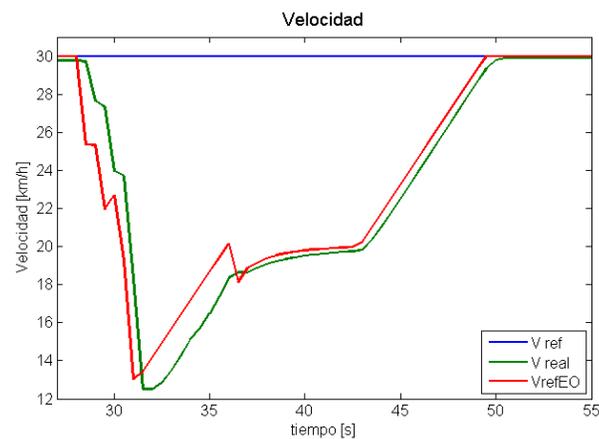


**FIGURA 4-5: SEÑAL DE SENSOR: OBJETO A LA DERECHA DE  $\sigma = 0,3[m]$**



**FIGURA 4-6: ÁNGULO VOLANTE: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 0,3[m]$**

Es importante recordar que la señal aplicada al ángulo del Volante está calculada por la suma de las señales entregadas por la estrategia de difusa de “Control de Evasor de Obstáculos” más el “Control Supervisor de Ruta” (o de Alto nivel), ambos ponderados por factores dependientes del valor entregado por el bloque difuso de “Cercanía Relativa”



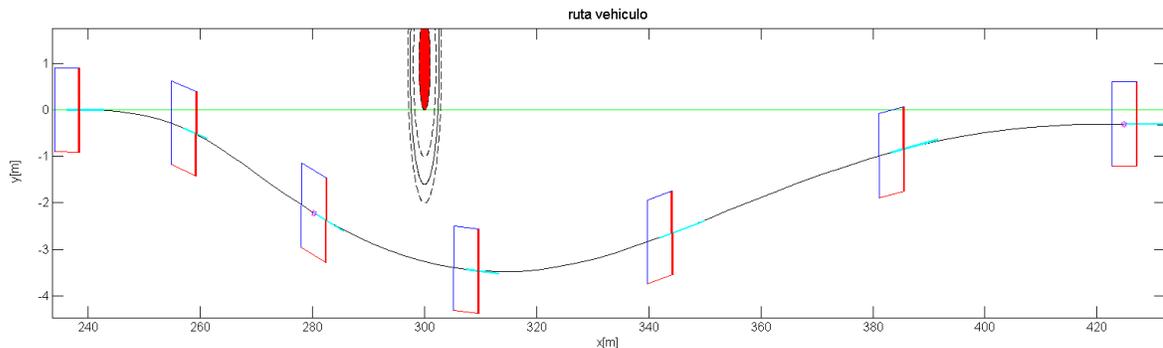
**FIGURA 4-7: VELOCIDAD DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA DERECHA  $\sigma = 0,3[m]$**

La Figura 4-7 representa el comportamiento de la velocidad adquirida por el vehículo durante la evasión del obstáculo. En él se aprecia, en color azul, el valor referencial entregado al vehículo por el Control Supervisor (V ref), además se muestra, en color rojo, la velocidad entregada tras la reducción producida por el control de velocidad de evasión de obstáculos o prevención de vuelcos (VrefEO). Por último, en color verde, es apreciable la velocidad que realmente posee el vehículo en un momento determinado.

Según lo observado en la Figura 4-5, alrededor del segundo 32, se deja de detectar el obstáculo en la zona central y un segundo después en la zona lateral, luego la velocidad en estos instantes, consecuentemente con lo planeado, comienza a recuperar su valor referencial dictado por el control supervisor. Sin embargo, se sabe que alrededor del segundo 36 nuevamente se hace presente el obstáculo, por lo tanto es necesario una nueva reducción de velocidad, valorándose la decisión de saturar la pendiente de regreso a la velocidad referencial, permitiendo que el vehículo

no experimente una brusca aceleración y desaceleración en menos de 5 segundos lo que sin duda contribuye a una conducción más suave y natural. Tras este acontecimiento, la velocidad comienza a recuperar lentamente su velocidad referencial, contribuyendo a una segura y eficiente evasión.

La Figura 4-8 corresponde al segundo ejercicio, consistente en un camino expuesto a la presencia de un obstáculo a 300 metros de distancia y a un metro a la izquierda de la ruta trazada, que posee una desviación estándar  $\sigma = 1[m]$ . En esta ocasión se utiliza un obstáculo en la zona contraria a la del ejemplo anterior y de mayores dimensiones, obteniéndose nuevamente resultados satisfactorios. En la figura a continuación se observa claramente como el obstáculo es sorteado con una seguridad mayor del 99,9%.



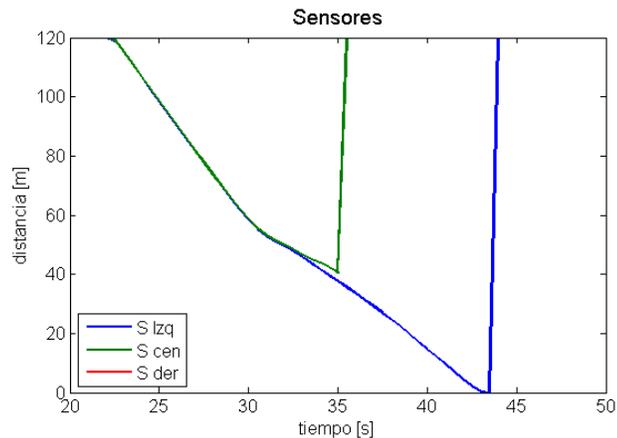
**FIGURA 4-8: RUTA DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA IZQUIERDA DE  $\sigma = 1[m]$**

La gran diferencia existente entre este experimento y el anteriormente analizado, radica en que para evitar el primer obstáculo el vehículo necesitaba cerca de medio metro de desviación de la ruta original, mientras que en este segundo caso son 2 metros necesarios para no colisionarlo. Adicionalmente, al obtener resultados satisfactorios en ambos experimentos, se comprueba la robustez del sistema para ambos costados.

Consecuentemente con el alejamiento de la ruta, la distancia longitudinal necesaria para regresar a ésta también aumenta. En ambos casos el automóvil se comienza a desviar 60[m] antes del obstáculo, por otro lado la distancia necesaria para volver a la ruta en el segundo caso duplica los 60[m] del primero, pero de igual modo, realiza una suave y segura convergencia. Dado que el regreso a la ruta depende del control supervisor, se espera que dicha distancia se reduzca al mejorar este último controlador.

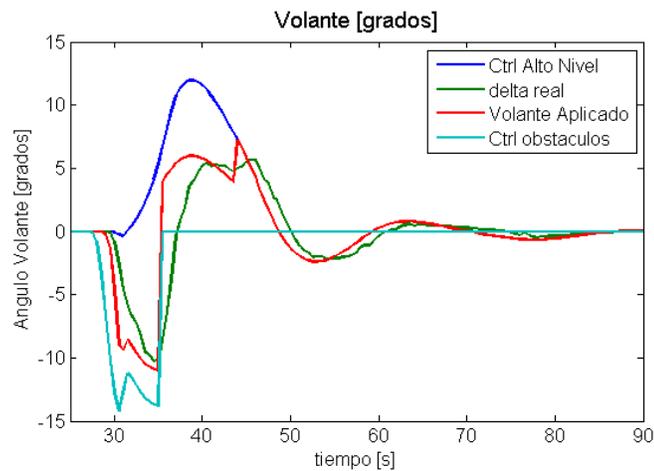
La Figura 4-9 corresponde a la señal entregada por el sensor ante la presencia del obstáculo, al igual que en el caso anterior, es el sensor lateral quien percibe el objeto por una mayor cantidad de tiempo. Sin embargo, este ejercicio se diferencia del caso anterior en que tras dejar de detectar el obstáculo este no reaparece, esto se debe a que producto del tamaño del obstáculo, al ocupar una superficie mayor, el sensor lateral nunca deja de percibir la presencia de este, hasta que es sobrepasado completamente, como se observa en dicha figura.

Consecuentemente con el aumento de tamaño del obstáculo, el tiempo que se tarda el vehículo en dejar de tenerlo en frente de él aumenta en alrededor de 4 [s]. Esto último no se plasma fuertemente en el sensor lateral, pues la lejanía del centro del obstáculo es el mismo en ambos casos



**FIGURA 4-9: SEÑAL DE SENSOR: OBJETO A LA IZQUIERDA DE  $\sigma = 1[m]$**

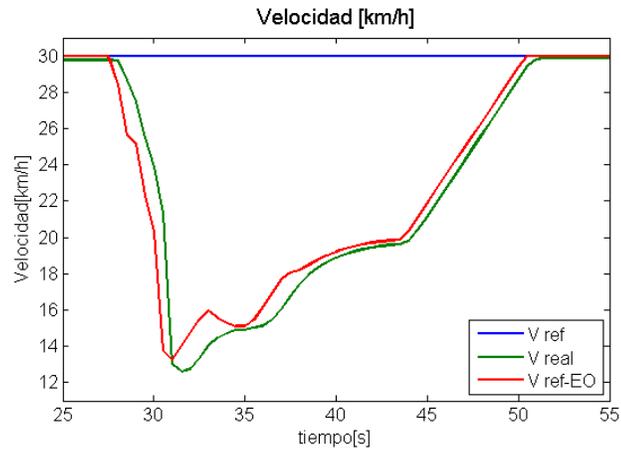
Al analizar la Figura 4-10 se aprecia cómo se comporta el volante ante la aparición del obstáculo, rescatando que el tiempo empleado para evadir el obstáculo es mayor, así mismo el valor del ángulo aplicado al volante es mayor en más del doble que el caso anterior, lógicamente por ser una obstrucción de mayor área.



**FIGURA 4-10: ÁNGULO VOLANTE: OBSTÁCULO A LA IZQUIERDA DE  $\sigma = 1[m]$**

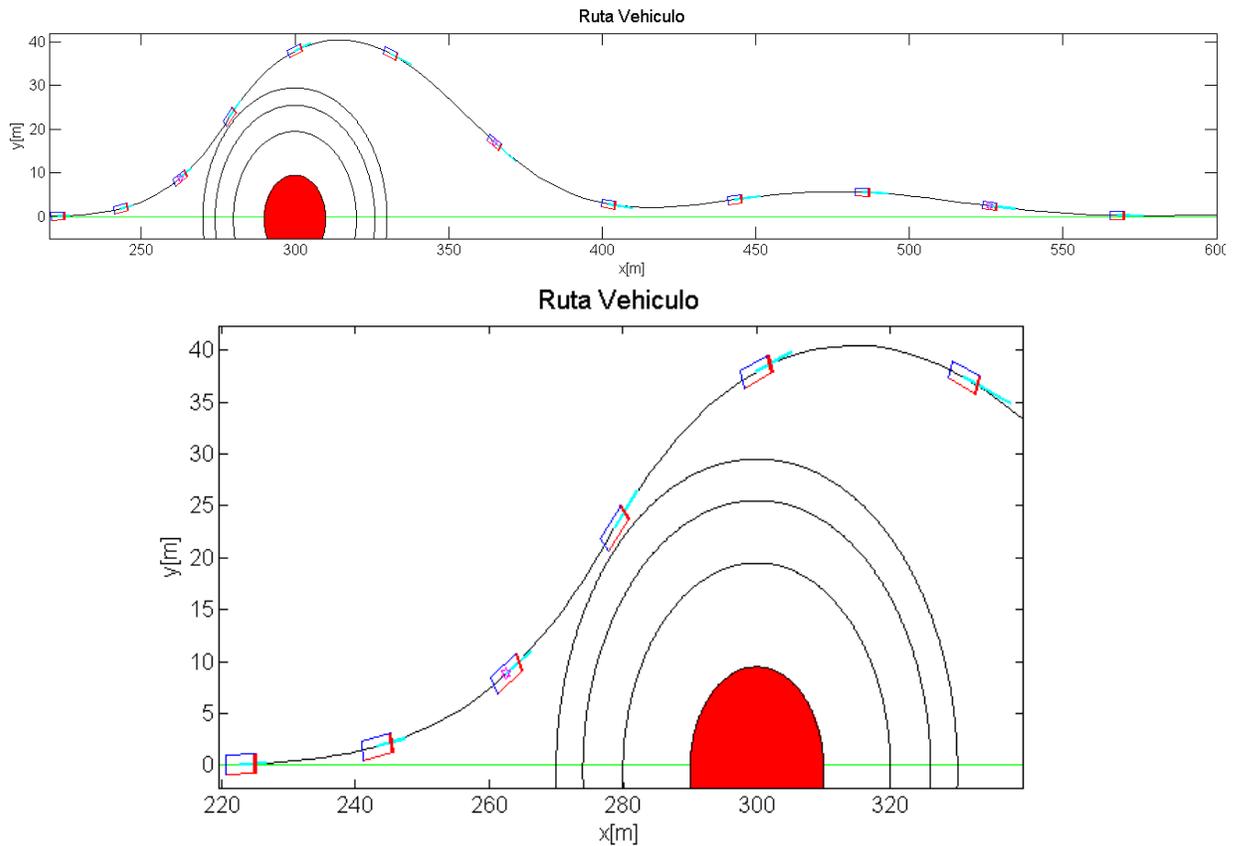
La velocidad observada en la Figura 4-11 revela un comportamiento semejante al aplicado en el ejercicio anterior. Es importante rescatar de la figura que existe un pequeño retardo entre la señal aplicada al vehículo y la velocidad real de éste, siendo esto producido por la existencia de los actuadores del vehículo.

Para conseguir una mayor robustez en el análisis del sistema se genera un tercer experimento, el cual consiste en evadir un obstáculo de proporciones mucho mayores y ubicado en medio de la ruta deseada. Poseyendo una desviación estándar  $\sigma = 10[m]$  y centrado en la coordenada (300; 0.5).



**FIGURA 4-11: VELOCIDAD DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 1[m]$**

La Figura 4-12 grafica la ruta generada para evadir un obstáculo cuyo radio efectivo de seguridad corresponde a 30 [m]. Naturalmente esta obstrucción no corresponde a una situación habitual, sin embargo, dado que el fin del AMTC corresponde a tecnología aplicada en la minería, esta situación pudiese darse tras el desprendimiento de rocas de un cerro o la generación de una gran fosa. De esta figura se distinguen resultados satisfactorios al poder rodearse efectivamente la obstrucción con un rango de seguridad mayor al 99,9%, lo que equivale a alejarse más de 30 [m] de la ruta planeada originalmente.



**FIGURA 4-12: RUTA DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 10[m]$**

Al analizar la aplicación del volante, entregada en la Figura 4-13, se observa la aplicación del control de evasión de obstáculos consecuentemente a lo ya analizado en los casos anteriores, salvo el gran valor necesario para realizar una satisfactoria evasión. Al igual que en la velocidad, la señal aplicada al Volante y el efectivamente generado por el vehículo, representado con el reescalamiento del ángulo  $\delta$ , poseen un desfase entre ellos. Esto es generado, al igual que con los pedales, por los retardos y zonas muertas propias de los actuadores del vehículo.

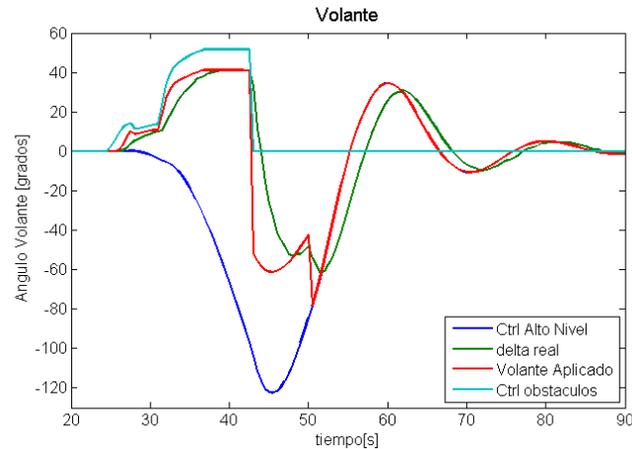


FIGURA 4-13: ANGULO VOLANTE: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 10[m]$

El control de velocidad no genera grandes diferencias con respecto a los previamente estudiados, salvo que se mantiene una velocidad reducida por un período de más de 10[s], según se expone en la Figura 4-14. Ante una recuperación gradual y continuada de la velocidad referencial del vehículo, resalta una reducción de velocidad a los aproximadamente 60 [s], esto se debe al actuar del control de Prevención de Vuelco, que reduce simultáneamente la velocidad como se analiza posteriormente.

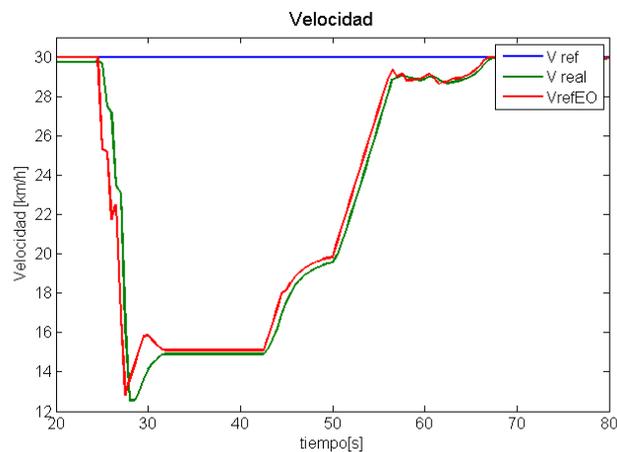


FIGURA 4-14: VELOCIDAD DEL VEHÍCULO: OBSTÁCULO A LA DERECHA DE  $\sigma = 10[m]$

### 4.3 PREVENCIÓN DE VUELCO Y ALARMA DE SEGURIDAD

Debido a la desviación de la ruta trazada para la evasión de los respectivos obstáculos en las 2 primeras experiencias es de baja intensidad, el valor obtenido en la aceleración lateral del vehículo no requiere de la reducción de la aceleración longitudinal. El valor inicial donde se empleará el control de prevención de obstáculos corresponde a  $0,5 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , siendo el valor más alto alcanzado en los primeros ejercicios  $0,1 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , con una variación de ésta ( $\Delta a_y = a_y(t) - a_y(t - 1)$ ) que no superan los  $0,04 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , como se observa en la Figura 4-15 a) y b), luego esta función no es necesaria aplicarla, según lo planteado en la Sección 3.5.4.

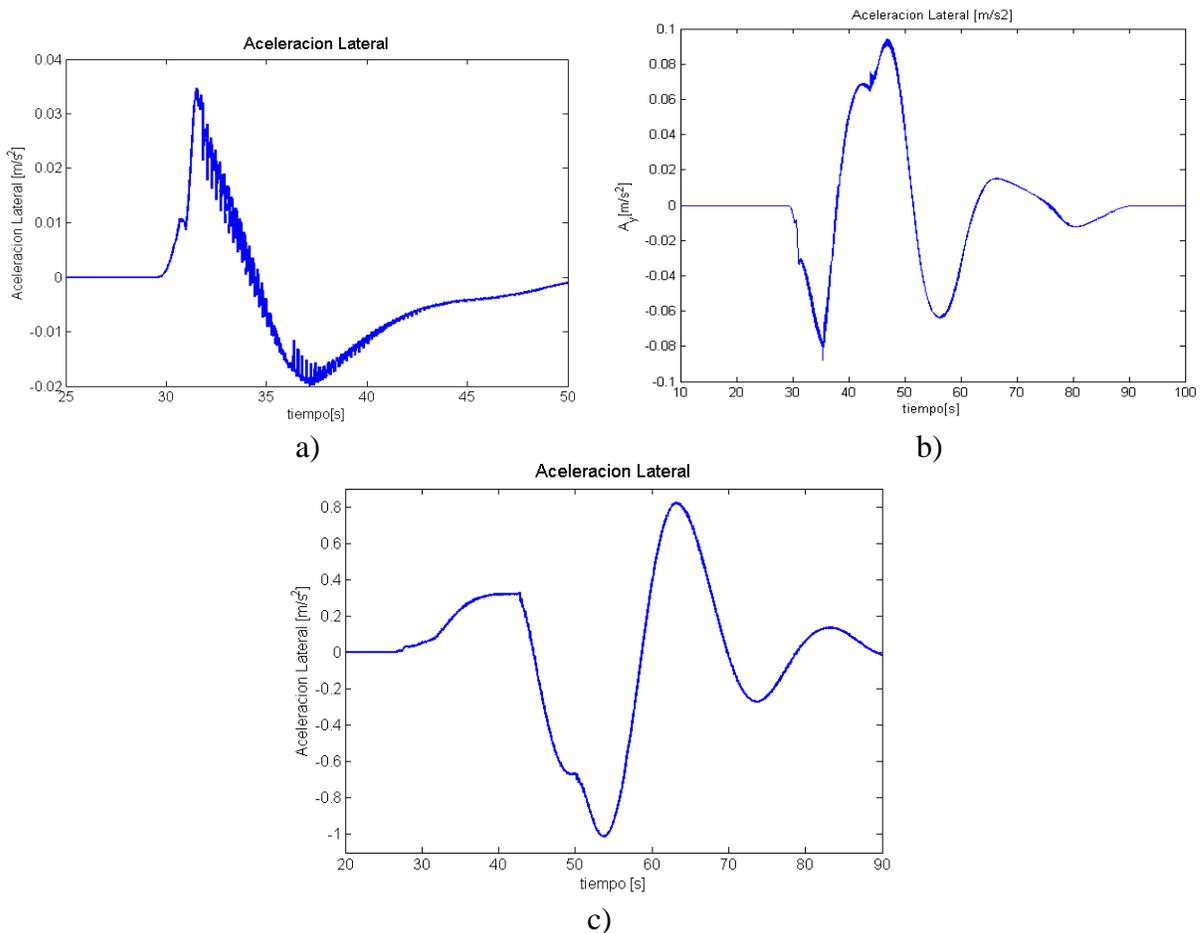


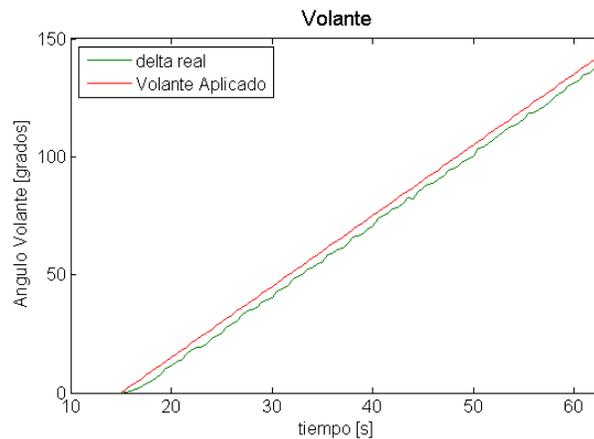
FIGURA 4-15: ACELERACIÓN LATERAL DEL VEHÍCULO: a)  $\sigma = 0,3 [m]$ , b)  $\sigma = 1 [m]$  Y c)  $\sigma = 10 [m]$

La Figura 4-15c), por otro lado, genera una aceleración lateral que, aunque no sobrepasa los  $0,1 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , posee una variación de ésta superior a  $0,2 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ , requisito indispensable para la aplicación del “Control de Prevención de Vuelco”. Esta reducción, aunque mínima, es explícita en la Figura 4-14, donde tras el segundo 55 se experimenta una pequeña disminución de la velocidad referencial, a pesar de ya haber sobrepasado el obstáculo.

En la Figura 4-13 se grafica como el valor aplicado al ángulo del volante, en el segundo 55, corresponde a un valor elevado con respecto a los análisis previamente hecho, alcanzando más de 8 veces éstos valores. Este gran giro aplicado en el volante, sumado a una velocidad instantánea superior a los  $24 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , genera una aceleración lateral que, aunque no se considere peligrosa, sí es perceptible para los integrantes del automóvil.

Analizando la ruta realizada por el vehículo, dibujada en la Figura 4-12, y recordando que el vehículo es dibujado cada 5 segundos (partiendo la imagen en esta ocasión desde el segundo 30), es posible apreciar que la singularidad provocada por la aceleración lateral es generada por el regreso del vehículo a la ruta originalmente trazada, a contar del segundo 55. Esto último es esperable, ya que el vehículo se encuentra a una distancia de  $40[m]$  del camino planeado previo a la aparición de la obstrucción, luego el control supervisor aplica un gran giro al volante en busca de una pronta convergencia.

Para poder analizar efectivamente el control responsable de prevenir derrapes y posibles vuelcos en el automóvil, se genera un ejercicio donde el vehículo comience a realizar giros con radios cada vez menores a una velocidad constante de  $30 \left[ \frac{km}{h} \right]$ , hasta que se accione la alarma de posibilidad de vuelco, contrastando los resultados en la presencia y ausencia de dicho control difuso.

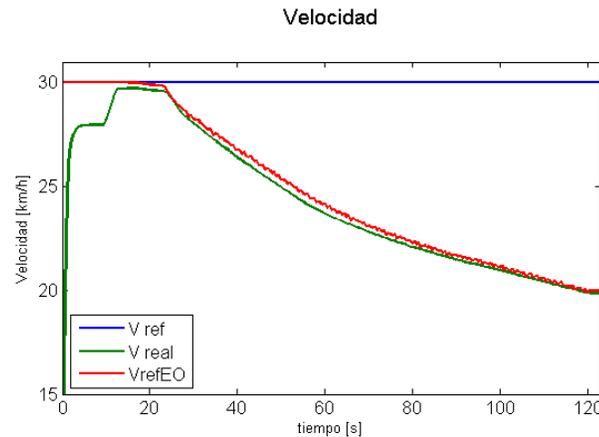


**FIGURA 4-16: ÁNGULO VOLANTE PARA ANÁLISIS DE CONTROL DE PREVENCIÓN DE VUELCO.**

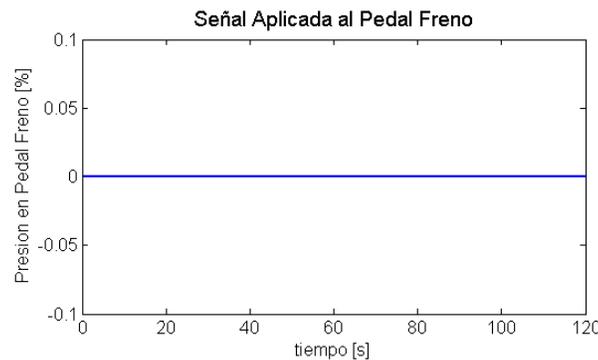
El ángulo aplicado al volante del modelo del vehículo para describir una ruta helicoidal, corresponde al observado en la Figura 4-16, donde se genera un incremento constante al valor del ángulo aplicado al volante de 3 grados por cada segundo a contar del instante 15. Este valor, no será limitado superiormente salvo la propia limitación de giro del volante del automóvil real.

La Figura 4-17, representa el comportamiento de la velocidad controlada por la estrategia difusa de prevención de vuelco, en la presencia de este movimiento helicoidal. Se observa que la reducción entregada al vehículo es de baja intensidad, no sobrepasando el 0,05% de la aceleración de gravedad, equivalente a una desaceleración inferior de  $10 \left[ \frac{km}{h} / min \right]$ . Siendo esto consecuente con la intención de no generar una reducción que pudiese obligar a la presión del pedal del freno y con ello acentuar la posibilidad de derrape o vuelco, logrando este cometido cómo es posible observa en la Figura 4-18. A pesar que la reducción aplicada a esta velocidad

referencial no supera los  $0,2 \left[ \frac{km}{h} / s \right]$ , este valor no deja de ser significativo en la reducción de aceleración tangencial, como se muestra en la (3.36), la aceleración tangencial depende del cuadrado de la velocidad longitudinal que posea el vehículo. Luego al reducir tan solo  $0,046 \left[ \frac{m}{s} \right]$  por cada segundo, se genera una reducción en la aceleración tangencial de aproximadamente  $7,72 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$ .

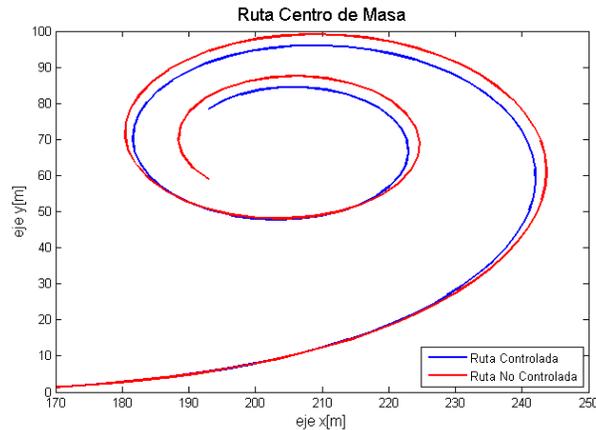


**FIGURA 4-17: VELOCIDAD DEL VEHÍCULO: PRUEBA DE CONTROL DE PREVENCIÓN DE VUELCO**



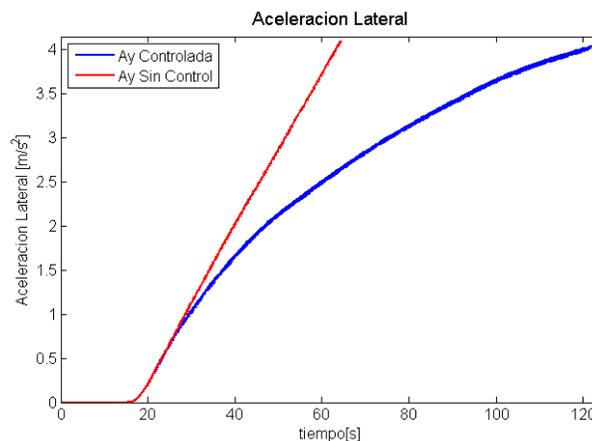
**FIGURA 4-18: SEÑAL DE PRESIÓN APLICADA AL PEDAL DE FRENO DURANTE ACTUACION DE CONTROL DE PREVENCIÓN DE VUELCO**

Si se analiza la ruta generada por el centro de masa del vehículo para los casos donde se omite el control de prevención de vuelco (en rojo) y se considera éste (en azul), Figura 4-19, se observa que el caso controlado genera una ruta más cerrada, de menor radio, que el caso no controlado. Esto es lógico, ya que en el caso controlado se posee una reducción de velocidad, y por ende, recorre una menor distancia con la misma tasa de aumento del ángulo aplicado al volante. Cabe señalar que para lograr una mejor comparación entre las rutas generadas, se decidió graficar ambas rutas hasta el segundo donde se acciona la alarma en la ruta no controlada, y como el móvil en el ejercicio controlado posee menor velocidad, estará retrasado con respecto a la posición del movimiento generado sin el control.



**FIGURA 4-19: RUTA GENERADA POR CENTRO DE MASA DE VEHÍCULO, PRUEBA DE CONTROL DE PREVENCIÓN DE VUELCO.**

Finalmente la Figura 4-20 muestra el comportamiento de las aceleraciones tangenciales de ambos movimientos, observándose claramente como la reducción de velocidad permite prolongar el recorrido por más del doble del tiempo que si no se estuviese controlando.



**FIGURA 4-20: ACELERACIÓN LATERAL, PRUEBA DE CONTROL DE PREVENCIÓN DE VUELCO.**

Adicionalmente, con estos experimentos se permite evaluar la robustez de la alarma de posibilidad de vuelco, diseñada en la Sección 3.5.6, ya que, en ambos experimentos tras superar una aceleración lateral de  $4 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$  y tener una tendencia al alza de la misma aceleración lateral, se alerta y detiene inmediatamente la simulación.

## 4.4 PARADA DE EMERGENCIA.

Para sobrellevar la contingencia de una obstrucción de un tamaño lo suficientemente masivo que es imposible de evadir, se diseña un protocolo evaluando la cercanía del objeto y la distancia de detención total necesaria para no impactarlo, como se analiza en la Sección 3.5.6. Para analizar esta situación se realiza un ejercicio consistente en viajar en ruta de colisión con un

obstáculo de desviación estándar igual a 30[m], imposible de evadir considerando que el radio del rango de seguridad en este caso alcanza los 90[m].

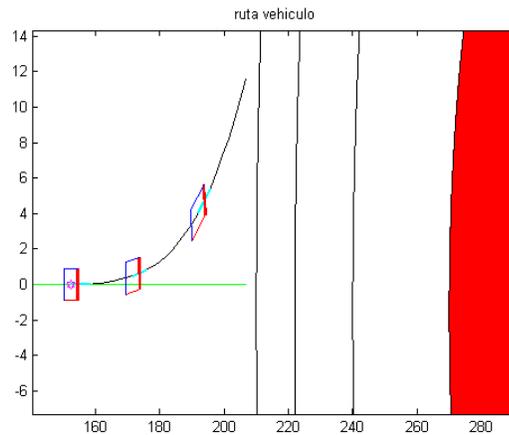


FIGURA 4-21: VEHÍCULO EN RUTA DE COLISIÓN

La Figura 4-21 representa la ruta generada por el vehículo intentando desviarse del obstáculo, y al no conseguir su cometido este se detiene aplicando el freno de emergencia. La Figura 4-22 representa la cercanía observada por los sensores, deteniendo el movimiento en el segundo 34, a 2 [metros] de distancia de la delimitación que contiene el 99,9% del obstáculo, con respecto del costado derecho del vehículo y a 4 [metros] con respecto al centro de masa. Existiendo así una diferencia de 2 [metros] entre los sensores, dado que la zona lateral ocupa la diagonal desde el centro de masa para evaluar la distancia de colisión, como se diseñó en la Sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

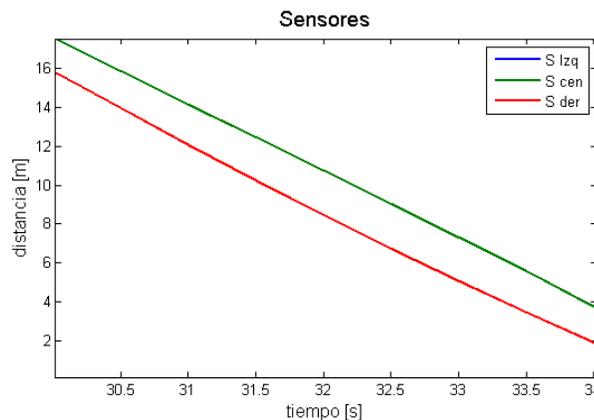


FIGURA 4-22: SENSOR EN RUTA DE COLISIÓN.

## 4.5 COMENTARIOS

En el presente capítulo se expuso los resultados obtenidos de la implementación de un estrategia de control difuso para la evasión de obstáculos en ruta, utilizando un modelo dinámico tipo bicicleta, que representa el vehículo Volkswagen® Tiguan año 2010.

En primera instancia fue necesario validar el modelo construido y confirmar que éste respete el comportamiento natural de un vehículo. Para ello, se generó una ruta arbitraria por la cual el vehículo modelado debía recorrer sin alteración posible, obteniéndose resultados satisfactorios al graficar esta ruta comprobando la no existencia de rotaciones, giros, torsiones, desapariciones o traslaciones anormales al movimiento de un vehículo.

Para el análisis ante la presencia de un obstáculo, se generaron 3 pruebas: en las 2 primeras se poseen obstáculos de tamaño regular representando cada flanco, mientras que en la tercera el obstáculo es de un tamaño superior para con ello exigir al máximo la estrategia. En los tres casos el vehículo logra sortear con una probabilidad mayor del 99,9% las obstrucciones presentes en ruta, confirmando la efectividad de la estrategia diseñada.

Las pruebas generadas para evaluar la efectividad de la estrategia de control que busca prever la posibilidad de derrape y vuelco, entregaron valiosos resultados, demostrando que la existencia de este control mejora en gran medida la seguridad, al reducir levemente la velocidad.

Por último, se rescata la existencia de un freno de emergencia, el cual permite salvaguardar el vehículo y sus ocupantes, ante la imposibilidad de evadir la aparición inesperada de un obstáculo, la detención intempestiva del vehículo que lo antecede o simplemente el no poder rodear un objeto estático.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El presente documento entrega al lector parte del trabajo interdisciplinario desarrollado por el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, que consiste en el diseño, implementación y puesta en marcha de un vehículo autónomo terrestre, capaz de moverse sin supervisión humana por terrenos abiertos, como los encontrados en faenas mineras en yacimientos a rajo abierto.

Puntualmente en esta memoria se propuso el diseño e implementación de un modelo dinámico tipo bicicleta, implementado en ambiente de Simulink de MATLAB®. Dicho modelo considera además una representación de los actuadores, tanto del volante como de los pedales, con el fin de emular el vehículo modelo Tiguan del fabricante automotriz Volkswagen® del año 2010. Gracias a la realización de este modelo se posibilita la evaluación de diversas estrategias de control, permitiendo corroborar si eficacia y calibrar sus respectivas ganancias, todo esto previo a la implementación en el vehículo real.

Para corroborar la exactitud del modelo desarrollado, fue necesario evaluar la coherencia de su movimiento y que se respeten las características propias del vehículo que se desea emular. Obteniéndose resultados satisfactorios al entregar gráficamente un comportamiento ordinario en el desplazamiento, sin alteraciones en la estructura del vehículo, rotaciones con respecto a sus ejes de coordenadas, alteraciones no continuas de la dirección y/o sentido del vehículo o saltos en el gráfico que no concuerden con la velocidad que posee el móvil instantáneamente. Adicionalmente, el comportamiento de la velocidad desarrollada por el modelo diseñado, generado por la aplicación de la señal del pedal del acelerador tomada experimentalmente, es concordante con los datos reales de velocidad obtenidos en la misma experiencia. En estas condiciones el modelo genera un error absoluto promedio no mayor a 3,5%, equivalente a un error cuadrático medio de tan solo un 4,6%, considerando ambos modos de marcha del motor (indistintamente), no evaluando la existencia de pendientes o la presencia de resaltos y/o baches. Luego, este error es considerado como aceptable, en particular porque las pruebas fueron desarrolladas por un sólo chofer, e implementar consideraciones que reduzcan incluso aún más este valor generaría, no solo el modelo dinámico del Volkswagen®, sino también se integraría el estilo particular del chofer a este modelo.

Tras conseguir la validación de la construcción del modelo dinámico, y comprobar su validez como modelo virtual del vehículo Volkswagen® Tiguan, se implementa en él un controlador de bajo nivel que efectúe el seguimiento de velocidad y dirección deseado.

Sobre este nuevo sistema interconectado se desarrolla una estrategia de control evasor de obstáculos que se encuentren en ruta de colisión, con una seguridad en su cometido de al menos un 99,9%. Para lograr este objetivo fue necesario desarrollar una estrategia que permitiese supervisar la ruta del vehículo, guiándolo por el camino pre establecido que se desee llevar. Esta estrategia se desarrolla utilizando la geometría formada por la prolongación entre el centro de masa y un punto a 100 [m] de distancia sobre la ruta deseada, por la prolongación entre el mismo centro de masa y el punto perpendicular a la ruta, y la unión entre estos 2 puntos sobre la ruta. Una vez conocido este triángulo, y utilizando cálculos trigonométricos, se calcula el ángulo

necesario para que el centro de masa se dirija en dirección a la ruta originalmente trazada. La implementación de esta estrategia genera valores confusos y en la práctica inviables, ya que el controlador entrega valores a aplicar en el ángulo del volante altos, y por ende cuando el móvil alcanza la ruta no logra centrar el volante sobrepasando el camino, y al alejarse de éste repite la acción ampliando más la lejanía de la ruta, lo que radica finalmente en la divergencia del camino planteado.

Para solucionar dicho problema, se pondera la salida del controlador supervisor de ruta con un factor que dependerá polinomialmente de la velocidad instantánea del vehículo, esto es fundamental, ya que la señal entregada al ángulo del volante necesaria para que converja el vehículo en la ruta depende fuertemente de la velocidad que el móvil posea en ese instante. Aplicando esta solución se obtienen resultados excelentes, con un movimiento que converge oscilatoriamente en la ruta preestablecida (centrado en esta) y que una vez alcanzado nunca se aleja más de 50 [cm] de ella, siendo esto equivalente a menos del 14% de error. Este valor, que pudiese considerarse alto, es a lo largo de 300[m] y considerando que el ancho del vehículo más la amplitud de la oscilación generada no supera los 3 [m], se puede afirmar que el AGV no saldrá de su carril una vez convergido en la ruta.

Tras la obtención satisfactoria del control supervisor de ruta, fue posible diseñar una estrategia de control, utilizando lógica difusa tipo Mamdani. Esta estrategia evalúa la cercanía del objeto a la vez que discrimina el flanco donde se posiciona, además, conociendo la velocidad instantánea, interpreta cuanto es necesario reducir la velocidad y en cuanto variar el ángulo del volante para trazar una ruta segura.

Gracias a la interpretación del obstáculo como una función bivariada de distribución Gaussiana, se genera un área de evasión de al menos un radio de  $3\sigma$ , donde  $\sigma$  es la mayor desviación estándar entre las variables que conforman el obstáculo, con lo que garantiza al menos una seguridad del 99,9% de no colisionar con el obstáculo.

En particular las experiencias desarrolladas para evaluar los casos más representativos de evasión de obstáculos entregaron resultados alentadores. Considerando un obstáculo pequeño, de radio de seguridad igual a 0,9 [m], el AGV solo se desvía levemente de su ruta preestablecida, evadiendo el obstáculo a 15 [cm] de distancia. Y con ello consiguiendo una rápida y segura evasión y posterior regreso a la ruta preestablecida. Al considerar la evasión realizada ante la presencia de un objeto de mayor volumen, cuyo radio de seguridad alcanza los 3 [m], nuevamente se genera una evasión con gran precisión, logrando que el vehículo pase por el costado del obstáculo a una distancia no mayor a 50 [cm], estando en su momento más cercano a aproximadamente 30 [cm]. Confirmando con números lo apreciado visualmente, la estrategia generada a través de lógica difusa, cumple satisfactoriamente la evasión de obstáculos que amenacen la ruta seguida por el AGV, desviando leve pero suficientemente del camino trazado, permitiendo regresar fácilmente a la ruta como lo haría un chofer profesional.

El tercer caso estudiado escapa de lo habitual, producto del valor elevado de su radio de seguridad, alcanzando los 30 [m], sin embargo los resultados obtenidos analíticamente revelan concordancia con lo descrito anteriormente. A diferencia de los casos anteriores, la máxima cercanía al radio de seguridad se alcanza al octavo de circunferencia y no al llegar a su máximo en el cuarto de ésta, siendo ésta no inferior a 45 [cm]. Luego de evadir la obstrucción el vehículo

se aleja casi 9[m] del obstáculo, siendo un valor elevado con relación a las dimensiones del vehículo pero que no supera el 30% del valor del área de seguridad.

Estos resultados son obtenidos de esta forma gracias a que se decide evaluar el límite del área observada por los sensores laterales utilizando como factor la desviación estándar del objeto. Al considerar el rango máximo de observación lateral igual a  $4,5\sigma$ , se asegura una evasión del obstáculo superior a 99,999%, lo que entrega una gran robustez al sistema sin exagerar el desvío realizado para ello.

La inclusión de un freno de emergencia potencia la seguridad del sistema y entrega grandes resultados. Éste utiliza los criterios entregado por el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones del Gobierno Chile, el cual dicta la distancia mínima de frenado. Con la existencia de esta alternativa, se minimiza satisfactoriamente las posibilidades de un accidente, al permitir reaccionar a la posibilidad de que un móvil, antecesor al AGV, frene sorpresivamente o simplemente no sea posible alcanzar a rodear el obstáculo.

Adicionalmente a la estrategia de control de evasión de obstáculos se incluye un sistema, también basado en lógica difusa, para la prevención de derrape o vuelcos en el vehículo. Siendo este sistema consistente en una leve reducción de la velocidad, se logran obtener excelentes resultados duplicando el tiempo de trazado helicoidal con velocidad referencial constante. Independiente de estos buenos resultados, se adiciona una alarma que detecte cuando el vehículo supere un umbral de peligro, para reforzar la seguridad del AGV. Una vez activada la alarma se deberá aplicar un protocolo que evite en mayor medida la posibilidad de volcar, siendo una posibilidad el giro del volante en la dirección de derrape, este análisis se plantea como trabajo futuro.

Como se puede apreciar, el trabajo realizado ha sido satisfactorio, cumpliendo con todos los objetivos específicos y generales, entregando un modelo dinámico completo del vehículo que considera el comportamiento de sus actuadores y que permite el estudio de nuevas estrategias de control antes de implementarlas en el vehículo. Así mismo, se entregó un sólido diseño de estrategia difusa, que permite evadir obstáculos en ruta de colisión con un robusto sistema de seguridad ante la imposibilidad de evadirlo o la posibilidad de volcar. Concluyendo, finalmente, con la entrega de un efectivo diseño listo para implementar en el vehículo Tiguan de Volkswagen®, adquirido para este fin, en conjunto con las otras componentes que forman al vehículo guiado autónomamente.

## 5.1 TRABAJOS FUTUROS

Dentro de los trabajos pendientes, lo primero que es necesario completar es el modelo teórico del vehículo diseñado, incorporando la fuerza aerodinámica generada verticalmente sobre él. Además, es necesario integrar estudios de cabeceo y balanceo propio de los automóviles al análisis de vuelco y derrape, y no sólo el comportamiento de la aceleración lateral, calculando las fuerzas normales de los neumáticos y la torsión de la estructura del vehículo. Por otra parte este se debe complementar con el estudio de caminos con pendientes, fenómenos que interferirían directamente en la distribución del peso del vehículo, y que por ende en el comportamiento del mismo, considerando en el análisis el eje “z” de desplazamiento.

Al mejorar la implementación del acelerador es fundamental poder realizar más pruebas considerando fundamentalmente, diferentes conductores ya que todo chofer tiene un estilo propio de manejo, y con ello seguir mejorando el modelo realizado. Adicionalmente, es necesario obtener datos del vehículo desacelerando libremente (tras alcanzar una velocidad dada, dejar que se detenga solo), luego con estos nuevos datos mejorar el valor de  $F_X$  entregado por el motor. Por otro lado, con respecto al pedal del freno, es necesario realizar una completa experiencia que permita obtener la interacción entre la velocidad y el pedal. Las pruebas deben considerar la asistencia de frenado, como es el ABS, presente en el vehículo.

Otro aspecto relevante en el modelo dinámico es la necesidad de diferenciación entre los modos “sport” y “estándar” de la caja de cambios, los cuales entregan diferente torque en el motor, como ya fue comentado.

El paso final del modelo es contrastar los datos reales de los actuadores integrados y del control de bajo nivel implementado, realizando pruebas completas y variadas, que abarquen la mayor cantidad de situaciones, utilizando las 3 variables de entrada de forma simultánea, siendo todo esto corroborado con el camino realmente recorrido (utilizando el GPS del vehículo).

Con respecto a la estrategia de Control de Evasión de Obstáculos en Ruta es necesario realizar nuevas pruebas una vez sea integrado un mejor control supervisor de ruta. Además, las ganancias de los controles difusos que la conforman deberán ser re-evaluadas al utilizar datos obtenidos empíricamente por los sensores reales.

El paso siguiente en la evasión de obstáculos, corresponderá a la aplicación con objetos en movimiento absoluto o relativo de velocidades variables, considerando incluso la presencia de un vehículo que se acerque en dirección contraria pero en el carril opuesto o un vehículo que intenta adelante al AGV por izquierda o por derecha. También se plantea la posibilidad de que el móvil realice el adelantamiento del vehículo que lo anteceda o incluso realizar la mezcla de más de una de estas situaciones, considerando adicionalmente los límites de cada pista y del camino en sí en todas las decisiones.

Por último, se plantea la posibilidad de que la estrategia de prevención de derrape y vuelco, no sólo controle la velocidad sino también posea la alternativa de girar el volante en la dirección del derrape y con ello asegurar que este no vuelque.

## REFERENCIAS

- [1] Asti, «www.asti.es,» [En línea]. Available: [http://www.asti.es/php/agvs\\_presentacion.php?apartado=AGV&subapartado=AGV](http://www.asti.es/php/agvs_presentacion.php?apartado=AGV&subapartado=AGV).
- [2] «DARPA,» [En línea]. Available: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/overview.asp>.
- [3] «DARPA Grand Challenge2004,» [En línea]. Available: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge04/>.
- [4] «DARPA Urban Challenge,» [En línea]. Available: <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>.
- [5] «Komatsu America,» [En línea]. Available: <http://www.komatsuamerica.com/?p=news&f1=read&pageid=299>.
- [6] «Mina Gaby - Codelco,» abril 2012. [En línea]. Available: [http://www.codelco.cl/minera-gaby-consolida-la-operacion-de-la-mayor-flota-de-camiones-autonomos-del-mundo/prontus\\_codelco/2012-04-18/192119.html](http://www.codelco.cl/minera-gaby-consolida-la-operacion-de-la-mayor-flota-de-camiones-autonomos-del-mundo/prontus_codelco/2012-04-18/192119.html).
- [7] «Codelco Andina,» [En línea]. Available: [http://www.codelco.cl/andina-inicia-pruebas-de-sistema-de-automatizacion-en-mina-subterranea/prontus\\_codelco/2011-03-26/125652.html](http://www.codelco.cl/andina-inicia-pruebas-de-sistema-de-automatizacion-en-mina-subterranea/prontus_codelco/2011-03-26/125652.html).
- [8] I. Mining, «www.im-mining.com,» 8 diciembre 2011. [En línea]. Available: <http://www.im-mining.com/2011/12/08/atlas-copco-announces-a-range-of-new-productsand-ongoing-project-updates/>.
- [9] Atlas Copco, «www.atlascopco.cl,» [En línea]. Available: [http://www.atlascopco.cl/Images/Control%20Remoto%20Scooptram%20RRC\\_tcm46-625728.pdf](http://www.atlascopco.cl/Images/Control%20Remoto%20Scooptram%20RRC_tcm46-625728.pdf).
- [10] «Codelco Teniente,» [En línea]. Available: [http://www.codelco.cl/nuevo-nivel-mina-de-el-teniente-una-mina-altamente-automatizada-y-telecomandada-desde-la-ciudad/prontus\\_codelco/2011-02-17/185914.html](http://www.codelco.cl/nuevo-nivel-mina-de-el-teniente-una-mina-altamente-automatizada-y-telecomandada-desde-la-ciudad/prontus_codelco/2011-02-17/185914.html).
- [11] O. Martínez, «www.equipo-minero.com,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.equipo-minero.com/index.php/contenidos/152-desarrollando-futuro-en-el-teniente.html>.
- [12] J. I. Carro Díez, Estudio Mediante Simulink y Ansys del Comportamiento de la Superestructura de un Autobús Urbano, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [13] M. Egerstedt, X. Hu y A. Stotsky, «Control of a Car-Like Robot Using a Dynamic Model,» *Proceedings of the 1998 IEEE Conference on Robotics and Automation*, vol. 4, pp. 3273-3278, 1998.
- [14] J. C. Gómez, Fuzzy Control, Buenos Aires: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2008.
- [15] I. I. Hernández Bello y C. Ochoa Luna, «Colección de Tesis Digitales,» enero 2004. [En línea]. Available: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lep/hernandez\\_b\\_ii/portada.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lep/hernandez_b_ii/portada.html).
- [16] H. Nguyen, N. Prasad, C. Walker y E. Walker, *A First Course in FUZZY and NEURAL CONTROL*, London, New York, Washington D.C.: CHAPMAN & HALL/CRC, 2003.
- [17] G. Morales-Luna, *Introducción a la lógica difusa*, México: Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, 2002.
- [18] J. Aguirre Ramírez, J. Robledo Velásquez y A. L. Pérez Patiño, «Metodología para medir y evaluar las capacidades tecnológicas de innovación en fábricas de software, utilizando lógica difusa,» SinncO, 2009.
- [19] Z. C. Méndez y P. A. Villegas, *Los Sistemas Difusos como Herramienta de Modelación de la*

*Producción Frutícola*, 2005.

- [20] A. Sanjay Krishnankutty, «eMathTeacher,» [En línea]. Available: <http://www.dma.fi.upm.es/research/FundMatSoftComputing/fuzzyinf/mamdani.htm>.
- [21] J. Soto, I. Castillo, A. Gauthier y V. Grisales, *Identificación y Control de Sistemas No Lineales Mediante Clustering y Gpc Usando Modelos Difusos Takagi-Sugeno*, Bogota: Universidad de los Andes.
- [22] L. Herrera, H. Pomares, I. Rojas, A. Guillén y J. González, «Análisis Estadístico del uso de Reglas Takagi-Sugeno-Kang de Orden Alto en el Diseño del Proceso de Inferencia Difusa,» de *XII CONGRESO ESPAÑOL SOBRE TECNOLOGÍAS Y LÓGICA FUZZY*, Jaén, 2004.
- [23] J. Lopez, «Introducción y Conceptos Basicos,» 2003. [En línea]. Available: [http://members.tripod.com/jesus\\_alfonso\\_lopez/FuzzyIntro2.html](http://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/FuzzyIntro2.html).
- [24] A. Spina y V. Mazzone, *Control PID clasico*, Universidad de Quilmes, 2011.
- [25] G. Mann, B.-G. Hu y G. Raymond, «Analysis of Direct Action Fuzzy PID Controller Structures,» *CYBERNETICS*, vol. 29, nº 3, 1999.
- [26] R. Copeland y K. Rattan, «A Fuzzy Logic Supervisor for PID Control of Unknown Systems,» *Proceedings of the 1994 IEEE International Symposium on*, pp. 22 - 26, 1994.
- [27] A. Guerrero, F. García y I. González, «Vehículo solar autónomo de arquitectura electrónica abierta para el desarrollo de algoritmos de gestión de energá.,» Scientific & Academic Publishing, 2012.
- [28] G. Madrid Amarillas, N. Luna Acosta, E. Jiménez López, L. Reyes Ávila, E. Núñez Perez y F. Orduña Cabrera, *Desarrollo de un Simulador para Prototipo de Vehículo Evasor de Obstáculos Usando Lógica Borrosa*, Jalisco: Centro de Investigación y Aplicación en Automatización y Mecatrónica de la Universidad Tecnológica del Sur de Sonora, 2011.
- [29] G. Younis y A. Dentsoras, *A fuzzy system for AGV navigation and obstacle avoidance*, Patra: Dept. of Mechanical Engineering & Aeronautics, University of Patras, 2007.
- [30] P.-S. Lee y L.-L. Wang, «Collision Avoidance by Fuzzy Logic Control for Automated Guided Vehicle Navigation,» Institute of Computer Science National Tsing Hua University, Taiwan, 1994.
- [31] S. Kovács y L. T. Kóczy, *APPLICATION OF AN APPROXIMATE FUZZY LOGIC CONTROLLER IN AN AGV STEERING SYSTEM, PATH TRACKING AND COLLISION AVOIDANCE STRATEGY*, Bratislava, Slovakia: Institute Slovak Academy of Sciences, 1999.
- [32] M. N. Ibarra Bonilla, F. J. Quiñones Novelo, I. J. García Enríquez y J. M. Ramírez Cortés, *Desplazamiento de un robot con localización y evasión de obstáculos por visión y ultrasonido*, Mexico: Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2009.
- [33] A. M. Cuesta Hernández y D. Mocencahua Mora, *Arbitraje de Comportamientos para Robots Móviles con Lógica Difusa*, Mexico: Facultad de Ciencias de la Electrónica, Universidad Autónoma de Puebla, 2005.
- [34] F. Cabello San Martín, *Sistema de Control Difuso para Velocidad y Dirección en Vehículo de Escala Real*, Santiago: Universidad de Chile, FCFM, Dpto de Ingenieria Electrica, 2011.
- [35] M. Mascaro Muñoz, *Diseño e Implementación de Sistema de Actuación Electro-mecánico para Vehículo Terrestres Autónomos*, Santiago: Universidad de Chile, 2011.
- [36] Arpem, «Arpem.com,» [En línea]. Available: <http://www.arpem.com/coches/coches/volkswagen/tiguan/modelos-07/volkswagen-tiguan-20d-140-sport.html>.

- [37] «engineeringtoolbox,» [En línea]. Available: [http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d\\_627.html](http://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html).
- [38] F. Cabello, A. Acuña, P. Vallejos, M. E. Orchard y R. d. S. Javier, «Design and Validation of a Fuzzy Longitudinal Controller Based on a Vehicle Dynamic Simulator,» *IEEE ICCA '11*, 2011.
- [39] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, división de desarrollo urbano, «Manual de Vialidad Urbana, Recomendaciones para el diseño de elementos de infraestructura vial urbana,» Gobierno de Chile, Santiago, Chile, 2009.
- [40] Delphi, «Delphi Electronically Scanning Radar,» [En línea]. Available: [www.delphi.com](http://www.delphi.com).
- [41] M. Crossbow, «NAV440 GPS-Aided MEMs Inertial System,» [www.moog-crossbow.com](http://www.moog-crossbow.com).
- [42] A. V. Technologies, «Datasheet Manta g-046,» [En línea]. Available: <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/gigabit-ethernet/manta/g-046bc.html>. [Último acceso: septiembre 2012].
- [43] L. d. P. d. Imagen, «Variable gaussiana bivaluada,» [En línea]. Available: <http://www.lpi.tel.uva.es/lpi/dld/sar/vagaussianabivaluada.pdf>.
- [44] M. Á. Oliveros Villegas, «Tabla de Distribucion Normal,» [En línea]. Available: <http://webdelprofesor.ula.ve/economia/oliverosm/materiasdictadas/produccion2/tabladistrnorm.pdf>.
- [45] F. Jiménez Alonso y F. Aparicio Izquierdo, «Cálculo de la Velocidad Segura de Circulación de los Vehículos Automóviles en Funcion de la Geometría de la Carretera. Comparación de Modelos,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- [46] G. d. C. CONACET, «<http://www.educacionvial.cl>,» [En línea]. Available: <http://www.educacionvial.cl/distancia-frenado.html>.

# ANEXO A

El presente anexo entrega al lector los diagramas de bloques que conforman el sistema completo, analizado en este documento, y que no fueron abordados en sus respectivos capítulos.

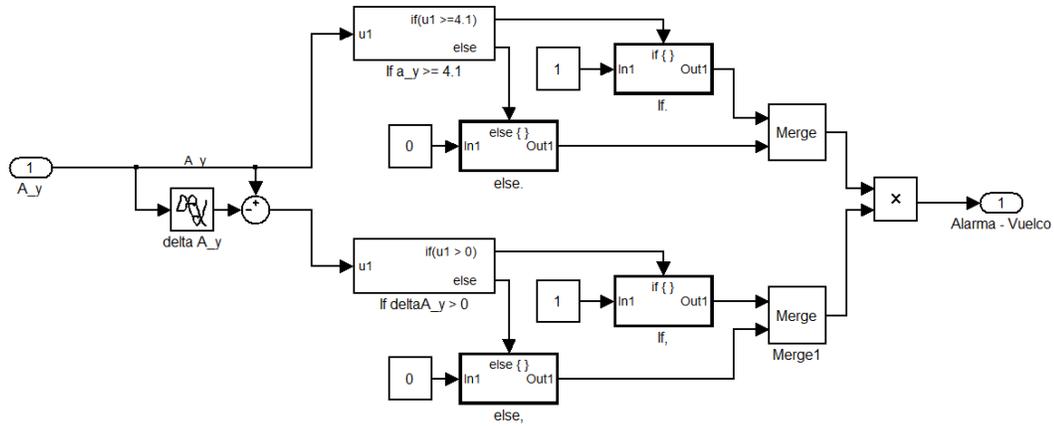


FIGURA A- 1: DIAGRAMA DE BLOQUE DE ALARMA POR POSIBILIDAD DE VUELCO

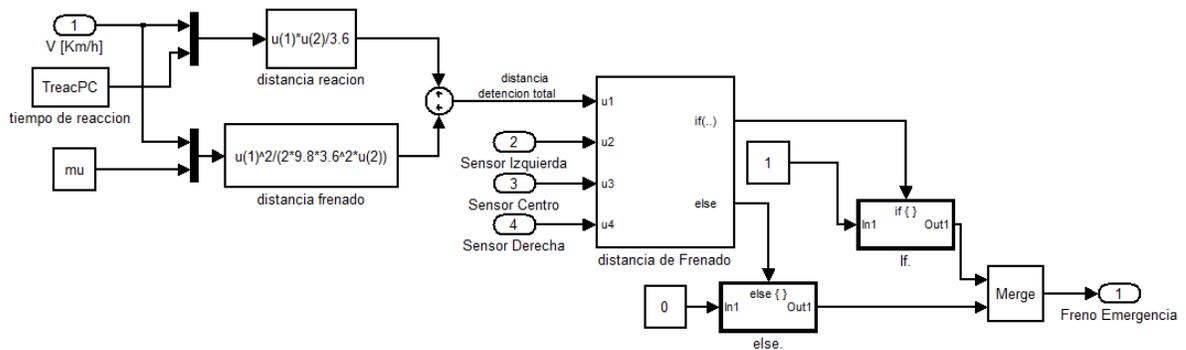


FIGURA A- 2: DIAGRAMA DE BLOQUE DE FRENO DE EMERGENCIA

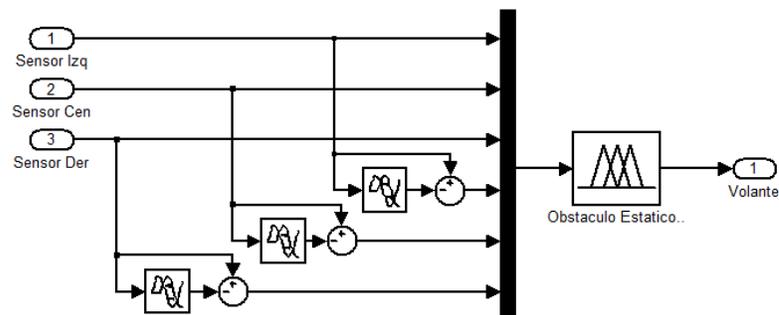


FIGURA A- 3: DIAGRAMA DE BLOQUE DE MÓDULO EVASOR DE OBSTÁCULOS

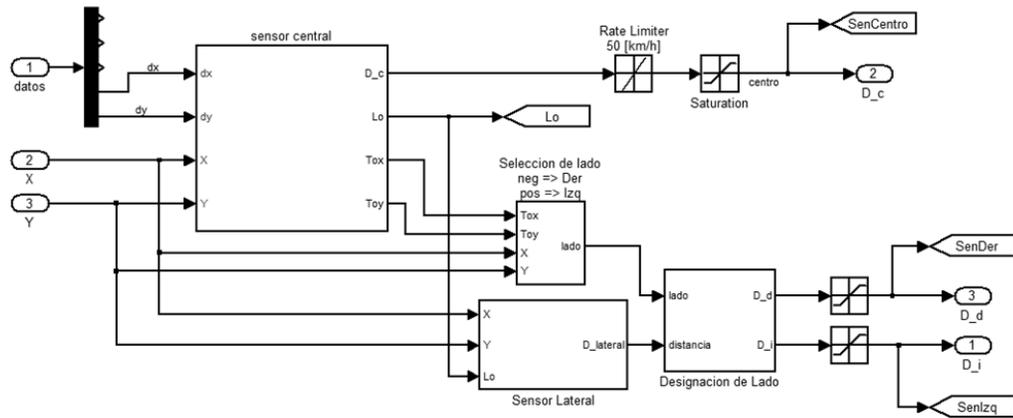


FIGURA A- 4: DIAGRAMA DE BLOQUE DE SENSOR

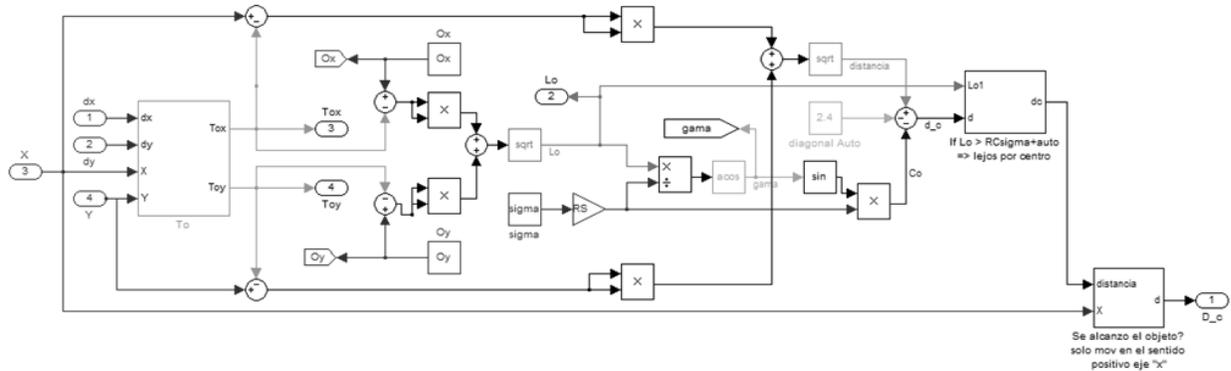


FIGURA A- 5: DIAGRAMA DE BLOQUE DE SENSOR CENTRAL

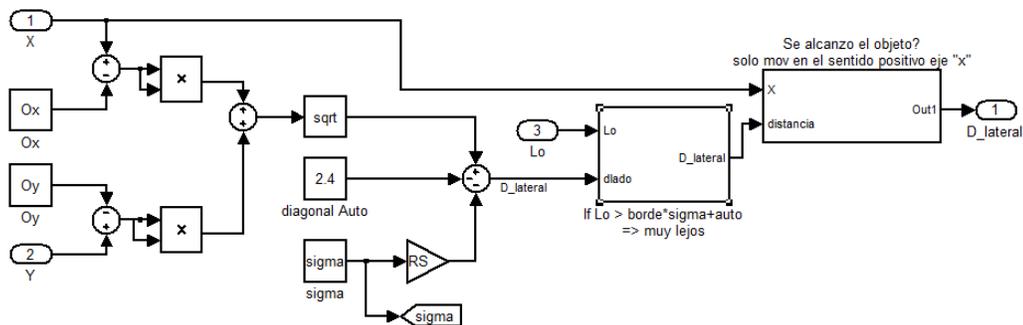


FIGURA A- 6: DIAGRAMA DE BLOQUE DE SENSOR LATERAL

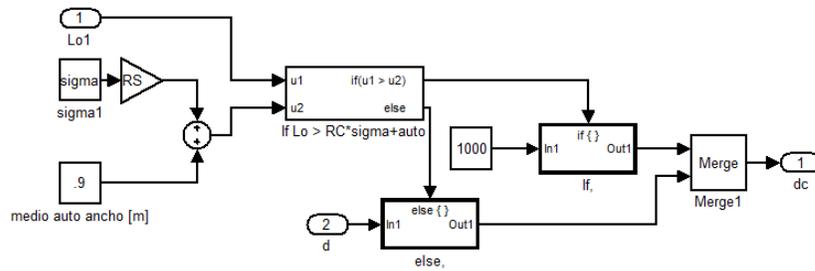


FIGURA A- 7: DIAGRAMA DE BLOQUE RANGO DE SEGURIDAD CENTRAL

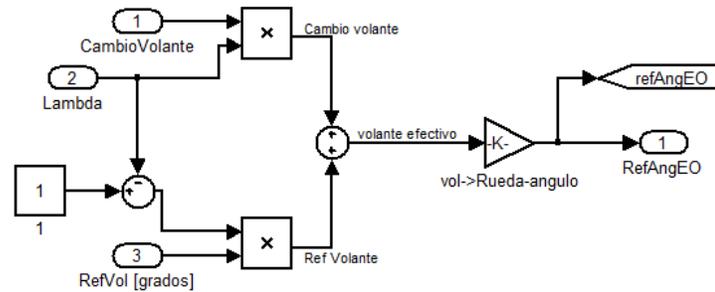


FIGURA A- 8: MÓDULO DE SELECCIÓN DE ÁNGULO DE VOLANTE

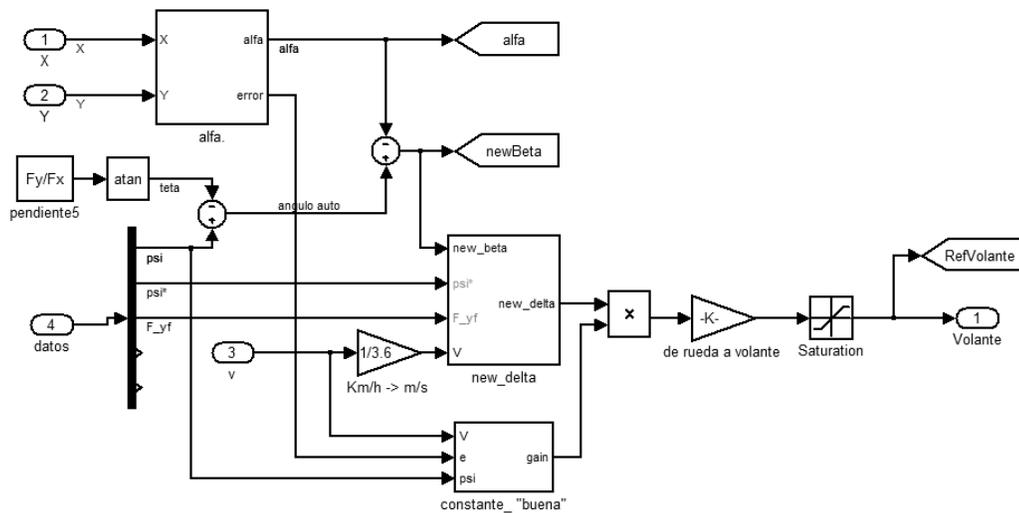


FIGURA A- 9: DIAGRAMA DE BLOQUE DE CONTROL SUPERVISOR DE RUTA

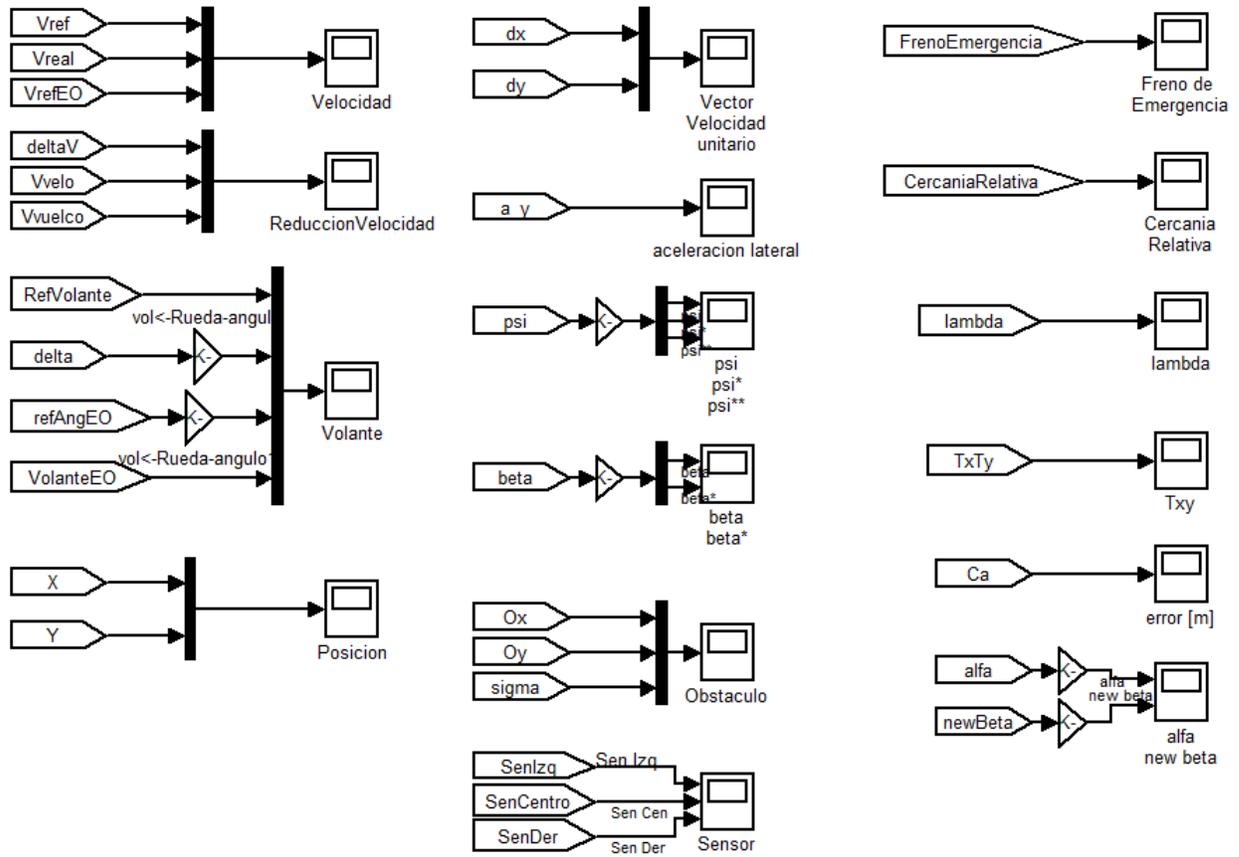


FIGURA A- 10: VARIABLES OBTENIDAS DE LA SIMULACIÓN

## ANEXO B

La Función descrita a continuación corresponde al código formulado en MATLAB®, para graficar el camino realizada por el vehículo, la ruta que debe haberse trazado y el obstáculo con sus diferentes áreas de seguridad.

```

function [ ] = dibujo_auto(Posicion,vV, Velocidad,Txy,Obstaculo)

NOxy=10;% selección datos centro de obstáculo
Ns= 10; % selección muestra datos.

X = Posicion(:,2);
Y = Posicion(:,3);
dx= vV(:,2);
dy= vV(:,3);
vel=Velocidad(:,3)/3.6;

Tx=Txy(:,2);
Ty=Txy(:,3);

Ox=downsample(Obstaculo(:,2),NOxy);
Oy=downsample(Obstaculo(:,3),NOxy);
sigma=downsample(Obstaculo(:,4),NOxy);

sX=downsample(X,Ns);
sY=downsample(Y,Ns);
sdx=downsample(dx,Ns);
sdy=downsample(dy,Ns);
sVel=downsample(vel,Ns);

sTx=downsample(Tx,Ns);
sTy=downsample(Ty,Ns);

l=4.427/2;% medio largo auto
a=1.809/2;% medio ancho auto

Pfx=l*sdx;
Pfy=l*sdy;
Wx=a*sdx;
Wy=a*sdy;

% foco frente derecho
Ffdx=Wx*cos(-pi/2)-Wy*sin(-pi/2)+Pfx+sX;
Ffdy=Wx*sin(-pi/2)+Wy*cos(-pi/2)+Pfy+sY;
% foco frente izquierdo
Ffix=Wx*cos(pi/2)-Wy*sin(pi/2)+Pfx+sX;
Ffiy=Wx*sin(pi/2)+Wy*cos(pi/2)+Pfy+sY;
% foco tras derecho
Frdx=Wx*cos(-pi/2)-Wy*sin(-pi/2)-Pfx+sX;
Frdy=Wx*sin(-pi/2)+Wy*cos(-pi/2)-Pfy+sY;
% foco tras izquierdo
Frix=Wx*cos(pi/2)-Wy*sin(pi/2)-Pfx+sX;
Friy=Wx*sin(pi/2)+Wy*cos(pi/2)-Pfy+sY;

```

```

% Ruta Generada
plot(X,Y,'k');
hold on

% Ruta Deseada
plot(Tx,Ty,'-g');

% Dibujo de círculos de probabilidad
rectangle('Position',[Ox(i)-sigma(i),Oy(i)-
sigma(i),2*sigma(i),2*sigma(i)],'Curvature',[1,1],'LineStyle','--','FaceColor','r');
rectangle('Position',[Ox(i)-2*sigma(i),Oy(i)-
2*sigma(i),2*2*sigma(i),2*2*sigma(i)],'Curvature',[1,1],'LineStyle','--');
rectangle('Position',[Ox(i)-3*sigma(i),Oy(i)-
3*sigma(i),3*2*sigma(i),2*3*sigma(i)],'Curvature',[1,1],'LineStyle','--');
rectangle('Position',[Ox(i)-2.6*sigma(i),Oy(i)-
2.6*sigma(i),2.6*2*sigma(i),2.6*2*sigma(i)],'Curvature',[1,1]);

for i=1:length(sX),

% Dibujo Centro del Vehículo

    plot([sX(i) (sX(i)+sdx(i).*sVel(i))],[sY(i) (sY(i)+sdy(i).*sVel(i))],'c','LineWidth',2)

% Dibujo puertas, frente y tras del vehiculo
    plot([Ffdx(i) Ffix(i)],[Ffdy(i) Ffiy(i)],'r','LineWidth',1.5)
    plot([Ffdx(i) Frdx(i)],[Ffdy(i) Frdy(i)],'r','LineWidth',1)
    plot([Ffix(i) Frix(i)],[Ffiy(i) Friy(i)],'b','LineWidth',1)
    plot([Frdx(i) Frix(i)],[Frdy(i) Friy(i)],'b','LineWidth',1)

end

% Marca de guía cada "x" tiempo
tX=downsample(X,40);%20 seg
tY=downsample(Y,40);

plot(tX,tY,'hm');

end

```