



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

**SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN EN
VEHÍCULO DE ESCALA REAL**

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

FELIPE ANDRÉS CABELLO SAN MARTÍN

**PROFESOR GUÍA:
MARCOS ORCHARD CONCHA**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
HÉCTOR AGUSTO ALEGRÍA
JAVIER RUIZ DEL SOLAR SAN MARTÍN**

**SANTIAGO DE CHILE
DICIEMBRE 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: FELIPE CABELLO SAN MARTÍN
FECHA: DICIEMBRE 2011
PROF. GUÍA: MARCOS ORCHARD C.

SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN EN VEHÍCULO DE ESCALA REAL

Actualmente, los vehículos guiados de forma autónoma (AGV) son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones industriales, razón por la cual el diseño e implementación de estrategias de control para estos sistemas es de vital importancia para responder a las exigencias de seguridad, productividad y eficiencia que se requieren en los ámbitos en los que se desempeñan estos vehículos.

Aunque las variables de interés a supervisar en un AGV son variadas, destacan dos de ellas que es necesario controlar en todo vehículo autónomo: (i) la velocidad y (ii) la dirección. Diferentes estrategias de control se han explorado e implementado para llevar a cabo la supervisión de la velocidad y la dirección de un AGV, sobresaliendo entre ellas el control difuso.

El objetivo general de este trabajo, enmarcado en el proyecto de Automatización de Vehículos y Maquinaria Minera Móvil del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC), es diseñar e implementar controladores difusos desacoplados para controlar la velocidad y dirección de un vehículo de escala real, en particular un Volkswagen® Tiguan.

En el caso del controlador de velocidad, el diseño considera dos variables de entrada, el error de velocidad y la integral del error de velocidad, y una única salida que manipula la apertura de los pedales de aceleración y freno. El signo de la salida determina cual actuador es el que se activa frente a determinadas condiciones de velocidad. El diseño de los conjuntos difusos y la base de reglas del controlador apuntan a minimizar el uso del freno, evitar la alternancia entre el uso de los pedales, permitir controlar adecuadamente la velocidad del vehículo en un amplio rango de velocidades.

Por otra parte, el diseño del controlador difuso de la dirección establece como variables de entrada el error del ángulo de las ruedas y la variación de dicho ángulo, y como variable de salida la variación del ángulo del volante. Los conjuntos difusos y la base de reglas de este controlador fueron diseñados con el fin de emular y mejorar el tiempo de respuesta de un conductor humano.

Ambos controladores se validaron y evaluaron a nivel de simulación en un ambiente Matlab®- Simulink, obteniéndose resultados satisfactorios en todos los casos estudiados que involucraron pruebas con referencias de velocidad y ángulo de la ruedas basadas en escalones y rampas a fin de emular distintos tipos de conducción. De igual forma, los controladores difusos se mostraron robustos frente a perturbaciones, en particular aquellas asociadas a ruido en las referencias o en la retroalimentación.

Se concluye de los resultados obtenidos en este trabajo que el control difuso constituye una estrategia de control efectiva para supervisar adecuadamente la velocidad y la dirección de un AGV, obteniéndose controladores robustos y capaces de cumplir adecuadamente con los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo impuestos, a nivel de simulación. De igual forma, debido a la flexibilidad de la herramienta de control utilizada, se puede establecer que en una aplicación para un ambiente no simulado es posible obtener resultados similares a los conseguidos en este trabajo, realizando las modificaciones necesarias a los controladores diseñados, según las condiciones de operación del sistema de escala real.

A mi Padre Celestial Jehová, por la fuerza, aguante, guía y consuelo que me brindó durante todo momento, especialmente los difíciles, a lo largo de esta etapa y que me permitieron superarla.

A mis padres por su amor y apoyo incondicional. Sin ustedes no podría haberlo logrado.

A mis hermanos y amigos por los momentos gratos y el aliento para seguir adelante cuando las fuerzas flaqueaban.

A mi profesor guía, Prof. Marcos Orchard, por su siempre buena disposición, consejos y sugerencias que hicieron posible terminar este trabajo.

Al equipo del Laboratorio de Automática (GCA) por sus sugerencias y todos esos buenos momentos que pasamos a lo largo de estos años en que trabajamos juntos.

A todos los que de alguna manera colaboraron con sus consejos, críticas o de otra forma.

Muchas gracias.

Índice

1. Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Alcance	2
1.3 Objetivos Generales	3
1.4 Objetivos Específicos.....	3
1.5 Estructura General.....	4
2. Controladores difusos y el problema del control longitudinal y lateral de vehículos autónomos terrestres.	5
2.1 Estado del arte del control longitudinal y lateral de vehículos autónomos.....	5
2.2 Control difuso de sistemas dinámicos.....	12
2.2.1 Sistemas de lógica difusa	12
2.2.2 Controladores difusos.....	21
3. Diseño de controladores difusos para velocidad y dirección de un AGV	31
3.1 Diseño controlador difuso de velocidad.....	32
3.1.1 Selección de variables de entrada y salida del controlador difuso de velocidad....	32
3.1.2 Definición de los conjuntos difusos asociados al controlador de velocidad	36
3.1.3 Definición de la base de conocimientos del controlador de velocidad	50
3.1.4 Elección del método de defusificación de la variable de salida del controlador de velocidad	53
3.2 Diseño del controlador difuso de dirección.....	54
3.2.1 Selección de variables de entrada y salida del controlador difuso de dirección	54
3.2.2 Definición de los conjuntos difusos asociados al controlador difuso de dirección	58
3.2.3 Definición de la base de conocimientos del controlador difuso de dirección.	67
3.2.4 Elección del método de defusificación de la variable de salida del controlador de dirección	70
3.3 Validación del Sistema de Control Propuesto: Identificación de modelo y diseño de simulador para un vehículo terrestre de escala real	71
4. Implementación de controladores difusos de velocidad y dirección	74

4.1 Implementación de los controladores difusos en MATLAB®	74
4.2 Implementación de los controladores difusos en C	85
5. Resultados	93
5.1 Evaluación del controlador difuso de velocidad	93
5.2 Evaluación del el controlador difuso de dirección.....	119
6. Conclusiones	137
Referencias	147
Anexos	154
Anexo A	154
Anexo B	158
Anexo C	160
Anexo D	166
Anexo E	168
Anexo F.....	169

1. Introducción

1.1 Motivación

El desarrollo de sistemas de control para vehículos terrestres es un tópico de especial interés en el área de transporte inteligente y control automático, considerando el notable aumento que han tenido los sistemas de manejo asistido y la utilización de vehículos guiados de forma autónoma (AGV) en aplicaciones industriales por razones de eficiencia, productividad y seguridad los cuales requieren controladores precisos para funcionar. Sin embargo, dada la complejidad y no linealidad de los sistemas a controlar, desarrollar estas herramientas de control no siempre es una tarea fácil. Teniendo presente esto, el diseño de sistemas de control difusos para vehículos terrestres presenta la ventaja de abstraerse de un modelo matemático preciso, requiriendo tan solo un conjunto de reglas simples que describen con relativa exactitud el comportamiento de la planta, lo cual la hace una alternativa atractiva para la generación de una estrategia de control que brinde un desempeño adecuado.

El uso de AGVs, y la generación de estrategias de control para estos sistemas, cobra especial relevancia en nuestro país debido a que en la extracción de recursos naturales (uno de los pilares fundamentales de la economía chilena) resulta fundamental incorporar tecnologías que contribuyan a mejorar la productividad, eficiencia y seguridad de estas actividades, y asegurar a la vez la viabilidad económica de estas tecnologías y su mantenimiento en el tiempo. Pese a la importancia de que tiene el incorporar equipos y dispositivos de control que permitan optimizar el rendimiento de las faenas extractivas, esta incorporación ha sido lenta o simplemente no ha sido posible, no sólo por el costo económico que involucra el llevar a cabo estas actualizaciones, sino también por el carecer del personal adecuado que sea capaz de entender las estrategias de control que incorporan las maquinarias asociadas a los procesos de extracción de recursos, diseñar controladores que cumplan con requerimientos específicos y realizar labores de mantenimiento a estos sistemas.

A fin de revertir la carencia antes mencionada el Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC, siglas en inglés) trabaja en varios proyectos relacionados con automatización, robótica y

sensores que buscan transferir al sector productivo resultados de investigación y desarrollo enfocados en estos tópicos. Precisamente esta Memoria de Título se enmarca en el proyecto de Automatización de Vehículos y Maquinaria Minera Móvil, asociado al AMTC, que busca generar una plataforma de trabajo que permita el diseñar, entender y mantener sistemas robóticos autónomos a fin de, además de realizar transferencia tecnológica con las empresas del rubro, proveer capital humano calificado para el diseño y mantenimiento de estas tecnologías.

El proyecto de Automatización de Vehículos y Maquinaria Minera Móvil se está llevando a cabo en la actualidad mediante la robotización de un vehículo de escala real, un Volkswagen® Tiguan, el cual será utilizado como plataforma para el estudio y certificación de nuevas tecnologías en las diferentes áreas que abarca este proyecto como son visión y percepción computacional, sensores y sistemas de actuación y control, así como para el entrenamiento de personal calificado en estas tecnologías. El tema de este trabajo pertenece al área de control de sistemas de este proyecto y corresponde a una etapa intermedia en la investigación de estrategias de control para la supervisión de la velocidad y dirección en el vehículo.

1.2 Alcance

Esta Memoria de Título focaliza en el diseño de controladores para la velocidad y dirección de un vehículo de escala real, pensándose en un sistema de control de bajo nivel, es decir, que está inserto en un esquema de control más amplio que es el que efectivamente controla completamente la dinámica del vehículo. El ámbito de acción de los controladores que se busca diseñar en este trabajo abarca la determinación de la apertura adecuada de los pedales de aceleración y freno, así como del ángulo del volante a fin de seguir correctamente las referencias de velocidad y ángulo de las ruedas que se le provean a los controladores. La evasión de obstáculos, el seguimiento de trayectorias y el desarrollo de sistemas de acción frente a emergencias escapan al propósito de este trabajo, siendo responsabilidad de un sistema de control de alto nivel el monitorear estos factores y proveer apropiadamente las referencias de velocidad y ángulo de las ruedas a los controladores de velocidad y dirección a fin de lograr evadir obstáculos y seguir correctamente la trayectoria de un camino.

1.3 Objetivos Generales

Los objetivos generales de esta Memoria de Título son el diseñar controladores difusos desacoplados para la velocidad y dirección de un vehículo de escala real e implementar y validar dicho diseño a nivel de simulación, sentando las bases para la implementación de estas estrategias de control en una aplicación de escala real.

Todo el diseño de los controladores y la implementación de los mismos, se hará tomando como referencia el Volkswagen® Tiguan utilizado en el proyecto de Automatización de Vehículos y Maquinaria Minera Móvil de AMTC.

1.4 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de esta Memoria de Título son:

- Diseñar un controlador difuso para la velocidad del vehículo que manipule la apertura de los pedales de aceleración y freno y que cumpla los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo que se le impongan.
- Combinar los sistemas ACC (Adaptive Cruise Control) y Stop&Go en una estructura de control unificada, a fin de que el controlar la velocidad en un amplio rango.
- Minimizar la alternación entre el uso del acelerador y el freno, privilegiando el uso del acelerador para supervisar la velocidad del vehículo.
- Diseñar un controlador difuso para la dirección del vehículo que manipule el ángulo del volante y que cumpla los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo que se le impongan.
- Implementar los controladores difusos diseñados a nivel de simulación haciendo uso del software MATLAB®- Simulink.
- Evaluar el desempeño de los controladores a nivel de simulación y realizar las modificaciones necesarias en caso que no cumplan los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo.
- Evaluar a nivel de simulación la robustez de los controladores frente a perturbaciones.

- Transferir el diseño de los controladores difusos a lenguaje de programación C para su posterior implementación en el vehículo de escala real.

1.5 Estructura General

El presente trabajo se encuentra organizado en 6 capítulos, incluyendo este capítulo de introducción al tema. Los siguientes cinco capítulos se describen a continuación.

En el Capítulo 2 se muestra el estado del arte de las estrategias de control para la velocidad y para la dirección de un vehículo de escala real, además de proveerse los sustentos teóricos en base a los cuales se sostienen los diseños y análisis que se realizan en este trabajo.

En el Capítulo 3 se muestran las distintas etapas de diseño de los controladores difusos de velocidad y dirección, así como las consideraciones que llevaron a las distintas elecciones de los parámetros de diseño de los controladores.

El Capítulo 4 exhibe la implementación de los controladores difusos a nivel de simulación, utilizando el software MATLAB®-Simulink, al igual que el código del programa que permitirá la implementación de los controladores diseñados en el vehículo de escala real.

El Capítulo 5 da cuenta de los resultados conseguidos al realizar diversas pruebas con los controladores difusos de velocidad y dirección, así como los análisis del desempeño de los mismos.

Finalmente el Capítulo 6 muestra las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo e este trabajo de título, así como indicaciones del trabajo futuro propuesto que se desprende de esta Memoria.

2. Controladores difusos y el problema del control longitudinal y lateral de vehículos autónomos terrestres.

2.1 Estado del arte del control longitudinal y lateral de vehículos autónomos

Desde la invención de los primeros vehículos motorizados, uno de los anhelos del ser humano fue que éstos fueran capaces de conducirse y realizar otras acciones de forma autónoma. Este sueño comenzó a hacerse realidad a mediados del siglo XX cuando surgió el primer vehículo autónomo: una grúa que para desplazarse utilizaba un cable magnetizado, fijo al suelo, como referencia y que por lo tanto requiriese un riel como guía. A partir de entonces y hasta nuestros días las aplicaciones y complejidad de estos sistemas ha ido aumentando considerablemente respecto a los primeros vehículos guiados automáticamente (AGV, por sus siglas en inglés). Hoy en día, los AGVs se encuentran presentes en la mayoría de las industrias, con aplicaciones en la industria minera, manufacturera, automotriz, de transporte y bodegaje por mencionar algunas, llevando a cabo una amplia gama de tareas que implican gran precisión, interacción con el ambiente y que deben desempeñarse con eficiencia y rapidez.

Debido al aumento de las prestaciones y los requerimientos impuestos a las tareas que llevan a cabo los AGVs, se ha hecho necesario contar con sistemas de control robustos y eficientes, que permitan cumplir con las exigencias de cada aplicación. El desarrollo de estos sistemas involucra, en la mayoría de los casos, monitorear una gran cantidad de variables, dependiendo de la complejidad de la aplicación que se busque controlar. Pese a la diversidad de aplicaciones, en todas ellas existen variables comunes que es necesario supervisar: aquellas que intrínsecamente se asocian al movimiento longitudinal y lateral del vehículo. Por lo general, y en la forma más básica, las variables consideradas en el análisis del movimiento longitudinal y lateral, respectivamente, son la velocidad y la dirección (ángulo de las ruedas) del vehículo.

Pese a que conceptualmente el problema asociado al control de la velocidad y dirección de un vehículo no es difícil de entender, la consideración de otros factores tales como la dinámica

no lineal que poseen los vehículos terrestres, las perturbaciones a la que éstos se ven sometidos y la clara interrelación que hay entre el movimiento longitudinal y lateral, hacen evidente que se trata de un problemática compleja y que requiere de soluciones altamente robustas.

Teniendo presente los factores antes mencionados, en particular la interacción que existe entre el movimiento longitudinal y lateral del vehículo, se pueden definir dos estrategias para diseñar controladores de bajo nivel para la velocidad y la dirección: (i) el enfoque integrado y (ii) el enfoque desacoplado. En la literatura se exponen distintos trabajos [1] – [5] que abordan el problema de control del movimiento longitudinal y lateral del vehículo desde una perspectiva integrada, lo que implica el diseñar controladores que supervisen la velocidad y la dirección del móvil considerando el acoplamiento que existe entre estas variables. Los resultados expuestos en los trabajos que proponen soluciones considerando este enfoque, dan prueba de la validez y la efectividad de los sistemas de control diseñados para supervisar las variables de interés en el desplazamiento del vehículo; obteniéndose buenos resultados en lo referido a robustez, tiempo de respuesta y error permanente. Sin embargo, pese a los resultados sobresalientes que son posibles obtener con este enfoque, los controladores diseñados presentan la desventaja que, debido a la dinámica del movimiento de un vehículo terrestre, requieren para su desarrollo de modelos altamente complejos que incorporan una gran cantidad de variables y parámetros. Esto conduce a que, además del tiempo invertir en obtener modelos precisos de sistemas no lineales complejos, los controladores diseñados tiendan a ser complicados desde un punto de vista matemático y muchas veces también sean difíciles de implementar.

Debido a que el desarrollo de estrategias de control altamente complejas no es deseable en las primeras etapas del proyecto de vehículo autónomo del Centro Avanzado de Tecnología para la Minería (AMTC) - más aún cuando es posible implementar soluciones menos elaboradas que no afectan drásticamente el rendimiento y la eficacia del sistema - se considera con especial interés la alternativa de un enfoque desacoplado, el cuál soluciona el problema de control sin considerar explícitamente la ligazón que existe entre el movimiento longitudinal y lateral del móvil. A razón de que el desacoplamiento de las variables simplifica notablemente el problema de diseño de controladores para el vehículo, en el último tiempo numerosos trabajos [6]-[35] han abordado de forma eficaz la problemática de diseño de sistemas de control para la velocidad y dirección de vehículos utilizando dicho enfoque. Por supuesto, al tratar el problema de control de forma desacoplada es necesario brindar soluciones para el movimiento longitudinal y lateral de

forma independiente. Los resultados expuestos en la literatura dan cuenta de la efectividad de las implementaciones que se han realizado utilizando esta perspectiva, obteniéndose soluciones robustas y de buen desempeño, y que además de ser eficaces permiten una reducción significativa de la complejidad de la implementación al compararse con el enfoque descrito previamente. Al analizar los resultados que se obtienen al utilizar esta orientación, junto con las claras ventajas que presentan, hacen de este enfoque el más apropiado para aplicación que se desarrolla en este trabajo de título.

Aludiendo al control del movimiento longitudinal, se han propuesto diferentes estrategias de control para supervisar las variables de interés involucradas, particularmente y con mayor énfasis, la velocidad del vehículo. Sin embargo, es importante destacar que, independiente de la estrategia utilizada para realizar el control de la velocidad del vehículo, en la actualidad existen dos tópicos bastantes populares en la investigación de sistemas de control de la velocidad para vehículos autónomos que están siendo implementados en las aplicaciones de AGVs: ACC (Adaptive Cruise Control) y Stop&Go. Ambas orientaciones apuntan a reducir la fatiga y la carga de manejo sobre el conductor junto con optimizar el consumo de combustible y la seguridad en el manejo. Ambas orientaciones son complementarias, ya que los vehículos autónomos o semiautónomos que implementan ACC están dirigidos a situaciones en que se requiere circular a velocidades mayores a 40 [km/h] y con un nivel de perturbaciones reducido, como sucede en un ambiente de carretera, mientras que los sistemas que implementan Stop&Go apuntan a situaciones que requieren una velocidad de circulación inferiores a 40[km/h] y donde existe un nivel de perturbaciones mayores, como obstáculos, otros vehículos y peatones. En la mayoría de las aplicaciones estas orientaciones se implementan de forma independiente y excluyente [6]-[11], aunque en aplicaciones más reciente se puede observar la integración de ambos enfoques en un esquema de control unificado [21]-[23].

Dentro de las estrategias de control que se han propuesto para realizar el control de la velocidad de un vehículo autónomo se encuentran las estrategias de control clásicas que se basan en modelos lineales sencillos [27]. Sin embargo, dado que la dinámica de un vehículo de escala real es totalmente no lineal, los controladores realimentados basados en linealizaciones de modelos más complejos entorno a puntos de operación no producen resultados del todo satisfactorios, a menos que se combinen con otros controladores que incorporen técnicas de control más avanzadas que permitan salvar las diferencias significativas que se producen en el

desempeño del controlador al variar el punto de operación. Por esta razón en la actualidad los sistemas de control de velocidad de vehículos terrestres no se basan en este tipo de controladores y la gran mayoría de los trabajos publicados acerca del tema [3]-[23] sugieren el uso de estrategias de control no lineal para la supervisión de la velocidad de un vehículo autónomo terrestre.

Dentro de los controladores no lineales utilizados para llevar a cabo el control de la velocidad del vehículo, destacan dos en particular: VSC (Variable Structure Control) y SMC (Sliding Mode Control). Los resultados expuestos en la literatura [3]-[5], [12] al implementar controladores basados en estas estrategias muestran que se logra un control y seguimiento de velocidad efectivo y robusto, obteniéndose un muy buen desempeño tanto a nivel de simulación como en implementaciones a escala real. Sin embargo, pese a las bondades evidentes de este tipo de controladores para realizar un control de velocidad, presentan la desventaja de que para su desarrollo requieren de modelos complejos y precisos; además que, debido a su no-linealidad, la estructura de estos controladores no es sencilla y tiende a ser difícil de modificar o ajustar. Esto último no ha impedido que este tipo de controladores sea utilizado en la actualidad y se considere como una estrategia de control válida para supervisar la variable de velocidad de desplazamiento en un AGV.

Con el propósito de superar las dificultades que presenta el diseño e implementación de las estrategias de control no-lineal mencionadas previamente, desde principios la década de 1990, una cantidad significativa de desarrollos teórico-prácticos para el control de velocidad en vehículos autónomos considera otro tipo de control no-lineal no basado en modelos analíticos: el control difuso. Distintos trabajos publicados [13]-[23], [28] muestran que la utilización de controladores difusos, ya sea directamente o en conjunto con otras estrategias de control, permite tener sistemas de control de excelente desempeño y con un alto grado de robustez, todo esto con una disminución de la complejidad que involucra el diseño e implementación de otras estrategias de control no-lineal. Entre las ventajas que presenta el desarrollo de controladores difusos, destaca el no tener necesidad de contar con un modelo de alta precisión para realizar el diseño del controlador; lo cual es una ventaja sobresaliente, ya que como muestra la literatura muchas veces debido a que la dinámica de los sistemas es compleja involucra una gran cantidad de trabajo el obtener estos modelos, tal como sucede en el caso de los vehículos terrestres. Además la determinación de las ganancias y parámetros del controlador difuso es posible realizarla

recurriendo a conocimiento de expertos o mediante heurísticas a partir de modelo simplificados del sistema en estudio [17], [20], [21], lo que facilita el diseño de los controladores.

En algunas de las últimas aplicaciones para realizar control longitudinal en AGVs, dadas las ventajas propias de los controladores basados en lógica difusa y la flexibilidad que esta técnica de control presenta, se han realizado desarrollos que trabajan en una estructura de control unificada, combinando en un controlador los enfoques ACC y Stop&Go [21] - [23]. Al trabajar con este marco unificado se logra mediante un único controlador realizar el control de velocidad en un amplio rango de velocidades y con distintos niveles de perturbación en el ambiente, lo cual desde el punto de vista de las aplicaciones disponibles, eficiencia en el uso de los recursos, robustez del sistema de control y simplificaciones en el diseño y la implementación de la estrategia de control resulta ser una mejora considerable, al compararse a la opción de tener un solo enfoque incorporado en el sistema supervisor o implementar dos controladores independientes para abordar cada orientación disponible.

Respecto al control del movimiento lateral del vehículo de forma similar, y en la muchos trabajos y aplicaciones de forma paralela al control longitudinal [16], [21], [28], se han explorado una amplia gama de soluciones a la problemática de control, considerando que en la dinámica del movimiento lateral es más compleja que la del movimiento longitudinal, necesitándose tomar en cuenta, en general, una mayor cantidad de factores en este caso.

Los primeros acercamientos que se realizaron para dar una solución al control de la dirección del vehículo involucraron el uso de estrategias de control clásicas como el uso de controladores PID (o alguna de sus variantes), control por realimentación de estado y posicionamiento de polos [24]-[26]. Aunque desde una perspectiva teórica se esperaría que estas técnicas produjeran resultados positivos, la implementación de ellas muestra que, aunque es posible obtener resultados correctos, debido a la complejidad del movimiento lateral y el supuesto de modelos lineales, el rango de operación en que los controladores lineales funciona adecuadamente es muy limitado; por lo que en caso de que se requiera trabajar con puntos de operación variables en un amplio rango esta estrategia de control no resulta adecuada a menos que se combine con otro tipo de técnica. Por ello en las aplicaciones actuales que requieren un control sobre el movimiento lateral preciso, robusto y con un rango de operación variable no son utilizados este tipo de controladores.

Teniendo en cuenta la no linealidad de la dinámica de un vehículo terrestre, en particular en lo que a movimiento lateral se refiere, distintos autores han propuesto estrategias de control no lineal para resolver adecuadamente este problema. Dentro de las estrategias propuestas destacan dos: SMC y CTC (Computed Torque Control) [3], [28], [29]. La implementación de estas técnicas, como se expone en distintos trabajos, permite obtener resultados satisfactorios en lo referido al control de la dirección del vehículo, observándose un seguimiento de referencias con bajo error y una respuesta estable y robusta de parte de los controladores. Sin embargo, de manera análoga a lo descrito para los controladores de velocidad, el diseño de controladores basado en las estrategias antes mencionadas requiere de modelos matemáticos que describan la dinámica del movimiento lateral del vehículo, modelos que son complejos e involucran una gran cantidad de variables y parámetros asociados a los distintos factores que intervienen en el movimiento. A fin de simplificar el diseño de los controladores, en algunos trabajos se utilizan modelos simplificados del movimiento lateral, con lo cual es posible obtener controladores más sencillos aunque menos robustos y precisos. Sin embargo, pese a los efectos negativos que conlleva la utilización de modelos simplificados, los resultados obtenidos exponen que los controladores continúan mostrando un buen desempeño al llevar a cabo las acciones de control [20], [29], [30].

Tal como sucede con el desarrollo de esquemas de control para el movimiento longitudinal, además de las técnicas de control no lineal antes mencionadas en el último tiempo, distintos autores [16], [19], [28], [31]-[35] han propuesto el uso de controladores difusos para dar solución al problema de controlar el movimiento lateral del vehículo. Como se ha mencionado anteriormente, el uso de controladores difusos permite incorporar conocimiento heurístico de los sistemas que no puede ser modelado de forma matemática. Dicho conocimiento puede contribuir a mejorar significativamente las acciones de control realizadas. La lógica difusa, como se expone en la literatura, puede ser utilizada directamente en el diseño de controladores o de forma indirecta como complemento de otra técnica de control a fin de mejorarla.

La aplicación de la lógica difusa de manera indirecta se ha propuesto su uso junto con otras técnicas de control no lineal como SMC [16], [19]. En este caso lo que se hace es determinar el controlador en modo deslizante a partir del modelo de la planta que se dispone (o determina en caso de no disponer de uno) y luego se fusifica la salida del SMC, dando lugar a un nuevo esquema de control denominado FSMC (Fuzzy Sliding Mode Control). Este nuevo

esquema de control mantiene las condiciones de SMC, pero incorpora, mediante la lógica difusa, una flexibilidad y ajuste fino de parámetros que no es posible obtener usando únicamente la técnica de SMC. Además, el uso de un modelo para determinar SMC permite optimizar la determinación de las ganancias asociadas a la parte difusa, el reajuste de las mismas y la obtención de la base de reglas; ya que, si no existiera un modelo, toda la determinación de la base de reglas y ganancias junto con el reajuste, tendría que hacerse mediante ensayo y error hasta encontrar los valores apropiados para el correcto funcionamiento del controlador.

Trabajos actuales han explorado también la aplicación directa de controladores difusos utilizando tanto el modelo de inferencia de Mamdani [28], [33]-[35] como el modelo de inferencia de Takagi-Sugeno [31], [32]. En el caso de aquellos controladores que utilizan la inferencia de Mamdani, la existencia de un modelo matemático no es fundamental, ya que la base de conocimientos y las reglas de inferencia se basan en el conocimiento heurístico que se tiene de la planta y no en un modelo particular. Los resultados obtenidos con estos controladores muestran la efectividad de esta técnica de control, visualizándose en ellos la robustez, estabilidad y el mínimo error que se obtiene al supervisar la dirección del vehículo, los cuales superan comparativamente las soluciones conseguidas con técnicas de control no lineal [16], [28], [33]. Pese a que el conocimiento de un modelo no es fundamental para el diseño de los controladores difusos, en particular para el movimiento lateral, resulta patente de la literatura que el poseer esa información es de mucha utilidad, ya que el contar con un modelo permite realizar simulaciones para visualizar rápidamente el efecto de los ajustes realizados y, además, permite utilizar algoritmos para realizar un ajuste y determinación más rápida y óptima de los parámetros del controlador difuso [21].

En el caso de los controladores difusos que se basan en la inferencia de Takagi-Sugeno se puede observar en los trabajos publicados [31], [32] que se obtienen controladores robustos y con buen desempeño, incluso considerando perturbaciones como cambios en la inclinación y tipo de caminos. La utilización de un modelo, aunque sea simplificado, es importante en esta estrategia de control, ya que permite obtener los parámetros óptimos y realizar el reajuste de parámetros del controlador de forma sencilla y con un grado de flexibilidad considerable.

La revisión bibliográfica realizada muestra que para realizar el control desacoplado del movimiento longitudinal y lateral de un vehículo terrestre, considerando principalmente la dinámica no lineal y altamente compleja del vehículo, la mayoría de los trabajos actuales

convergen en el punto que para ambos movimientos las estrategias de control no lineal son aquellas que generan los mejores resultados desde el punto de vista de error permanente, estabilidad y robustez de los controladores y las variables de interés de cada movimiento. Dentro de este punto se puede apreciar que los controladores basados en lógica difusa son ampliamente utilizados para realizar tanto control longitudinal y lateral, obteniéndose resultados efectivos en el control de la velocidad y la dirección que superan en la mayoría de las aplicaciones los resultados obtenidos con otras estrategias de control no lineal, destacándose por la no necesidad de contar con un modelo matemático preciso para el desarrollo del controlador y la simplicidad del diseño e implementación de esta técnica de control. Aunque aún se trata de una técnica en investigación y perfeccionamiento, los resultados disponibles en la literatura la validan y avalan como una estrategia de control apropiada para la supervisión de la velocidad y dirección de un AGV, razón por la cual el diseño que se presenta en este trabajo de título se basa en esta técnica de control.

2.2 Control difuso de sistemas dinámicos

2.2.1 Sistemas de lógica difusa

La lógica clásica o booleana asume que una afirmación puede ser o verdadera, o falsa. Por ello, en la lógica tradicional cuando se define un conjunto de elementos, se puede pertenecer o no al conjunto, pero no hay cabida para incertezas. Sin embargo, en la vida cotidiana la mayoría de las cosas no son ciertas o falsas en el sentido absoluto. Los seres humanos son capaces de asignar grados de certeza a una afirmación y a la vez procesar una gran cantidad de información imprecisa. La lógica difusa es un tipo de lógica multivalente que procesa afirmaciones imprecisas asignándoles diferentes grados de verdad o certeza, a diferencia de la lógica tradicional que es bivalente; por lo que se asemeja al razonamiento lógico del ser humano, permitiendo tener una herramienta para trabajar con inferencia causal aproximada.

La lógica difusa se basa en el uso de conjuntos difusos para asignar los distintos grados de certeza de una afirmación. En la lógica tradicional la pertenencia a un determinado conjunto está claramente definida, por lo que un elemento puede pertenecer o no pertenecer a un determinado conjunto, lo que implica que la transición entre ser o no ser miembro de un determinado conjunto es abrupta. Matemáticamente, si se define una función de pertenencia o membresía de un elemento a un conjunto, en los conjuntos convencionales se trata de una función discontinua que se puede definir de la siguiente forma:

Sea $M \subseteq X \subseteq \mathfrak{R}$ y $x \in X \Rightarrow \mu: X \rightarrow \{0,1\}$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in M \\ 0 & \text{si } x \notin M \end{cases}$$

En los conjuntos difusos, por otra parte, la pertenencia a un determinado conjunto no está totalmente definida, sino que puede presentar valores intermedios. Por ello, en lógica difusa no se habla de si un elemento pertenece o no a un determinado conjunto, sino que se habla de cuál es el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto, permitiendo así representar estos valores intermedios de membresía. Por lo general, a fin de tener valores normalizados y hacer una analogía con la idea de “porcentaje de pertenencia”, el grado de pertenencia toma valores entre 0 y 1. Bajo ese supuesto, las funciones de pertenencia son continuas y se definirían de la siguiente forma:

Sea $M \subseteq X \subseteq \mathfrak{R}$ y $x \in X \Rightarrow \mu_M: X \rightarrow [0,1]$

Donde $\mu_M(x)$ indica el grado de pertenencia del elemento x al conjunto M .

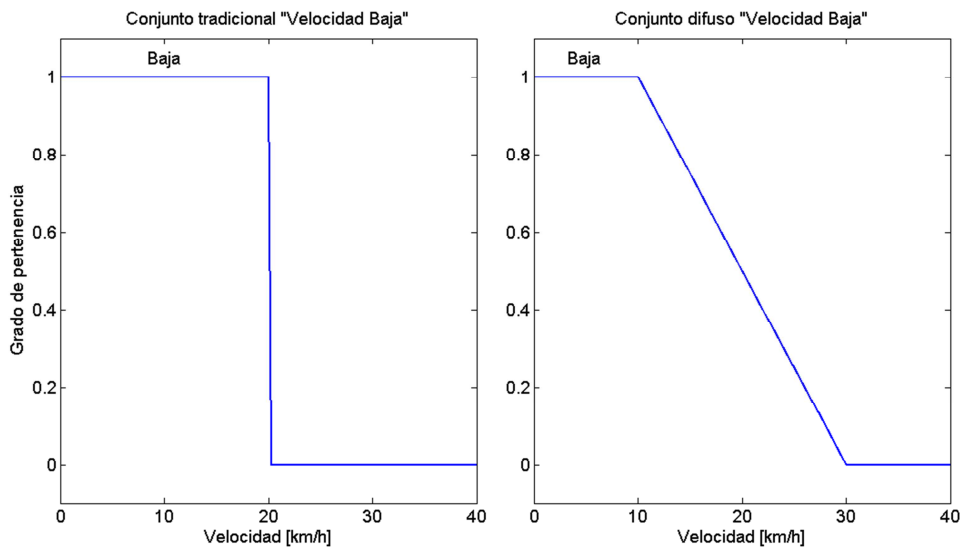


Figura 2.1 Comparación entre conjunto tradicional y conjunto difuso al definir el conjunto “Velocidad baja”.

La diferencia entre un conjunto convencional y uno difuso, con sus respectivas funciones de pertenencia se puede ver en el siguiente ejemplo. Si se define el conjunto “Velocidad baja”, en la Figura 2.1 se observa que si se define como un conjunto tradicional, toda velocidad superior o igual a 20 [km/h] se considera que no pertenece al conjunto de “Velocidad baja”. Sin embargo, si el conjunto “Velocidad baja” se define como difuso, se aprecia en la Figura 2.1 que aparecen

valores intermedios de pertenencia, asignando pertenencia a valores que desde el punto de vista de la lógica tradicional no pertenecerían al conjunto “Velocidad baja”. Esta comparación muestra que la lógica difusa se asemeja mejor al razonamiento humano ya que, por ejemplo, si bien la mayoría de los seres humanos no dirían 20 [km/h] es completamente una velocidad “baja”, concordarían en decir que es “un poco baja” o “medianamente baja”, lo que se expresa plenamente al definir el conjunto “Velocidad baja” como difuso.

Debido a que los conjuntos difusos trabajan con grados de pertenencia, habitualmente se utilizan para modelar expresiones lingüísticas que no tienen una representación matemáticamente exacta, como por ejemplo “aproximadamente”, “muy” o “poco”. Por ello es habitual que al trabajar con conjuntos difusos las variables sean “variables lingüísticas” y que los valores asociados a esas variables también sean “valores lingüísticos”. Las variables lingüísticas son representaciones de variables físicas y sus valores numéricos dependen del contexto físico que representen. Por otra parte cada valor lingüístico que se asocia a una variable lingüística, representa un conjunto de valores numéricos que dependen del contexto físico que represente la variable lingüística. A causa de que los conjuntos difusos son capaces de manejar la imprecisión, mediante el considerar grados de pertenencia, facilitan el establecer semejanzas entre elementos que no son exactamente iguales, pero que comparten características comunes entre sí. También debido a que los computadores no trabajan con expresiones o valores lingüísticos, los conjuntos difusos dan la posibilidad de traducir estas expresiones a valores numéricos que son procesables por un ordenador.

La forma como se asigna el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto, es decir, la función de pertenencia μ_M utilizada, depende en gran medida de las características de la variable que se está analizando y la aplicación para la cual se utilice. Existen una gran variedad de funciones de pertenencia que permiten asignar el grado de pertenencia de un elemento a un determinado conjunto, pudiendo ser éstas triangulares, trapezoidales, Gaussianas y sigmoideas con diferentes variaciones [36] - [38]. Sin embargo, pese a la amplia variedad de funciones de pertenencia que existen, en la mayoría de las aplicaciones las funciones más utilizadas son las funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales. La razón de esta elección se basa en que éstas funciones son sencillas desde el punto de vista matemático, por lo que su representación gráfica y las operaciones que se pueden definir entre ellas son simples. Además el ajuste de los parámetros de la función y la optimización de los mismos es fácilmente realizable, incluso

intuitivo en algunos casos. La función triangular claramente es una forma particular de las funciones trapezoidales, las que a su vez se definen de la siguiente forma:

Sea una función trapezoidal, $\mu(x)$, definida $\forall x \in \mathbb{R}$ con límites inferior a , superior d y límites de soporte inferior b y soporte superior c .

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x > d \text{ o } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases}$$

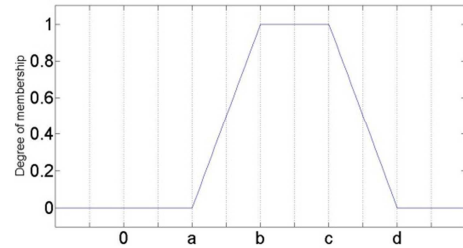


Figura 2.2 Ecuación y gráfico de la función con forma trapezoidal

Por lo general, cuando se trabaja en aplicaciones de lógica difusa, como es el caso de los controladores difusos, se maneja una cantidad significativa de conjuntos con sus respectivas funciones de pertenencia asociadas. A fin de utilizar adecuadamente la información que aportan los conjuntos difusos en este tipo de aplicaciones, es necesario definir una operatoria que permita manejar correctamente las interacciones que ocurren entre ellos.

En la teoría de conjuntos clásica se definen tres operaciones básicas que permiten combinar conjuntos: intersección, unión y complemento. En el caso de los conjuntos difusos se pueden definir de manera análoga a los conjuntos convencionales la intersección, unión y complemento difuso de la siguiente manera:

Sea $x \in X \subseteq \mathfrak{R}$ y A, B conjuntos difusos \Rightarrow

$$(A \cap B)(x) = \min[A(x), B(x)]$$

$$(A \cup B)(x) = \max[A(x), B(x)]$$

$$\bar{A}(x) = 1 - A(x)$$

Estas operaciones se conocen como operaciones difusas estándar. Es claro que cuando el rango de los grados de pertenencia se restringe al intervalo $[0, 1]$, las operaciones difusas estándar coinciden plenamente con las operaciones de intersección, unión y complemento de la teoría de conjunto clásica. Por lo tanto, las operaciones difusas estándar son generalizaciones de las

operaciones clásicas. Sin embargo, las operaciones difusas estándar no son las únicas generalizaciones de las operaciones de intersección, unión y complemento de la teoría de conjuntos clásicas; existe una amplia gama de funciones que califican como generalizaciones de las operaciones tradicionales. En el caso de las operaciones de intersección y unión las generalizaciones corresponden a una clase de funciones binarias denominadas *normas T* y *conormas T* respectivamente.

Para que una función sea catalogada como *norma T*, *conorma T* o complemento difuso debe satisfacer una serie de axiomas y tener propiedades específicas según la operación que represente [39], [40].

En la mayoría de las aplicaciones cotidianas las *normas T* más utilizadas son el mínimo y el producto algebraico. Otras *normas T* existentes y utilizadas en ciertas aplicaciones son la de Lukasiewicz, Hamacher, Yager, Frank y Sugeno [41], [42].

En el caso de las *conormas T* la más ampliamente utilizada es el máximo. Sin embargo, hay otras *conormas T* que son usadas en algunas implementaciones como son las de Lukasiewicz, Hamacher, Yager, Frank y Sugeno [43], [44].

En lo que se refiere al complemento difuso la función más difundida en las aplicaciones prácticas es la función “uno menos”, que corresponde a la operación difusa estándar. También existen otros complementos difusos como el de Sugeno, Yager, exponencial, logarítmico y de Gödel [45].

En la Figura 2.3 se puede visualizar el modo de operación de las *normas T*, *conormas T* y complemento más utilizados.

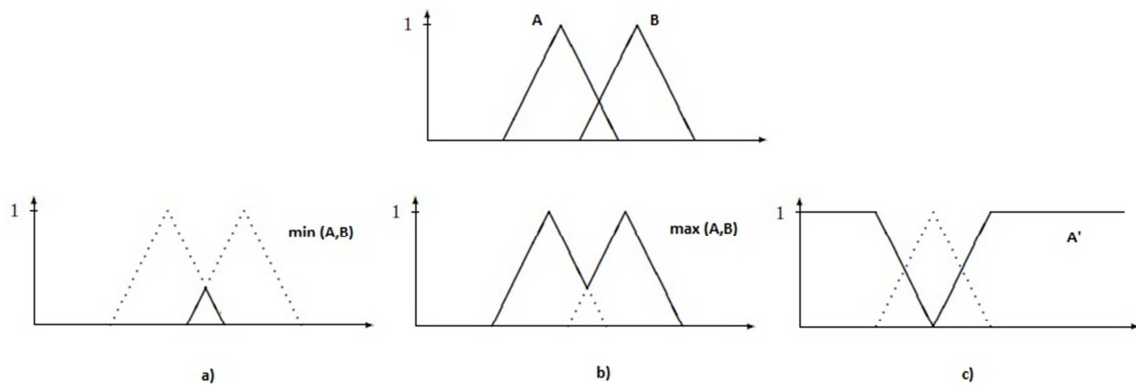


Figura 2.3 Norma T , conorma T y complemento difuso más utilizados en aplicaciones de lógica difusa. En a) se ve la norma T que es el mínimo; en b) la conorma T que es el máximo y en c) el complemento difuso que es la función “uno menos”

Tal como sucede en la teoría de conjuntos clásicas, la mayoría de los pares de normas T y conormas T forman un sistema De Morgan y las siguientes ecuaciones son válidas:

$$(A \cup B)' = A' \cap B'$$

$$(A \cap B)' = A' \cup B'$$

Donde el operador $(\cdot)'$ es una negación fuerte. Estas ecuaciones se conocen como las leyes de De Morgan. En la mayoría de los sistemas De Morgan la negación fuerte corresponde al complemento difuso definido en las operaciones difusas estándar, pero pudiera ser otro complemento dependiendo del par norma T – conorma T que se defina.

La elección de una determinada norma T o conorma T , depende principalmente del sistema o aplicación que se esté analizando, ya que la función elegida para combinar los conjuntos difusos debe ser un modelo apropiado del comportamiento del sistema. Es importante notar que lo apropiado de la elección, por lo general, solo puede ser visualizado al probar de manera empírica en el sistema o aplicación con los operadores seleccionados. Junto con esto, la simplicidad en la implementación y la eficiencia computacional también pueden ser factores influyentes en la decisión sobre que función elegir como operación generalizada para combinar los conjuntos difusos.

En lógica difusa la mayoría de las variables con las que se trabajan son variables lingüísticas. A cada variable lingüística se le asocia un grupo de valores lingüísticos, donde cada valor lingüístico corresponde a un conjunto difuso. Por ejemplo si se define la variable lingüística “Velocidad” a esta se le pueden asociar los siguientes conjuntos difusos:

{Muy baja, baja, media, alta, muy alta}

En los cuales, cada conjunto difuso toma un valor lingüístico.

Cada variable lingüística representa, por lo general, una variable física o estadística que en la práctica puede tomar un rango acotado, continuo o discreto, de valores. El rango de valores físicos que cubre la variable lingüística se denomina recorrido universal. Cada valor lingüístico asociado a los conjuntos difusos debe estar definido para ese recorrido universal, aunque su función de pertenencia puede tomar grados de membresía no nulos en un subconjunto del recorrido universal de la variable. El recorrido universal que toma una variable lingüística depende fundamentalmente de la aplicación o sistema que se esté analizando. En el caso de la variable lingüística “Velocidad” que se citaba anteriormente como ejemplo, si se trata de un automóvil el recorrido universal pudiera tomar el rango de valores [0 200] [km/h], pero en el caso de un avión ese rango ya no es representativo de la física del sistema por lo que se tendría que elegir otro rango, por ejemplo [0 1000] [km/h].

Por lo general, cuando se trabaja con lógica difusa el recorrido universal se utiliza normalizado, es decir, toma valores en el intervalo [0 1] o [-1 1], dependiendo de la variable lingüística definida. Por lo tanto es necesario realizar un mapeo del rango dinámico que toma la variable lingüística en la práctica a un intervalo normalizado. La normalización del recorrido universal se realiza mediante la elección de factores de escala adecuados. La selección de un factor de escala no es completamente arbitraria, resulta de un compromiso entre varios elementos de la aplicación o sistema que se estudie.

La determinación del número de valores lingüísticos asociados a una variable lingüística particular, es decir, cuantos conjuntos difusos definen para una determinada variable es algo que depende del diseñador del sistema de lógica difusa. Mientras mayor número de conjuntos difusos se asocien a una determinada variable, más precisión se obtiene, pero aumenta la complejidad del sistema y de procesamiento, dejando en clara evidencia el compromiso que existe entre precisión y complejidad dependiendo del número de conjuntos difusos.

El razonamiento lógico busca inferir información a partir de proposiciones que pueden ser ciertas o falsas. La forma de inferir esa información es mediante una implicación la que habitualmente toma la forma de una regla del tipo “si – entonces”. Donde la condición asociada al “si” se denomina *premisa* o *antecedente* y la parte asociada al “entonces” se llama

consecuente. Es por ello que los sistemas de lógica, ya sea tradicional o difusa, son sistemas basados en reglas.

En la lógica tradicional existen dos métodos de inferencia muy importantes: el “Modus Ponens” y el “Modus Tollens” [46], [47]. El “Modus Ponens” se asocia a la implicación $p \Rightarrow q$ y en términos de proposiciones se escribe de la siguiente manera:

$$(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$$

Lo que, escrito como premisa y consecuente, corresponde a:

Premisa 1: p es P

Premisa 2: Si p es P entonces q es Q

Consecuente: q es Q

El “Modus Tollens” por otra parte es el recíproco del “Modus Ponens”.

En la mayoría de las aplicaciones el “Modus Ponens” es el método de inferencia más utilizado, debido principalmente a la relación causa y efecto, propia de la naturaleza, que reflejan sus premisas y consecuentes.

En lógica difusa, tal como sucede con la mayoría de los conceptos de la lógica booleana, se amplía el concepto de “Modus Ponens”, utilizándose en este caso el “Modus Ponens generalizado” [48] que en este caso, expresado como premisas y consecuente, sería:

Premisa 1: p es \tilde{P}

Premisa 2: Si p es P entonces q es Q

Consecuente: q es \tilde{Q}

Donde P, \tilde{P}, Q y \tilde{Q} son conjuntos difusos asociados a valores lingüísticos.

Una implicancia, utilizando lógica tradicional, puede ser interpretada en función de operadores lógicos básicos [47]. De igual manera, cada proposición puede ser verdadera o falsa. En el caso de la lógica difusa los operadores lógicos se reemplazan por *normas T*, *conormas T* y complementos difusos, y las proposiciones no son verdaderas o falsas, sino que tienen un grado

de pertenencia a un determinado conjunto difuso. Según la *norma T* y la interpretación de la implicancia que se tome, la implicancia tomará distintos valores. En función de lo anterior existen varias implicancias: la implicancia de Mamdani, de Takagi-Sugeno, de Larsen, de Lukasiewicz, de Zadeh, de Gödel y de Sharp [47], [49], [50]. En particular la implicancia de Mamdani se define de la siguiente manera:

Sea $x \in X$ e $y \in Y$ con X, Y conjuntos difusos.

$\mu_X(\cdot)$ y $\mu_Y(\cdot)$ funciones de pertenencia de X e Y respectivamente.

$$\mu_{X \rightarrow Y}(x, y) = \min[\mu_X(x), \mu_Y(y)]$$

En la práctica lo que refleja esta implicancia es el que $x \in X$ limita el grado de pertenencia de y al conjunto difuso Y , definiendo una nueva función de pertenencia para Y asociada a esa regla particular. Aunque esta la implicancia de Mamdani no cumple con las propiedades de la lógica clásica, preserva la relación de causalidad entre premisa y consecuente.

Un sistema basado en lógica difusa puede considerar distintos números de reglas, dependiendo de lo compleja que sea la aplicación y los distintos factores que intervengan en ella. Aunque el número de reglas puede variar, la forma como se resuelven las implicancias explícitas en cada regla y la forma en que se combinan las diferentes reglas para producir un resultado son únicas para todo el sistema. Todas las reglas, la implicancia escogida para relacionar las premisas con el consecuente de cada regla y la forma de combinar los consecuentes de las distintas reglas forman el núcleo del sistema basado en lógica difusa. Este núcleo se denomina Base de Conocimiento. Junto a la base de conocimiento, como se observa en la Figura 2.4, existen otros dos componentes principales del sistema basado en lógica difusa: la interfaz de fusificación y la interfaz de defusificación.

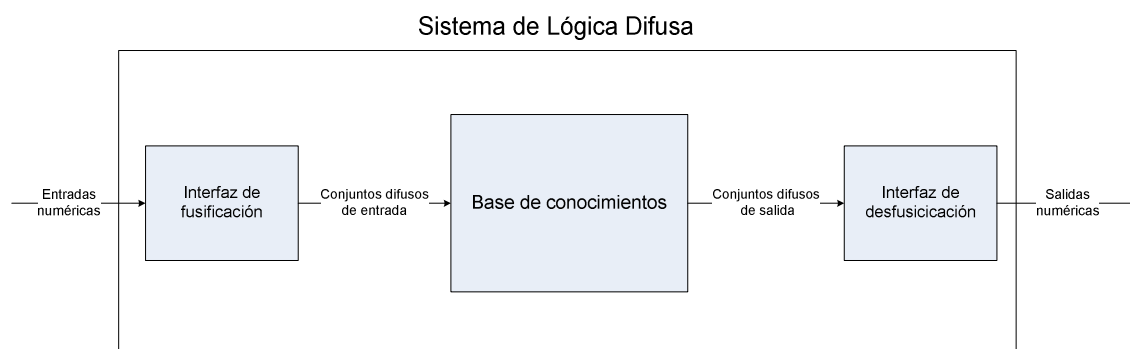


Figura 2.4 Sistema de lógica difusa con sus tres componentes principales: Interfaz de fusificación, Base de conocimiento e interfaz de defusificación.

La interfaz de fusificación es la encargada de llevar los valores numéricos de cada entrada del sistema, que corresponde a una variable lingüística, a valores difusos (grados de pertenencia). Para ello toma el valor numérico de cada variable lingüística que ingresa como entrada al sistema difuso y evalúa ese valor en cada función de pertenencia de cada conjunto difuso asociado a dicha variable. Haciendo esto, la interfaz de fusificación retorna el grado de pertenencia de la variable lingüística a cada conjunto difuso asociado a esa variable particular.

La base de conocimiento como se mencionaba previamente, tiene por objetivo realizar la inferencia a partir de los datos de entrada al sistema. Para ello considera los grados de pertenencia que entrega la interfaz de fusificación y los utiliza en las premisas de las reglas que conforman la base de conocimiento. Teniendo las premisas definidas, resolviendo usando la implicancia con que fue creada la base de conocimiento es posible obtener el conjunto difuso asociado al consecuente de cada regla, lo cuales se combinan usando un modelo de inferencia, el cual se escoge de acuerdo a aplicación con la que se esté trabajando, retornando un conjunto difuso de salida que resulta de la combinación de los conjuntos difusos de los consecuentes de las reglas.

La interfaz de defusificación cumple la labor de tomar el conjunto difuso de salida generado por la base de conocimientos y retornar un valor numérico de salida a partir de ese conjunto difuso. Esto permite al sistema difuso interactuar con otros dispositivos que no son capaces de manejar conceptos difusos de forma directa como es el caso de los actuadores y sensores en un sistema de control.

2.2.2 Controladores difusos

El control difuso es un tipo de control, por lo general realimentado, basado en reglas, que permite incorporar conocimiento que no puede ser descrito mediante un modelo analítico en el que se basan los controladores clásicos.

En la mayoría de las aplicaciones el control difuso reemplaza el control clásico o es utilizado en conjunto a otras estrategias de control convencionales como un control supervisor.

Básicamente un controlador difuso es un sistema de lógica difusa, como el descrito en la sección anterior, cuyas entradas, conjuntos difusos, reglas y salidas se seleccionan adecuadamente para llevar a cabo una acción de control. En la Figura 2.4 se exponen los componentes básicos de un controlador difuso.

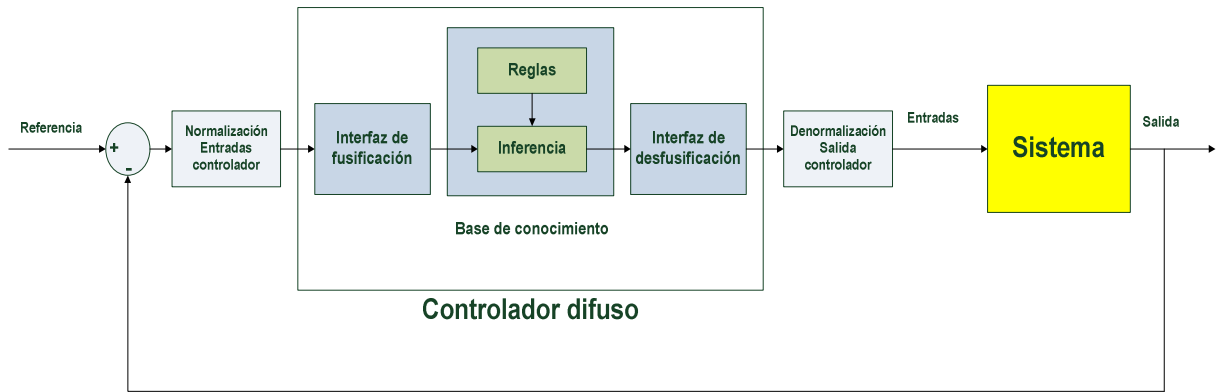


Figura 2.5 Diagrama de bloques genérico de un controlador difuso en lazo cerrado.

Actualmente existen dos grandes tipos de controladores difusos diferenciados según el modelo de inferencia que utilicen: aquellos que ocupan el modelo de inferencia de Mamdani [51], [52] y los que utilizan el sistema de inferencia de Takagi-Sugeno [53], [54].

En particular, el modelo de inferencia de Mamdani, considera que para una base de conocimientos con N reglas el conjunto difuso de salida resultante se determina de la siguiente forma:

Sea $x = (x_1, x_2, \dots, x_k)$, y variables de entrada y salida respectivamente.

$X_i = (X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ki})$ e Y_i con $i = 1, \dots, N$ sus conjuntos difusos asociados.

$$BR = \left\{ \begin{array}{l} R_1: \text{Si } x \text{ es } X_1 \text{ entonces } y \text{ es } Y_1 \\ \vdots \\ R_N: \text{Si } x \text{ es } X_N \text{ entonces } y \text{ es } Y_N \end{array} \right\}$$

Considerando la implicancia de Mamdani para cada regla se tiene:

$$\begin{aligned} \mu_{R_1}(y) &= \min[\mu_{X_{11}}(x_1), \mu_{X_{21}}(x_2), \dots, \mu_{X_{k1}}(x_k), \mu_{Y_1}(y)] \\ &\quad \vdots \\ \mu_{R_N}(y) &= \min[\mu_{X_{1N}}(x_1), \mu_{X_{2N}}(x_2), \dots, \mu_{X_{kN}}(x_k), \mu_{Y_N}(y)] \end{aligned}$$

La función de pertenencia del conjunto de salida generado por la base de reglas es:

$$\mu_{BR}(y) = \max[\mu_{R_1}(y), \mu_{R_2}(y), \dots, \mu_{R_N}(y)]$$

Como se mostró en la sección anterior la base de conocimiento contiene las reglas y realiza la inferencia para obtener el conjunto difuso de salida, en este caso del controlador. Sin embargo para poder definir adecuadamente las reglas y poder realizar la inferencia es necesario

haber precisado las entradas y salidas del sistema de control difuso al igual que los conjuntos difusos asociados a las entradas y salidas.

En todo esquema de control, el objetivo del controlador es poder seguir una referencia, dinámica o estática, lo cual se logra monitoreando el error entre la salida actual del sistema controlado y la referencia que se desea seguir y tratando de que este sea lo más pequeño posible aplicando acciones de control adecuadas. En el caso de los controladores difusos, como se aprecia en la Figura 2.5, el objetivo y la forma de llevar a cabo esta supervisión es similar.

El error es una variable que siempre se debe supervisar en los sistemas de control difuso, pero junto a ella también es común monitorear la variación del error y la integral del error del sistema [16], [21], [55]. La selección de estas variables repercute directamente en el comportamiento y en las características que tendrá el controlador diseñado. Por otra parte, la variable de salida, o las variables en el caso de un sistema MIMO, del controlador por lo general es la variable física que se manipula o la variación de dicha variable.

Según las variables de entrada y salida que se escojan, haciendo una analogía con los controladores clásicos, los controladores difusos se asocian a controladores P, PI, PD o PID. Pese a esta asociación, es importante notar que los controladores difusos, debido a la forma en que se implementa el control haciendo uso de la base de conocimientos, permite tomar acciones de control tanto lineales como no lineales lo que mejora notablemente el control de los sistemas en comparación a los controladores clásicos. En la Tabla 2.1 se muestra las variables de entrada y salida más utilizadas en controladores difusos y a que controlador clásico se asocian [55].

Entradas			Salida	Tipo
e			u	P
e	Δe		Δu	PI
e	Δe		u	PD
e	$\int e dt$		u	PI
e	$\int e dt$	Δe	u	PID

Tabla 2.1 Tipo de controlador clásico asociado a las entradas y salidas del controlador difuso. Los tipos son proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) y proporcional integral derivativo (PID).

Debido a la naturaleza de las variables de entrada del controlador, todas asociadas a errores, el recorrido universal normalizado de las variables se define entre [-1 1], ya que tanto el

error, como su variación e integral pueden tomar valores positivos y negativos. En el caso de la salida del controlador la elección del recorrido universal dependerá de si las características de la variable física que se trate.

La elección de los conjuntos difusos es una variable que depende del diseñador, pero que es importante notar que tendrá un efecto significativo en la precisión y el tiempo de subida del controlador.

Por lo general, se asocian a las variables de entrada y salida del controlador 5 o 7 conjuntos difusos, cuyas variables lingüísticas asociadas dan cuenta de la magnitud y signo de la variable. Considerando 7 conjuntos difusos, normalmente se les relacionan los siguientes valores lingüísticos:

{Negativo grande, Negativo medio, Negativo pequeño, Cero, Positivo pequeño, Positivo medio, Positivo grande}

Las funciones de pertenencia asociadas a cada conjunto difuso dependen principalmente del proceso o sistema que se esté controlando, pero en el caso de los controladores difusos con modelo de inferencia de Mamdani, en la mayoría de los casos se utilizan funciones de pertenencia con forma triangular o trapezoidal. En la Figura 2.6 se puede apreciar la estructura clásica que tienen las funciones de pertenencia de los diferentes conjuntos difusos asociados a una variable lingüística cualquiera.

El traslape y la amplitud de las funciones de pertenencia de cada conjunto, como se observa en la Figura 2.6, es un parámetro de diseño que depende fuertemente de las características de las variables controlada y manipulada; junto con las propiedades que se desea para el sistema como por ejemplo tiempo de subida, sobrenivel máximo, tiempo de estabilización, suavidad en la salida del sistema, entre otros.

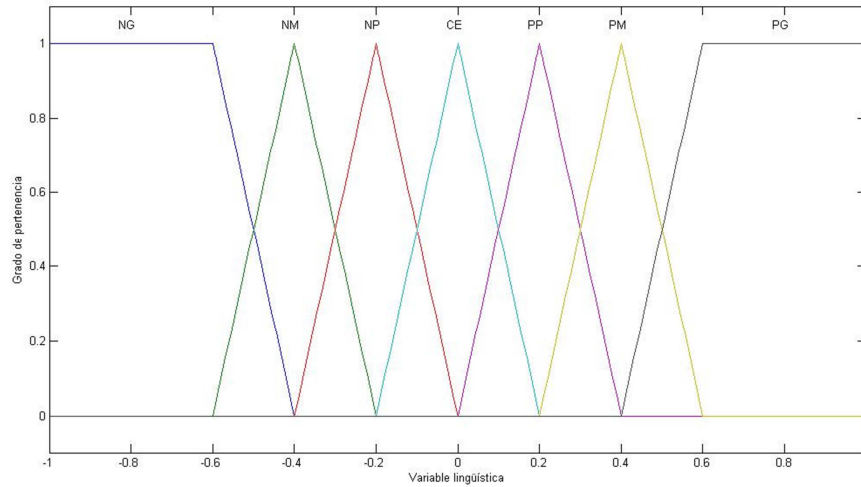


Figura 2.6 Conjuntos difusos asociados a una variable lingüística usando funciones de pertenencia con forma triangular y trapezoidal. Los valores lingüísticos de los conjuntos difusos corresponde a: negativo grande (NG), negativo medio (NM), negativo pequeño (NP), Cero (CE), positivo pequeño (PP), positivo medio (PM) y positivo grande (PG).

Una vez definidas las entradas y salidas del controlador difuso, la base de reglas se construye a partir de dichas variables. Dado que los controladores difusos incorporan el conocimiento de expertos, las reglas que se definen por lo general son bastantes intuitivas y emulan el comportamiento de un operador humano. La intuición de las reglas no es algo que se observe siempre en los controladores difusos, pero que permiten llevar a cabo las acciones de control adecuadas y preservar la estabilidad del sistema.

El número de reglas difusas que compondrán la base de conocimiento del sistema, también es un parámetro de diseño y en una primera aproximación queda determinado por el número de conjuntos difusos de las entradas. Es importante tener en consideración que el número de reglas difusas que se elijan será directamente proporcional a la precisión y complejidad del sistema, por lo que siempre existe un compromiso entre simplicidad y precisión del controlador que se está diseñando.

Para facilitar la comprensión y análisis de la base de conocimientos de un controlador difuso, las reglas se presentan usando tablas difusas de decisión, también denominadas mapa de reglas difusas. En estas tablas se puede visualizar fácilmente las reglas que serán gatilladas ante diferentes valores de las entradas del controlador. En el caso particular de un controlador difuso tipo PI, que posee como entradas error y la variación del error y como salida la variación de la variable manipulada; donde cada variable lingüística tiene 7 conjuntos difusos asociados, se tendrían 49 reglas que pueden visualizarse en el siguiente mapa de reglas difusas:

Δu		Δe						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
e	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	CE
	NM	NG	NG	NG	NM	NP	CE	PP
	NP	NG	NG	NM	NP	CE	PP	PM
	CE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PG
	PM	NP	CE	PP	PM	PG	PG	PG
	PG	CE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tabla 2.2 Mapa de reglas difusas para un controlador tipo PI. Considera como entradas el error (e) y la variación del error (Δe); y como salida la variación de la variable manipulada (Δu). Cada variable tiene asociados siete conjuntos difusos los cuales son: negativo grande (NG), negativo medio (NM), negativo pequeño (PP), cero (CE), positivo pequeño (PP), positivo medio (PM) y positivo grande (PG).

La derivación de este mapa de reglas, particularmente para el caso de los controladores PI difusos, puede realizarse a partir de la respuesta al escalón de un sistema de segundo orden, como la que se muestra en la Figura 2.7. En un ambiente controlado, el controlador debiera buscar hacer converger el sistema a un régimen permanente en que el error permanente fuera nulo. Al realizar un análisis de las regiones que se muestran en la figura se puede apreciar que para la región I (R1), el controlador debiese buscar que la variable controlada se acerque a la referencia, prestando atención a no sobrepasar el valor deseado de forma excesiva. Un operador humano realizaría esto modificando la variable manipulada de tal forma que, dada una condición inicial, la variable manipulada vaya disminuyendo su magnitud a medida que se acerca a la referencia. Considerando las variables de entrada del controlador difuso, se puede ver en la Tabla 2.3 que la región I corresponde a tener un error positivo y una variación del error negativa lo que corresponde, tomando como ejes de referencia los conjuntos difusos “Cero” de cada variable de entrada, al cuadrante inferior izquierdo del mapa de reglas del controlador, en donde se ve que las reglas precisamente buscan, dependiendo de la magnitud del error y la variación del error, es decir, dependiendo de lo lejos o cerca que se encuentre el valor actual de la variable controlada de la referencia y cuán rápido se está acercando la variable controlada al valor deseado;

incrementar negativamente el valor de la variable manipulada a fin de acercarse suavemente al valor deseado para la variable controlada.

Región		Error (e)	Variación del error (Δe)
Región I	R1	>0	<0
Región II	R2	<0	<0
Región III	R3	<0	>0
Región IV	R4	>0	>0

Tabla 2.3 Signo del error y la variación del error, asociados a cada región de la respuesta de segundo orden al escalón, utilizado para hacer la derivación de las reglas para el controlador PI difuso del ejemplo.

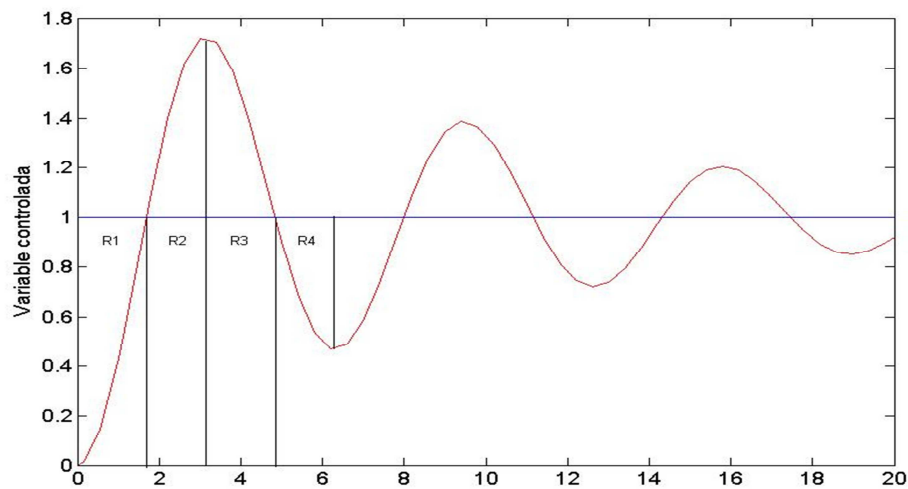


Figura 2.7 Respuesta clásica de un sistema de segundo orden frente a un escalón unitario. En azul se muestra la referencia y en rojo la respuesta del sistema de segundo orden. R1, R2, R3 y R4 son las regiones escogidas para realizar la derivación de las reglas.

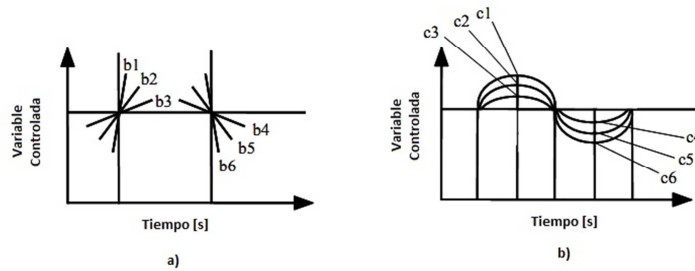


Figura 2.8 Casos especiales considerados para derivar las reglas asociadas al conjunto difuso “Cero” de: a) Error b) Variación del error.

Haciendo el mismo análisis para cada región expuesta en la Figura 2.7, en la Tabla 2.3 se puede ver que grupo de reglas se derivan de cada una de ellas. Las reglas asociadas a los conjuntos difusos “Cero” de cada variable de entrada del controlador corresponde a las situaciones especiales que se producen cuando el valor actual de la variable controlada es igual que la referencia (esto para el error) o cuando no hay variación de la variable controlada (para la variación del error). Gráficamente, de la Figura 2.7 se aprecia que estas situaciones especiales corresponden a los cruces con la referencia y las crestas de las oscilaciones, para el error y la variación del error respectivamente; donde la variación de la variable manipulada dependerá de la magnitud que tome el error, en caso que la variación del error sea nula, o la variación del error, para el caso donde el error es cero. En la Figura 2.8 se ilustra precisamente este efecto.

Δu		Δe						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
e	NG	R2	R2	R2	C1	R3	R3	R3
	NM	R2	R2	R2	C2	R3	R3	R3
	NP	R2	R2	R2	C3	R3	R3	R3
	CE	B1	B2	B3	CE	B4	B5	B6
	PP	R1	R1	R1	C4	R4	R4	R4
	PM	R1	R1	R1	C5	R4	R4	R4
	PG	R1	R1	R1	C6	R4	R4	R4

Tabla 2.4 Mapa de reglas difusas donde se indican las reglas derivadas para el controlador difuso PI a partir de la respuesta al escalón de un sistema de segundo orden. R1, R2, R3 y R4 corresponden a las regiones indicadas en la Figura 2.7. B_i y C_i, con i={1:6}, corresponden a los casos expuestos en la Figura 2.8.

El mapa de reglas difuso expuesto en la Tabla 2.2 corresponde a la estructura clásica de las reglas de un controlador difuso con entradas asociadas al error [13], [16], [21], [28]. En la mayoría de los controladores difusos este mapa de reglas es representativo de las acciones de control que llevaría a cabo un operador de manera intuitiva por lo que esta estructura de mapa de reglas, con algunas variaciones, es uno de los más utilizados en los esquemas de control difuso.

La estructura mostrada en la Tabla 2.2 es extensible a variables lingüísticas con un mayor o menor número de conjuntos difusos asociados a cada variable.

La elección de las reglas que conformaran la base de conocimientos incide, además del comportamiento que tendrá el controlador diseñado, en la estabilidad controlador. Debido a la complejidad de los sistemas lineales que usualmente controlan los controladores difusos, el verificar la estabilidad del controlador diseñado según la teoría de estabilidad de Lyapunov no es sencillo, por lo que en la mayoría de las aplicaciones la estabilidad estudia mediante analizar la trayectoria de activación de reglas en el mapa de reglas difusas o a través de ensayo y error. En el caso del análisis de la trayectoria de las reglas activadas en el mapa de reglas difusas, si el controlador es estable la trayectoria debiera converger al centro del mapa [56], [57].

Cualquier conjunto de reglas escogido para llevar a cabo las acciones de control requeridas, es necesario que sea estable. En el caso particular de la estructura de reglas expuestas en el mapa de reglas difusas de la Tabla 2.2, se puede apreciar que para todas las reglas definidas la trayectoria de activación de las reglas converge al centro. Si dentro del conjunto de reglas se detecta alguna que contribuya a la inestabilidad del sistema de control, debe ser removida o modificada, especialmente cuando las plantas que se están controlando son de naturaleza inestable.

Una vez especificadas las entradas y la base de conocimiento del controlador difuso, para que el controlador pueda interactuar con otros dispositivos físicos, como los actuadores, es necesario transformar el conjunto de salida en un valor numérico que sea procesable por el actuador. Esta transformación, como ya se explicó en la sección previa, la realiza la interfaz de defusificación.

En los controladores difusos, y en general en los sistemas basados en lógica difusa, se utilizan distintos métodos para defusificar el conjunto difuso de salida que retorna el motor de inferencia de la base de conocimientos. Entre los más destacados se encuentran el método del centro de gravedad, del máximo y media de los máximos [47], [58], [59].

El método del centro de gravedad es uno de los más utilizados en las aplicaciones de control y determina el valor de la salida defusificada de la siguiente manera:

Sea $x \in X = [x_1 x_2]$ variable lingüística definida sobre el recorrido universal X
 $\mu(x)$ función de pertenencia asociada al conjunto difuso de salida

$$x_{salida} = \frac{\int_{x_1}^{x_2} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{x_1}^{x_2} \mu(x) dx}$$

En la Figura 2.9 se ilustra el proceso de fusificación, inferencia y defusificación descrito previamente y que permite llevar a cabo las acciones de control, en este caso para dos reglas gatilladas de un controlador difuso que utiliza el modelo de inferencia de Mamdani y el centro de gravedad como método de defusificación.

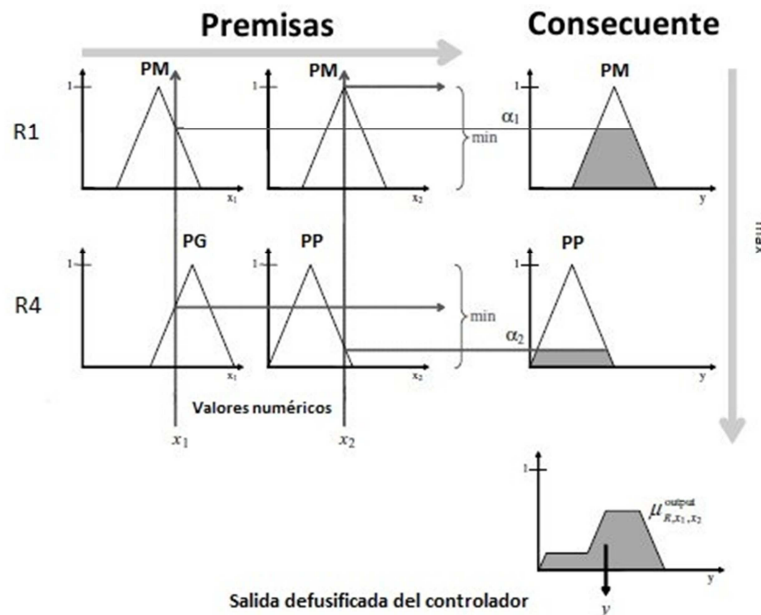


Figura 2.9 Proceso de fusificación, inferencia y defusificación de un controlador difuso de dos entradas y una salida al gatillarse dos reglas. El modelo de inferencia del controlador difuso es Mamdani y el método de defusificación es el centro de gravedad.

En los párrafos previos se han descrito los componentes principales de un controlador difuso al igual que sus principios de diseño. Junto con ello, se ha realizado una revisión general de la lógica difusa y sus elementos básicos que la constituyen, lo cual en conjunto brinda el sustento teórico para el desarrollo de los controladores difusos de velocidad y dirección que se lleva a cabo en esta Memoria de Título.

3. Diseño de controladores difusos para velocidad y dirección de un AGV

El diseño de controladores, en general, involucra el delinear y determinar cada uno de los componentes que permitirán llevar a cabo las acciones de control apropiadas para el sistema que se busca controlar. En el caso de los controladores clásicos, el diseño contempla dos pasos básicos que son el construir un modelo adecuado para el sistema que se busca controlar y luego, una vez determinado el modelo, diseñar el controlador mediante métodos analíticos que se basan en éste. Una vez definido el modelo y la estrategia de control a utilizar, las ecuaciones asociadas a la estrategia de control escogida permiten determinar la estructura y ganancias del controlador de manera directa.

El caso de los controladores difusos es totalmente distinto. A diferencia de los controladores clásicos, que son basados en modelos, los controladores difusos son basados en reglas. En este caso el controlador es diseñado directamente, sin la necesidad de tener un modelo de base. Sin embargo, esto no quiere decir que se desconozca completamente el sistema que se busca controlar, al contrario, es necesario poseer algún grado de conocimiento y entendimiento de la planta y su funcionamiento, para lo cual es posible apoyarse en expertos que provean dicho conocimiento.

El diseño de controladores difuso involucra el tomar una cantidad de decisiones de diseño mucho mayor que el caso de los controladores clásicos. Y, aunque hay una estructura común definida y una secuencia lógica del orden en que se debe diseñar y definir los elementos constituyentes del controlador, no existen métodos algorítmicos que permitan determinar completamente los parámetros del controlador como en el caso de los controladores tradicionales. Qué entradas y salidas utilizar, el número de conjuntos difusos asociados a dichas variables y las funciones de pertenencia de cada conjunto, los factores de escalamientos aplicados a las entradas y salidas, el número de reglas, la estructura de cada una de ellas, el modelo de inferencia y el método de defusificación son todas variables de diseño que el diseñador del controlador debe determinar guiado por la intuición y, por sobre todo, por el conocimiento que disponga del sistema o por aquella información que le puedan aportar personas expertas en tema.

En esta sección se presenta el diseño de los controladores difusos de velocidad y dirección, mostrándose como fueron determinados cada uno de los parámetros y estructuras que los componen.

3.1 Diseño controlador difuso de velocidad

3.1.1 Selección de variables de entrada y salida del controlador difuso de velocidad

La selección de las variables de entrada y salida del controlador es un aspecto crucial en el diseño de un sistema de control, ya que gran parte de las características del controlador dependerán de cuales con las variables involucradas.

Las entradas están siempre relacionadas con la variable que se desea controlar, en este caso con la velocidad del vehículo. Por otra parte, la salida del controlador se asocia siempre a la variable manipulada del sistema o al argumento de la función que permite obtener dicha variable. En el caso de un vehículo, idealmente desde el punto de vista de modelación del sistema la variable manipulada debiera ser el torque del motor o la aceleración, pero en la práctica estas variables no se pueden manipular directamente por lo que la variable manipulada para modificar la velocidad del vehículo debe ser la apertura de los pedales de aceleración y freno, que son los que efectivamente los actuadores con lo que un conductor puede interactuar.

Dada la relación intrínseca que hay entre las entradas del controlador y la velocidad del móvil, para poder tomar las acciones de control adecuadas el controlador debe conocer el estado actual de la variable controlada del sistema o algún indicador que proporcione información acerca de ella. Dada una referencia de velocidad que se desea que el vehículo alcance o siga, un indicador natural del estado de la variable controlada es el error de velocidad el cual se define, para esta aplicación en particular, de la siguiente manera:

$$v_e = v_{ref} - v_{real} \quad (3.1)$$

Donde v_e es el error de velocidad, v_{ref} es la referencia de velocidad del sistema y v_{real} es la velocidad actual del vehículo. De esta manera el error de velocidad da cuenta de cual es la diferencia entre la referencia de velocidad deseada y la velocidad que lleva el vehículo en un

instante dado. Como se expone en la Tabla 2.1 la utilización del error como variable de entrada del controlador difuso es una estructura clásica y corresponde a un controlador difuso de tipo proporcional.

La selección del error de velocidad como entrada del controlador permite llevar a cabo un control en función de cuan cerca o lejos se encuentra la variable controlada de la referencia deseada. Aunque es posible establecer una estrategia de control basada en el error de velocidad que permita llevar a la velocidad del vehículo a las vecindades de la referencia, el uso exclusivo de esta variable presenta dos problemas que impiden el llevar cabo un control preciso de la velocidad en un vehículo de escala real. El primero es que utilizando solamente el error de velocidad como variable de entrada no es posible obtener un error de régimen permanente nulo, ya que este esquema es equivalente a un controlador clásico tipo P; lo que implica que siempre habrá un error presente en la variable controlada que pudiera llegar a ser significativo dependiendo de otros factores de diseño que se analizarán posteriormente. Y en segundo lugar, y más relevante aún, este tipo de control es poco robusto ante perturbaciones y cambios de punto de operación, lo cual es poco deseable especialmente teniendo en cuenta la gran cantidad de perturbaciones que afectan a un vehículo terrestre en ambientes no simulados.

Lo anterior muestra la necesidad de incorporar una variable de entrada adicional que contribuya a tener un error permanente nulo y robustezca el sistema de control. La variable de entrada elegida como segunda entrada del controlador difuso es la integral del error de velocidad definida de la siguiente forma:

$$v_{ei} = \int_{t_0}^{t_f} v_e dt = \int_{t_0}^{t_f} (v_{ref} - v_{real}) dt \quad (3.2)$$

La elección de la integral del error de velocidad como segunda variable de entrada del controlador de velocidad no es arbitraria. Determinando en cierta medida la variable manipulada de salida del controlador, se puede apreciar de la Tabla 2.1 que la elección del error de velocidad y la integral del error de velocidad corresponden a la estructura de un controlador difuso tipo PI. Al igual que los controladores PI clásicos, los controladores PI difusos poseen, además de todas las características y ventajas propias de los controladores difusos que se describieron en el Capítulo 2, la particularidad que permiten obtener un error permanente nulo y son más robustos frente a perturbaciones, producto de la parte integral que contribuye a la estabilidad del controlador y el sistema. Tal como se ha destacado anteriormente la precisión del controlador y el

correcto seguimiento de las referencias de velocidad es fundamental para el buen funcionamiento del sistema, contribuyendo precisamente la elección de la integral de velocidad como variable de entrada del controlador a cumplir ese objetivo. De igual forma debido a que un vehículo terrestre está sometido a una gran cantidad de perturbaciones que afectan directamente a la variable controlada, el contar con la acción integral resulta significativo para disminuir el impacto de las perturbaciones y los cambios de punto de operación a los que el vehículo se verá sometido realizando un control de velocidad adecuado. Los aspectos mencionados justifican, por tanto, la incorporación de la integral del error de velocidad como variable adicional de entrada al controlador difuso.

Además de los beneficios indicados en el párrafo previo, la elección de la integral del error de velocidad presenta otras ventajas que evidencian lo apropiado de la elección de esta variable como entrada del controlador difuso longitudinal. Físicamente, se puede ver en (3.2) que la integral del error de velocidad representa la distancia relativa entre un móvil virtual que se desplaza a la velocidad de referencia y el vehículo que se mueve a la velocidad que miden los sensores y que es la variable que se busca controlar. En general, resulta natural e intuitivo el hablar en términos de velocidad y distancia cuando se está analizando un móvil que se desplaza, no así, en cambio, al hablar de la aceleración que aunque es una magnitud vectorial conocida y bien definida desde el punto de vista de la física, no resulta familiar hablar en términos de esta variable; que en este caso correspondería a la variación del error de velocidad en el tiempo. Por ello, al momento de definir el factor de escalamiento, los conjuntos difusos y reglas, resulta muy conveniente y apropiada la elección de la integral del error de velocidad como entrada del controlador difuso ya que debido a lo familiar e intuitiva que resulta ser la variable “distancia” se simplifica el proceso de definición de dichos componentes del controlador difuso.

Por otra parte, la incorporación de la integral del error de velocidad como entrada del controlador, presenta otra ventaja que, aunque no es explorada ni aplicada en este trabajo, forma parte del trabajo futuro que se puede llevar a cabo en el controlador difuso cuyo diseño se está exponiendo. En ambientes reales no es importante solo monitorear la velocidad a la que va el vehículo sino también la distancia relativa a la que se va respecto a los otros vehículos que están circulando junto a él, particularmente los que van delante y atrás de él. Teniendo los sensores adecuados que midan la distancia relativa entre los vehículos, es posible llevar a cabo un control difuso de velocidad y distancia sobre el vehículo sin realizar grandes cambios a la estructura y

diseño del controlador que se propone en este capítulo. En ese caso la variable integral del error de velocidad, se reemplazaría por la distancia relativa medida en los sensores, con lo cual el controlador tendría dos entradas independientes, una proveniente de los sensores de velocidad del vehículo y otra proveniente de los sensores de distancia. Si el controlador fue bien diseñado, en caso de realizar esta mejora no se requeriría cambiar en nada la estructura del controlador, ni en sus componentes, debiéndose ajustar solamente las reglas de la base de conocimiento a fin de ajustarse a los nuevos requisitos que implica el supervisar la distancia relativa.

Sin embargo, es importante notar que la integral del error de velocidad debiera seguir midiéndose incluso en esta aplicación, ya que en caso de que no haya ningún vehículo en los alrededores del vehículo al que se le está controlando la velocidad y distancia, se debiera realizar solamente un control de velocidad sobre el vehículo, el cual requiere el uso de la integral del error de velocidad como entrada.

En el caso de la velocidad del vehículo, esta se puede modificar mediante presionar el acelerador o el pedal de freno. Estos pedales son independientes por lo que el controlador debiera poseer dos salidas para indicar el accionamiento de cada uno de los pedales. Técnicamente esto es factible, pero implica un aumento en la complejidad del controlador ya que por cada regla que se defina para el acelerador debiera definirse una regla análoga para el freno y viceversa. Por lo tanto, en este caso se define una única variable de salida cuyo signo indicará si se acciona el acelerador o el freno, lo que simplifica el problema desde el punto de vista de la base de conocimientos del controlador difuso.

La variable manipulada corresponderá entonces al porcentaje de apertura del pedal y el signo indicará a que pedal se está haciendo referencia. Esto implica, obviamente, que no se pueden presionar simultáneamente ambos pedales, lo cual es coherente con lo que haría un conductor humano. La razón por la que se eligió el porcentaje de apertura del pedal como variable de salida, se debe principalmente a que los controladores de los actuadores del vehículo reciben como referencia dicha magnitud. Pese a esto se podría haber diseñado el controlador utilizando otra variable lingüística para la variable manipulada, pero es mucho más intuitivo hablar de porcentaje de apertura del pedal, donde 100% sería el pedal totalmente presionado y 0% el pedal sin presionar, que hablar de ángulo del pedal o fuerza aplicada sobre el mismo. Esta elección intuitiva de la variable lingüística asociada a la variable manipulada, simplifica bastante

la definición del recorrido universal, los conjuntos difusos y factores de escalamiento de la variable de salida, razón que justifica plenamente su selección.

El hecho de que la variable de salida del controlador sea directamente el porcentaje de apertura de los pedales y no su variación u otra opción se basa en dos motivos. El primer motivo es el la selección de las variables de entradas del controlador realizada. Este motivo es el que más impacta en la elección de la variable de salida del controlador. Como se puede visualizar en la Tabla 2.1 la elección de las variables de entrada error de velocidad e integral del error de velocidad conlleva que la salida del controlador sea en este caso el porcentaje de apertura de los pedales a fin de coincidir con una de las estructuras conocidas para los controladores difusos, particularmente con la de un controlador tipo PI. De haber elegido otra variable se habría generado una estructura con variables que no tienen ningún sentido físico, y más relevante, de las que no se dispone ningún tipo de conocimiento. En segundo lugar, particularmente en el caso de elegir la variación de la apertura de los pedales, esto hubiera implicado necesariamente considerar una salida del controlador asociada a la apertura del acelerador y otra salida a la apertura del freno, ya que no se podría usar el signo para diferenciar los actuadores. Como se explicó previamente, aunque es factible utilizar esta configuración de variables de salida, aumenta la complejidad del controlador. Un controlador más complejo no es conveniente más aún si se dispone de una alternativa más simple y de buen desempeño como la que se propone en este diseño.

3.1.2 Definición de los conjuntos difusos asociados al controlador de velocidad

La elección de los conjuntos difusos que estarán asociados a cada variable lingüística es una parte esencial del proceso de diseño de los controladores difusos y repercute de forma sobresaliente en el desempeño del controlador diseñado. Aunque se trata de parámetros de diseño, la elección del número de conjuntos difusos, las funciones de pertenencia que describen a cada conjunto así como el intervalo en que son no nulas dichas funciones no es del todo arbitraria; ya que la selección debe ser acorde al comportamiento del sistema controlador en situaciones no simuladas para permitir supervisar la planta de manera adecuada. Por ello, el proceso de escoger estos parámetros involucra recopilar información de expertos que conozcan a fondo el comportamiento del sistema a controlar, trabajos previos que aborden problemáticas de

control similares de manera exitosa y mediante ensayo y error. En el diseño del controlador difuso de velocidad que se expone en este trabajo de título se utilizan estas tres fuentes de información.

En el caso del controlador difuso longitudinal se tienen tres variables lingüísticas: dos corresponden a las entradas del controlador y la otra a la salida. A cada una de ellas es necesario asignarle sus respectivos conjuntos difusos. El número de conjuntos difusos influye notablemente en la precisión y el tiempo de subida del controlador, y es a la vez directamente proporcional a la complejidad del mismo. En general en aplicaciones de control, como se expuso en el Capítulo 2, el número de conjuntos difusos oscila entre 3 y 7 conjuntos para cada variable lingüística. Buscando un equilibrio entre precisión y complejidad, y a la vez basándose en trabajos publicados que abordan esta problemática [16], [21], [22]; se determinó en una primera iteración que el número de conjuntos difusos asociados a cada variable sería 5, cuyos valores lingüísticos son los siguientes para todas las variables:

{Negativo grande, Negativo medio, Cero, Positivo Medio, Positivo Grande}

Abreviados de la siguiente forma:

{NG, NM, CE, PM, PG}

Cada conjunto difuso tiene una función de pertenencia asociada, las que en este caso se define que son funciones con forma triangular, pudiendo ser con forma trapezoidal en el caso de los conjuntos difusos extremos, es decir, NG o PG. La elección de este parámetro diseño se basa en las características que tienen estas funciones, ya que al tratarse de funciones lineales son sencillas de programar y son fácilmente optimizables. Además los parámetros de la función pueden fijarse de manera simple haciendo una asociación directa entre los valores del recorrido universal que maneja el diseñador, intuitivos o provistos por expertos, y los límites de la función. Esto permite a su vez que el ajuste y reajuste de parámetros pueda realizarse de forma rápida y con relativa sencillez. Aunque los argumentos presentados avalan la selección de la función de pertenencia triangular, o trapezoidal, para fusificar las variables lingüísticas; es importante notar que una cantidad significativa de trabajos [15]-[23] dan prueba que el uso de estas funciones de pertenencia es una elección adecuada para el problema de control que busca solucionar el diseño que se propone en este trabajo de título.

Si bien todas las variables lingüísticas comparten el número de conjuntos difusos junto con los valores lingüísticos y las funciones de pertenencia asociados a cada conjunto, la definición del recorrido universal, ancho de cada conjunto difuso y traslape entre ellos son parámetros que deben definirse de forma independiente para cada variable lingüística.

En el caso del error de velocidad, que corresponde a la primera entrada del controlador, resulta complicado definir claramente lo que es un error de velocidad “grande” o un error de velocidad “pequeño” ya que la apreciación de un conductor humano respecto a cuál sería el conjunto difuso al que pertenecerían los valores del error de velocidad medido, se ve influida notablemente por la velocidad actual a la que se esté desplazando el vehículo. Por ejemplo, un error de velocidad de 5 [km/h], pudiera considerarse grande si el vehículo se está desplazando a 10 [km/h], pero podría ser despreciable o pequeño si el mismo móvil se desplaza a 100 [km/h]. El integrar completamente ambos enfoques en la definición de los diferentes conjuntos difusos resulta bastante difícil, por lo que en el controlador que se está diseñando se prioriza el conocimiento y percepción que se dispone para velocidades de desplazamiento del vehículo superiores a los 20 [km/h] y a partir de esa información se construirán los conjuntos difusos asociados al error de velocidad. Es importante notar que las definiciones que se hagan de los conjuntos difusos para el error de velocidad son válidas también para velocidades inferiores a los 20 [km/h], pero pudieran provocar acciones de control desproporcionadas o no óptimas desde el punto de vista de eficiencia energética y suavidad en la conducción; efectos que deberán ser mitigados al definir los conjuntos difusos para la variable de salida del controlador o mediante incorporar mecanismos de ajuste de la intensidad de la variable manipulada como programación de ganancias o limitación de la salida.

Para definir correctamente el recorrido universal que tendrá el error de velocidad¹ es necesario establecer una cota superior para dicha variable lingüística, ya que de otra forma los límites de los conjuntos difusos extremos, vistos como módulos, tenderían a infinito, lo que dificultaría la posterior normalización del recorrido universal. Una manera de limitar el recorrido universal es analizando cuál sería el mínimo error de velocidad que podría considerarse que

¹ De aquí en adelante cuando se hable del valor que toma una variable lingüística siempre se hablará de ella haciendo alusión a su módulo, a menos que se explicita lo contrario. Por lo tanto cuando se habla de cota superior para la variable, se entiende que existe una cota superior en el caso de los valores positivos del recorrido universal y una inferior en el caso de los negativos. De igual manera, si se dice que un valor pertenece al conjunto difuso “Grande” con un determinado grado de pertenencia, esto implica que puede pertenecer al conjunto difuso “Negativo grande” o “Positivo grande” dependiendo del signo tenga el valor que toma la variable.

pertenece plenamente, grado de pertenencia 1, al conjunto difuso grande. Con esto se define una cota superior para el recorrido universal con lo que se establece que cualquier error de velocidad que supere a la cota propuesta se satura al valor de la cota. Esto es válido, y práctico a la vez, ya que dado que la cota elegida tiene grado de pertenencia 1 en el conjunto difuso grande, cualquier valor superior al de la cota también tendrá el mismo grado de pertenencia al conjunto difuso grande, por lo que su tratamiento al momento de la fusificación es equivalente a la forma en que se fusificaría un valor igual a la cota. Esto último implica que cualquier valor que tome el error de velocidad superior a la cota establecida será saturado.

Definido el recorrido universal, de forma genérica, el ancho de cada conjunto difuso se establece que será igual para todos los conjuntos difusos asociados al error de velocidad. Esta decisión se justifica en la relación intuitiva que realiza un conductor humano entre los errores de velocidad, relación extraída desde el conocimiento que se tiene de la velocidad, donde si un error de velocidad es, por ejemplo, “bastante grande” (grado de pertenencia 0.8 al conjunto difuso “grande”) la asociación inmediata que se hace es que es “poco mediano” (grado de pertenencia 0.2 al conjunto difuso “medio”). La forma de reflejar esta percepción, que en la práctica funciona de manera correcta, de manera formal es definiendo que el ancho de cada conjunto difuso sea igual para todos los conjuntos, de tal forma que si un valor tiene un grado de pertenencia k a un determinado conjunto difuso, tenga un grado de pertenencia $(1-k)$ al conjunto difuso contiguo. De esta forma considerando que se ha definido 5 conjuntos difusos asociados a la variable lingüística error de velocidad y considerando una cota superior a para el recorrido universal, de forma genérica se ve que los conjuntos difusos para el error de velocidad quedan definidos como se expone en la Figura 3.1.

Para la realización del diseño preliminar se entrevistaron un total de 10 conductores con más de 5 años de experiencia, cuya información provista junto con la información publicadas en trabajos que trataban diseño de controladores difusos [16],[21],[22], se definió que la cota superior, tomaría un valor de 20 [km/h]. Esta elección corresponde a una ponderación realizada por el diseñador, ya que en el caso de la información recogida de los expertos, además de variar la respuesta entre ellos, esta dependía fuertemente del rango de velocidad en que fuera a operar el vehículo. Con esta elección los conjuntos difusos asociados al error de velocidad quedaron definidos como se expone en la Figura 3.2.

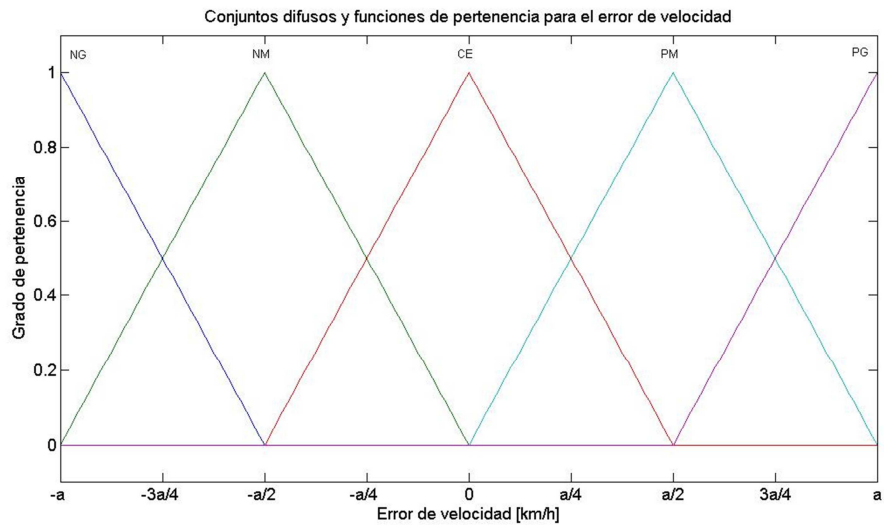


Figura 3.1 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada del controlador Error de velocidad. Se muestran los conjuntos difusos utilizando una cota genérica a para limitar el recorrido universal.

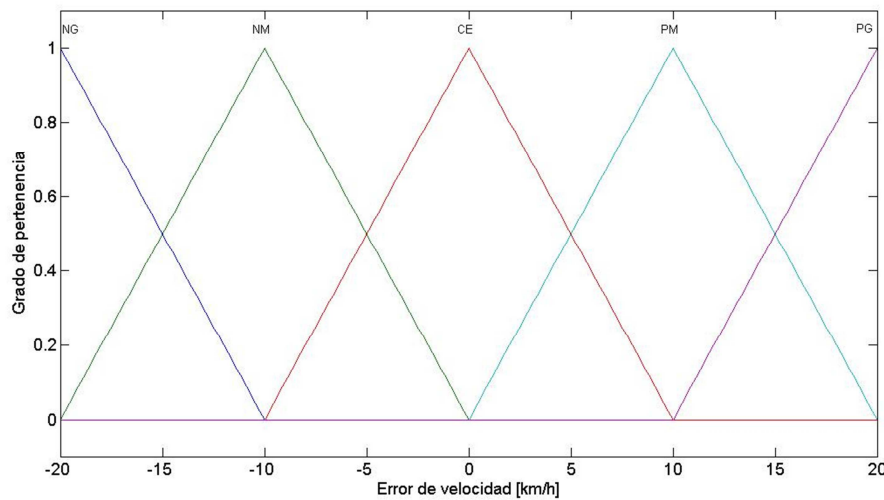


Figura 3.2 Diseño preliminar de los conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada del controlador Error de velocidad reemplazando el valor de la cota del recorrido universal por el valor de diseño $a = 20$ [km/h].

Para la segunda variable de entrada del controlador difuso, la integral del error de velocidad, la selección del recorrido universal y la definición de los conjuntos difusos presenta las mismas dificultades que en el caso del error de velocidad. Asociando la integral del error de velocidad con la distancia relativa, la definición de una distancia “grande” o una distancia “pequeña” para un conductor humano presenta el mismo problema que para error de velocidad: esta definición depende de la velocidad actual del vehículo. Sin embargo, de forma particular para el controlador difuso que se está diseñando, dado que no se lleva a cabo un control de distancia y que la integral del error de velocidad se asemeja a una distancia relativa con un

vehículo virtual, la dependencia con la velocidad de la integral del error de velocidad no es demasiado relevante para definir el recorrido universal y los conjuntos difusos. Por ello existe consenso en que las sugerencias provistas por las normas del tránsito son un buen referente para definir los conjuntos difusos y el recorrido universal de esta variable.

De manera análoga a lo expuesto para el error de velocidad en el caso de la integral del error de velocidad también es necesario acotar el recorrido universal de esta variable, para poder definir y trabajar correctamente con los conjuntos difusos. La selección de una cota superior para la integral del error de velocidad involucra que cualquier valor superior a la cota seleccionada será saturado y su efecto será equivalente al provocado por la cota elegida. La saturación de la integral del error de velocidad para definir el recorrido universal de esta variable genera un problema adicional, ya que la saturación de la salida del integrador puede provocar que se produzca *wind-up*. Este fenómeno sucede cuando la salida del integrador toma valores por sobre la cota que satura la variable de entrada del controlador en este caso. Como el valor actual de la salida del integrador es superior a la cota, cuando dicho valor comience a descender, el valor que tomará la entrada del controlador seguirá saturado hasta que la salida actual del integrador alcance un valor inferior a la cota definida para saturar la variable. El tiempo que puede demorar dejar la saturación puede ser bastante largo, por lo que se producen efectos no deseables en la salida del controlador como oscilaciones y sobrepasos excesivos. Para evitar esta situación, al igual como se hace en los controladores clásicos, además de definir la saturación de la integral del error de velocidad para delimitar el recorrido universal se deberá incorporar al diseño un esquema *anti wind-up* para evitar los efectos negativos de saturar esta variable.

Existen diferentes formas de realizar un diseño *anti wind-up* [60], pero en este trabajo se incorporará al diseño el esquema que se ilustra en la Figura 4.3 y que matemáticamente está representado por las siguientes ecuaciones discretas:

$$v_{ei}(k) = \begin{cases} v_e(k-1) \cdot \Delta T - K & \text{si } v_{ei}(k-1) \leq -K \\ v_{ei}(k-1) + v_e(k-1) \cdot \Delta T & \text{si } -K < v_{ei}(k-1) < K \\ v_e(k-1) \cdot \Delta T + K & \text{si } v_{ei}(k-1) \geq K \end{cases} \quad (3.3)$$

Donde v_{ei} es la integral del error de velocidad, v_e es el error de velocidad, ΔT intervalo entre muestras y K es la cota escogida para saturar la integral del error de velocidad. Con esta implementación se puede utilizar correctamente la variable integral del error de velocidad saturada como entrada del controlador difuso.

Considerando que la variable integral del error de velocidad se puede asociar a la distancia relativa entre un móvil virtual y el vehículo al que se le está monitoreando la velocidad, de manera similar a lo expuesto para la variable error de velocidad, desde la perspectiva de un conductor humano resulta lógico que si la integral del error de velocidad tiene un grado de pertenencia k al conjunto difuso “grande”, tenga un grado de pertenencia $1-k$ al conjunto difuso medio y un grado de pertenencia nulo al conjunto difuso “cero”. A fin de integrar esa perspectiva intuitiva se definen todos los conjuntos difusos de igual ancho, por lo que si se considera un cota superior b de forma genérica los conjuntos difusos asociados a la integral del error de velocidad se especifican como se expone en la Figura 3.3.

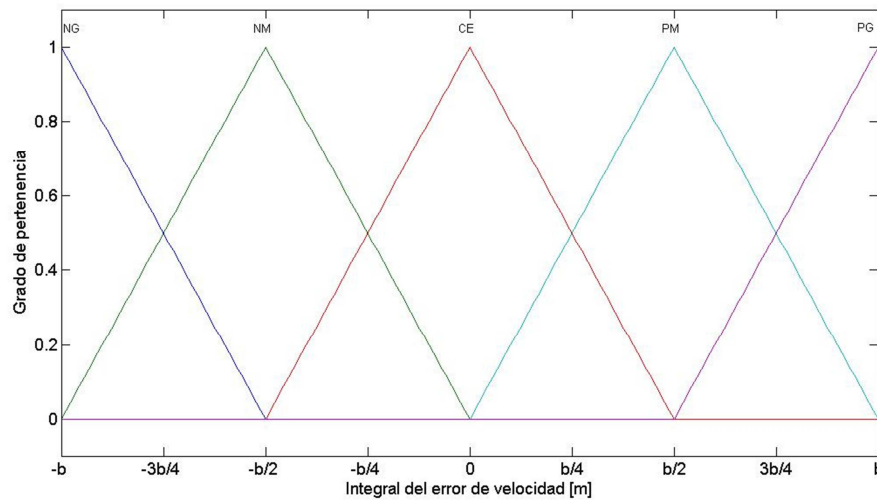


Figura 3.3 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Integral del error de velocidad. Se muestran los conjuntos difusos utilizando una cota genérica b para limitar el recorrido universal.

En el diseño preliminar, la definición de la cota superior de la integral del error de velocidad se basó en las sugerencias de distancia de seguridad que proveen los organismo de control de tránsito y en trabajos publicados que consideran la integral del error de velocidad como entrada del controlador difuso. La distancia de seguridad es una medida que depende notablemente de la velocidad y oscila entre 20 - 120 [m] para las velocidades usuales a las cuales circulan los vehículos en ambientes urbanos y de carretera. Sin embargo, dado que en este caso no se trata de realizar un control de distancia, sino que solamente de velocidad, se optó por seleccionar como cota superior para la integral de velocidad un valor de 30 [m] que corresponde a la distancia de seguridad para vehículos que circulan a 60 [km/h]. Tomando en cuenta el valor seleccionado para la cota de la integral del error de velocidad los conjuntos difusos asociados a esta variable quedan precisados como se muestra en la Figura 3.4.

A fin de trabajar con valores normalizados en las variables de entrada del controlador los recorridos universales se normalizan dividiéndolos por el valor de la cota seleccionada para cada variable, en este caso $a= 20[\text{km/h}]$ y $b= 30 [\text{m}]$. Por supuesto, al trabajar con los recorridos universales normalizados es necesario normalizar las variables de entrada del controlador, definiéndose los factores de normalización $K_{ve}= 20[\text{km/h}]$ y $K_{vei}= 30 [\text{m}]$; donde K_{ve} es el factor de normalización para el error de velocidad y K_{vei} es el factor de normalización para la integral el error de velocidad respectivamente. Es importante notar que aunque los recorridos universales se normalizan por los valores de las cotas seleccionadas, los factores de normalización aplicados a las variables de entrada propiamente tales no necesariamente deben coincidir con los valores de normalización del recorrido universal, ya que se podrían elegir otros valores para escalar las variable de entrada a fin de atenuar o acrecentar el efecto de alguna de ellas. Sin embargo, en el diseño del controlador difuso de velocidad que se expone en este trabajo a fin de simplificar la interpretación y el análisis de los resultados los factores de normalización elegidos son los mismos que las cotas superiores de los recorridos universales de las respectivas variables de entrada del controlador.

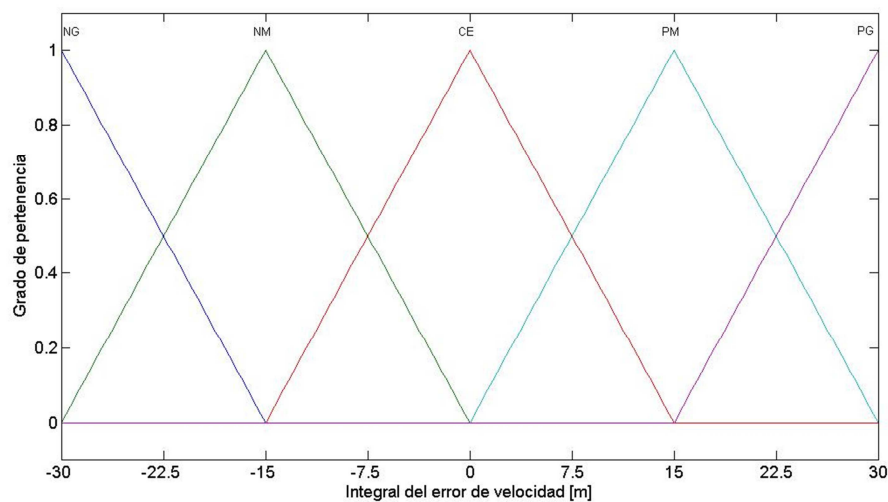


Figura 3.4 Diseño preliminar de los conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Integral del error de velocidad reemplazando el valor de la cota del recorrido universal por el valor de diseño $b = 30 [\text{m}]$.

Para la variable de salida del controlador, que corresponde al porcentaje de apertura de los pedales, la definición de los conjuntos difusos es un poco más delicada que en el caso de las variables de entrada del controlador, principalmente por dos motivos: (i) se utiliza una única variable de salida para manipular tanto el acelerador como el freno y (ii) la definición de los

conjuntos difusos debe ser tal que al ser defusificados se asegure que la salida defusificada barra todo el rango de valores requeridos para la correcta manipulación de los actuadores. El primer punto es uno de los requiere especial atención, ya que como se especificó en el Sección 3.1, la utilización de una sola variable para manipular dos pedales independientes involucra utilizar el signo de la variable de salida para determinar cuál de los pedales llevará a cabo las acciones de control. En la práctica, un conductor humano cuando desea disminuir levemente la velocidad, no presiona el freno sino que deja de presionar el acelerador, o lo presiona en menor medida. El freno se utiliza solo para situaciones de emergencia o aquellas que requieren una desaceleración significativa (generalmente provocada por una situación no planificada). Dado lo anterior, es patente que el diseño de los conjuntos difusos asociados a la salida debiera buscar emular este comportamiento. El uso alternado de acelerador y freno para seguir una referencia es una situación no es deseable, ya que además de provocar desgaste en los actuadores es mucho menos eficiente desde el punto de vista de consumo de combustible. Por ello, el diseño de los conjuntos difusos, en particular el del conjunto difuso “Cero” asociado precisamente a la transición entre freno y acelerador y viceversa, debe ser tal que se minimice la alternación entre acelerador y freno; ocupándose este último solamente cuando se requiera una desaceleración mayor y para disminuciones menores de la velocidad del vehículo se utilice solo el acelerador.

La clave para evitar que el acelerador y el freno se accionen alternadamente radica por lo tanto en cómo se defina el conjunto CE. Este conjunto difuso se asocia a no presionar ningún pedal, es decir, la salida defusificada del conjunto CE asociado a la variable porcentaje de apertura de los pedales implica que ni el acelerador ni el freno se están presionando. Si para el porcentaje de apertura de los pedales se definen todos los conjuntos del mismo ancho, como se diseñaron para las variables de entrada del controlador difuso de velocidad; resulta evidente, teniendo como referencia un mapa de reglas clásico como el que se expone en el Sección 2.2, que se producirá un cambio de signo en la señal de salida del controlador cuando se aproxime a un error de velocidad cero o cuando se desea mantenerse en torno a una referencia de velocidad, lo que se traduce en accionar alternadamente el acelerador y el freno. La solución de diseño que se propone para soslayar este problema es definir el conjunto difuso CE de tal forma que traslape considerablemente a los conjuntos inmediatamente contiguos, es decir NM y PM, tal como se aprecia en la Figura 3.5. El definir el conjunto difuso “Cero” de esta forma elimina de forma significativa el cambio de signo en la señal de salida del controlador, lo que evita a su vez que se produzca una conmutación entre freno y acelerador. Es importante notar que aunque la definición

del conjunto CE contribuye de manera sobresaliente a la disminución del cambio de signo de la señal de salida del controlador, no la elimina completamente, ya que se puede visualizar de la Figura 3.5 que para situaciones más extremas, es decir, a medida que los conjuntos NM o PM tienen más relevancia que CE, es posible que al defusificar se produzca un cambio de signo en torno al centro del conjunto difuso “Cero”. Por lo tanto para evitar completamente que haya conmutación entre freno y acelerador en situaciones en que el control debiera realizarse solamente con el acelerador, es necesario definir una zona muerta en torno al centro del conjunto CE. La definición de la zona muerta junto al diseño propuesto para el conjunto CE, permite evitar completamente la conmutación entre freno y acelerador en las situaciones en que esto no es necesario.

Al igual que en los casos anteriores es necesario definir una cota para el recorrido universal de la variable de salida, a fin de limitarlo a un rango de valores específico. Esta definición tiene directa relación con el segundo aspecto que hacía que la definición de los conjuntos difusos para salida del controlador de velocidad requiriera una atención especial y que hacía referencia a que la defusificación de los conjuntos difusos barrera todo el rango requerido. Para lograr esto, los conjuntos difusos con función de pertenencia con forma triangular, se definen de tal forma que cada conjunto este centrado en el exponente con máxima pertenencia al conjunto. Esta elección asegura que al defusificar el conjunto difuso de salida generado por la base de conocimientos se barra completamente el rango de valores que puede tomar la variable de salida del controlador. Teniendo lo anterior presente en este caso la cota superior elegida no representara el máximo exponente del conjunto difuso grande sino que hará referencia al límite derecho de la función de pertenencia asociada al conjunto difuso grande. Gráficamente se puede ver que, considerando una cota superior c , genéricamente los conjuntos difusos quedan definidos como se exponen en la Figura 3.5.

Dado que la salida del controlador difuso de velocidad es el porcentaje de la apertura de los pedales, es natural que su recorrido universal sea $[-100\%,100\%]$. Sin embargo, se aprecia en la Figura 3.5 que la cota superior c no coincide con el recorrido universal de la variable, sino que más bien es el intervalo $[-2c/3, 2c/3]$ el que debe coincidir con este intervalo. De esto se desprende que hay dos opciones de diseño para lograr el objetivo de tener el recorrido universal adecuado. La primera sería definir la cota superior de tal manera que $2c/3$, con c el valor de la cota superior, coincida con el valor deseado para el recorrido universal, de tal forma que el factor

de normalización del recorrido universal y el factor de denormalización de la variable de salida sea igual a la cota superior elegida.

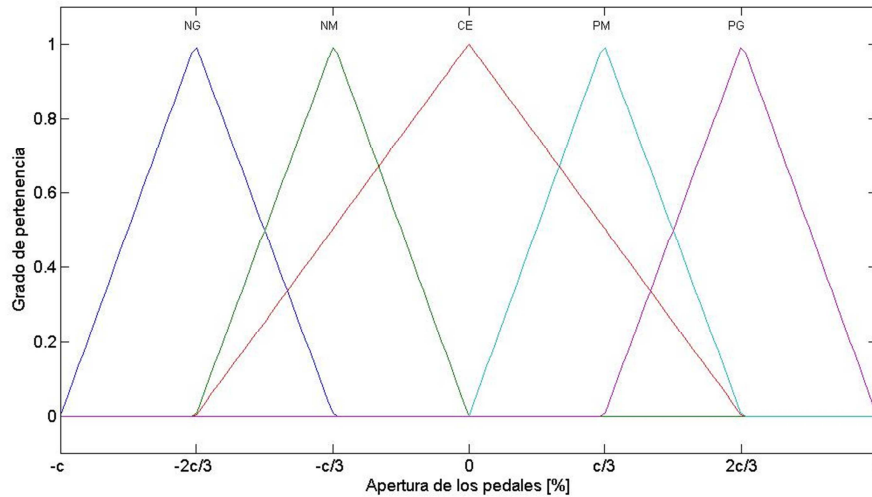


Figura 3.5 Conjuntos difusos asociados a la salida del controlador difuso porcentaje de apertura de los pedales. El intervalo negativo corresponde al freno y el positivo al acelerador. Se utiliza una cota genérica c para limitar el recorrido universal. Se aprecia la asimetría en el ancho de los conjuntos difusos visualizándose el traslape del conjunto “Cero” para evitar la alternancia constante entre acelerador y freno.

La otra opción sería definir la cota superior del recorrido universal de forma arbitraria, debiéndose elegir el factor de denormalización de la salida de tal forma que, en condiciones normales, $2c/3 \cdot K_{acc} = 100\%$ y $-2c/3 \cdot K_{brk} = -100\%$, donde c es la cota superior del recorrido universal, K_{acc} es el factor de denormalización del acelerador y K_{brk} es el factor de denormalización del freno. Se definen dos factores de denormalización ya que, aunque se trata de una sola variable de salida, estos factores pueden ser diferentes en caso que se quisiera por ejemplo, limitar o magnificar la acción de control llevada a cabo por uno de los dos pedales, pero en la práctica ambos factores debieran ser iguales. Para el diseño aquí propuesto, se optará por la segunda opción, estableciéndose una cota arbitraria $c = 100$ para el recorrido universal y se seleccionaran adecuadamente los factores de denormalización, que en este caso serían, en función de la cota definida, $K_{acc} = K_{brk} = 150\%$. Para la zona muerta se define que esta será un 1% del valor de la cota superior del recorrido universal de la variable de salida. En la Figura 3.6 se aprecia cómo quedan definidos los conjuntos difusos al establecer los parámetros de diseño antes mencionados.

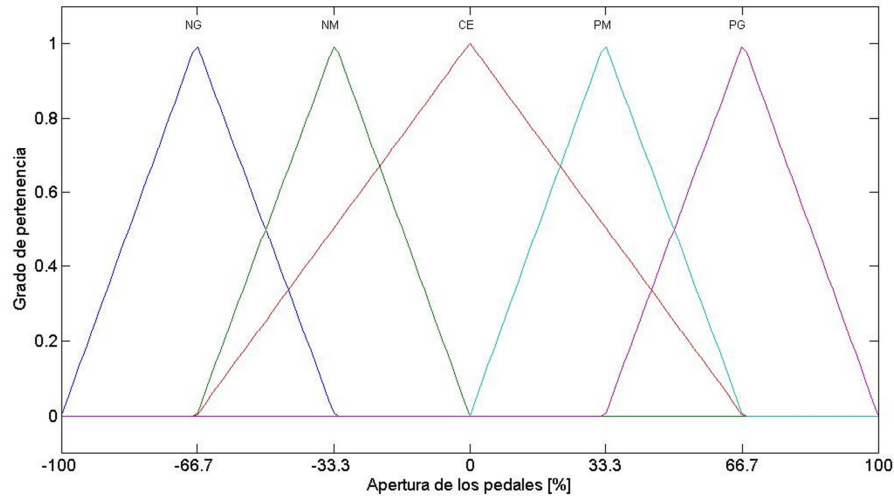


Figura 3.6 Diseño preliminar de los conjuntos difusos asociados a la variable de salida del controlador utilizando como cota del recorrido universal $c = 100$ [%]. Aunque el recorrido universal se acota entre $[-100 \ 100]$ el valor numérico de la salida está comprendido entre $[-66,7 \ 66,7]$.

El diseño preliminar de los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada y salida del controlador difuso de velocidad que se expone en los párrafos previos, se basa íntegramente en la información recogida de conductores expertos, información publicada por fabricantes de vehículos y trabajos publicados que tratan el diseño de controladores. Sin embargo, posteriores pruebas mediante simulación arrojaron que existían problemas en el diseño de los conjuntos difusos definidos para las variables lingüísticas que lo que se traducía en falencias en la estrategia de control para la velocidad del vehículo. Los errores en el control detectados en las pruebas hacen necesario realizar modificaciones al diseño original de los conjuntos difusos que se planteó en una primera instancia a fin de lograr obtener una correcta supervisión de la velocidad del vehículo. Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, al igual que el análisis de dichos resultados en los que se basan las modificaciones que se muestran a continuación, se exponen en detalle en el Capítulo 5.

A partir de los resultados obtenidos mediante las simulaciones y ensayos adicionales se determinó que las mayores mejoras en el desempeño del controlador se producían al mantener fija la estructura de los conjuntos difusos asociados a la variable de salida del controlador de velocidad y modificar los conjuntos difusos relacionados con el error de velocidad y la integral del error de velocidad. Esta decisión basada en los resultados empíricos obtenidos mediante las pruebas realizadas en el simulador, es respaldada por trabajos publicados en los que se muestra la misma conclusión presentada previamente [21]. En el caso del error de velocidad se mantuvo

igual el número de conjuntos difusos y su estructura, pero se modificó la cota que limita el recorrido universal de esta variable. Considerando el conocimiento previo disponible del error de velocidad y mediante ensayo y error se estableció que la nueva cota sería $a = 10$ [km/h]. El factor de normalización para el error de velocidad se fijó en un valor igual a la cota, es decir, $K_{ve} = 10$ [km/h]. En la Figura 3.7 se puede visualizar como quedaron definidos los conjuntos difusos del error de velocidad en el diseño final al aplicar estas modificaciones.

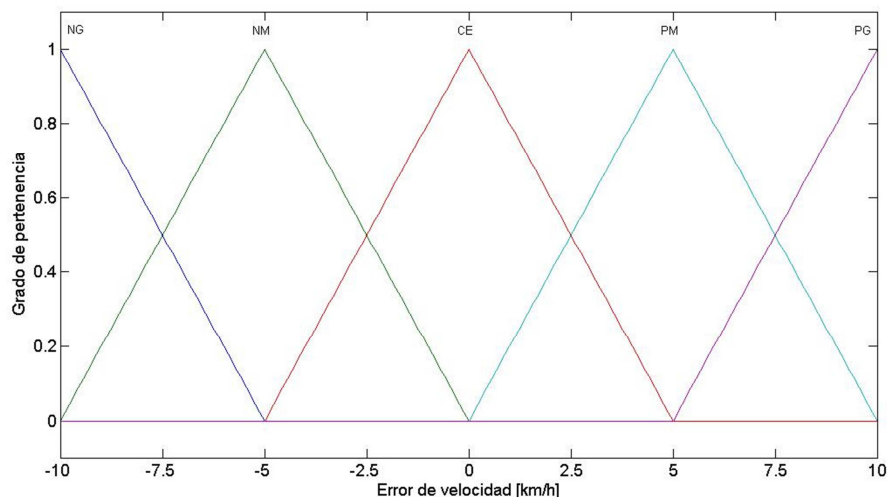


Figura 3.7 Diseño final de los conjuntos difusos asociados a la variable de entrada Error de velocidad. En el diseño final del controlador se utilizó como cota del recorrido universal el valor $a = 10$ [km/h].

Para la segunda variable de entrada, la integral del error de velocidad, se determinó que, a fin de mejorar las transiciones entre los distintos puntos de operación y las oscilaciones del sistema, era necesario modificar el número de conjuntos difusos, pasando de 5 conjuntos a 7. Esto debido que las transiciones entre el conjunto difuso CE y el conjunto difuso PM, lo que ocurre con el conjunto NM es análogo, son demasiado abruptas, lo que se traduce en sobreniveles no deseados y mayor tiempo de convergencia; necesiéndose introducir un conjunto difuso entre el conjunto CE y el conjunto PM para suavizar esta transición, de igual manera debe hacerse entre el conjunto CE y el conjunto NM. Lo anterior implica incorporar 2 nuevos conjuntos difusos “Negativo pequeño” y “Positivo pequeño”, que permiten disminuir el sobrenivel y la oscilación en la variable controlada especialmente en el rango de velocidades inferiores a 50 [km/h]. La incorporación de estos nuevos conjuntos difusos no altera la cota superior definida, $b = 30$ [m] o el factor de normalización, ni tampoco los principios de diseño expuestos en el diseño preliminar, por lo que los conjuntos difusos seguirán definiéndose de forma equiespaciada sobre el recorrido universal. En la Figura 3.8 se pueden visualizar la forma en que quedan

delimitados los conjuntos difusos para la integral del error de velocidad con las modificaciones realizadas.

Las modificaciones antes indicadas configuran el diseño final de los conjuntos difusos asociados a las variables lingüísticas que conforman las variables de entrada y salida del controlador difuso de velocidad. En la Figura 3.9 se ve comparativamente las diferencias entre el diseño original y el diseño final con las modificaciones indicadas en los párrafos previos.

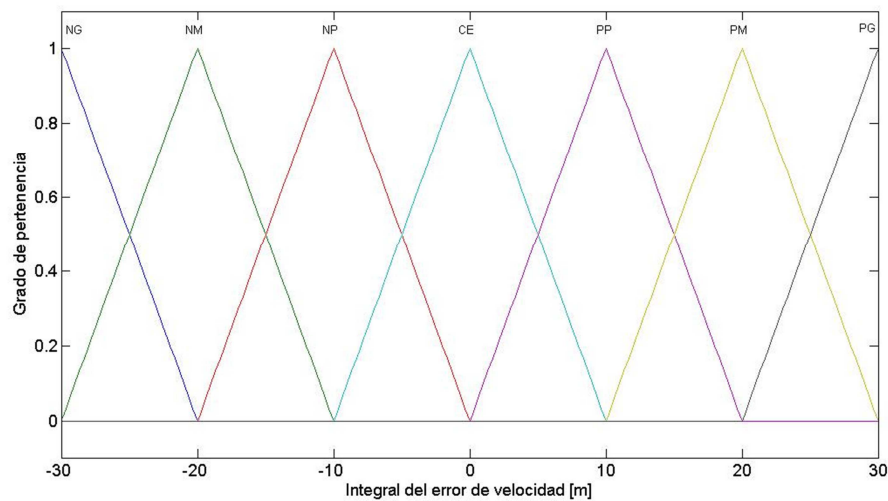


Figura 3.8 Diseño final de los conjuntos difusos asociados a la variable de entrada del controlador Integral del error de velocidad. Se aprecia la incorporación de los conjuntos difusos “Negativo pequeño” y “Positivo pequeño”. Para acotar el recorrido universal se utilizó como cota el valor $b = 30$ [m].

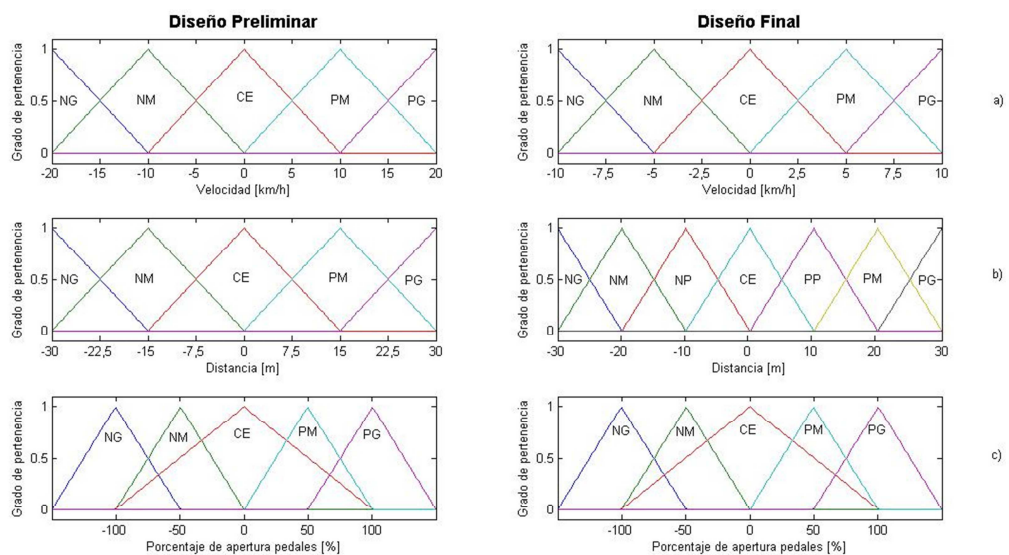


Figura 3.9 Comparación entre el diseño preliminar y el diseño final de los conjuntos difusos asociados a la variable a) Error de velocidad b) Integral del error de velocidad c) Apertura de los pedales.

3.1.3 Definición de la base de conocimientos del controlador de velocidad

La base de conocimientos es la pieza central del controlador difuso donde se lleva a cabo el proceso de inferencia que permite en definitiva determinar cuáles son las acciones de control que llevará el cabo el control en función de las entradas del controlador y la base de reglas. Como se mostró en el Capítulo 2, la base de conocimientos está conformada por un motor de inferencia y por una base de reglas, donde ambas corresponden a parámetros de diseño.

En el caso del diseño del controlador de velocidad se escogió Mamdani para llevar a cabo el proceso de inferencia, esto determinado principalmente por el hecho de que no se dispone de un modelo analítico preciso y que sea linealizable, como para haber utilizado la inferencia de Takagi y Sugeno, y además por la razón de que se dispone de una gran cantidad de conocimiento acerca del vehículo que es de tipo intuitivo y que no puede ser modelado matemáticamente; información que los controladores basados en la inferencia de Mamdani pueden recoger y manejar de manera adecuada.

Una vez definido el motor de inferencia, solamente es necesario diseñar las reglas que determinaran las acciones de control que se llevarán a cabo. Debido a la complejidad de la dinámica de los vehículos terrestres es necesario que el diseño de la base de reglas sea completo, es decir, que toda combinación de entradas del controlador tenga una regla asociada. Esto es muy importante, ya que de otra forma pudiera darse el caso de que para una combinación de entradas la salida del controlador quedara indeterminada dando lugar a situaciones peligrosas cuando se controle la velocidad en ambientes no simulados. Por otra parte, un base de reglas bien diseñado por lo general debe ser consistente, esto implica que no deben haber reglas con iguales premisas y con consecuentes que involucren acciones de control opuestas.

Tomando en consideración lo anterior la base de reglas para el control de velocidad se diseñó buscando emular el comportamiento de un conductor humano en situaciones no simuladas, por lo que la estructura de cada regla y de la base de reglas puede ser fácilmente comprendida. Por ejemplo, si el error de velocidad pertenece al conjunto difuso PG y la integral del error de velocidad pertenece al conjunto difuso PG entonces la salida del controlador difuso pertenece a PG. Esta regla implica que si la velocidad actual del vehículo está muy alejada de la velocidad de referencia deseada y que la distancia relativa virtual entre el móvil y un móvil

virtual que se desplaza a la velocidad de referencia es amplia entonces el vehículo debe acelerar al máximo para alcanzar la referencia de velocidad deseada, acción que coincide precisamente con lo que realizaría un conductor humano. Todas las reglas propuestas para el diseño del controlador difuso de velocidad siguen la misma estructura y razonamiento que el descrito en el ejemplo anterior. Considerando una base de reglas completa y el número de conjuntos difusos asociados a las variables de entrada y salida del controlador definidos en el diseño preliminar, es decir cinco, se tiene una base de reglas de 25 reglas como se visualiza en la Tabla 3.1.

u		v_{ei}				
		NG	NM	CE	PM	PG
v_e	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	CE	PM
	CE	NG	NM	CE	PM	PG
	PM	NM	CE	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG

Tabla 3.1 Mapa de reglas difusas preliminar para el controlador difuso de velocidad. Considera como entradas el error de velocidad (v_e) y la integral de error de velocidad (v_{ei}); y como salida la apertura de los pedales (u).

La estructura de la base de reglas propuesta para el diseño del controlador difuso de velocidad coincide con la estructura clásica de base de reglas que se expuso en el Capítulo 2. Esta estructura garantiza la estabilidad del sistema controlado, sin embargo numerosas pruebas se realizaron para verificar dicha estabilidad es este caso particular. Las simulaciones llevadas a cabo, cuyos resultados y análisis se exhiben en el Capítulo 5, mostraron que era necesario realizar modificaciones al diseño preliminar de la base de reglas, a fin de satisfacer los requerimientos para realizar un control de velocidad adecuado. Las pruebas realizadas junto con el análisis de los resultados que condujeron a realizar las modificaciones que se indican a continuación. Las primeras modificaciones insertadas son consecuencia de la modificación del número de conjuntos difusos de la integral del error de velocidad, pasando a tener 35 reglas en vez de las 25 reglas de la base de reglas original. Considerando los resultados obtenidos de las pruebas, los consecuentes de las reglas asociadas a los conjuntos NP y PP de la integral del error de velocidad se asignaron

idénticos a los consecuentes de las reglas asociadas al conjunto difuso CE. Las modificaciones realizadas se aprecian en la Tabla 3.2.

Por otra parte, a partir de las simulaciones se observa que en algunos casos existen sobreoscilaciones del orden del 10% de la referencia, especialmente para cambios drásticos de referencia de velocidad, es decir, cambios superiores a 40 [km/h]. Estos cambios drásticos provocan un aumento considerable de la componente integral del controlador los que provoca el sobrenivel no deseado. A fin de mejorar el desempeño del controlador, se propone cambiar las reglas asociadas a los conjuntos difusos extremos (NG y PG) de la variable *integral del error de velocidad* a fin de limitar el efecto nocivo que provoca su aumento frente a cambios brusco de referencia de velocidad. Los cambios propuestos se pueden apreciar en la Tabla 3.3.

u		v_{ei}						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
v_e	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	NM	NM	CE	PM
	CE	NG	NM	CE	CE	CE	PM	PG
	PM	NM	CE	PM	PM	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG	PG	PG

Tabla 3.2 Mapa de reglas difusas para el controlador difuso de velocidad incorporando los conjuntos NP y PP. Considera como entradas el error de velocidad (v_e) y la integral de error de velocidad (v_{ei}); y como salida la apertura de los pedales (u). Los cambios respecto a la Tabla 3.1 se muestran en celeste.

Las variaciones a la base de reglas expuestas en la Tabla 3.3 permiten mantener el desempeño del controlador difuso de velocidad en lo referido a error permanente, pero mejoran el tiempo de estabilización y sobreoscilación máxima del controlador.

Las modificaciones presentadas en la Tabla 3.3 configuran el diseño final de la base de reglas, y junto con la inferencia de Mamdani, el diseño final de la base de conocimientos del controlador difuso de velocidad.

u		v_{ei}						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
v_e	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	NM	NM	CE	CE
	CE	NM	NM	CE	CE	CE	PM	PM
	PM	CE	CE	PM	PM	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG	PG	PG

Tabla 3.3 Mapa de reglas difusas final para el controlador difuso de velocidad modificando las reglas asociadas a los conjuntos NG y PG de la variable integral del error de velocidad. Considera como entradas el error de velocidad (v_e) y la integral de error de velocidad (v_{ei}); y como salida la apertura de los pedales (u). Los cambios respecto a la Tabla 3.2 se muestran en celeste.

3.1.4 Elección del método de defusificación de la variable de salida del controlador de velocidad

La selección del método de defusificación para obtener el valor real de la variable de salida del controlador, es muchas veces uno de las características de diseño menos considerada, ya que en muchas aplicaciones las diferencias en los resultados al elegir entre los diferentes métodos de defusificación son mínimas. Sin embargo, es importante notar que la selección entre los diferentes métodos de defusificación, depende notablemente de las características del sistema a controlar, la estructura de la base de reglas y de la complejidad de las funciones de pertenencia de cada conjunto difuso.

En el caso del diseño del controlador difuso de velocidad, tanto el sistema como la estructura de la base de reglas y la forma de las funciones de pertenencia escogidas en el diseño permiten implementar de manera adecuada y sencilla todos los métodos de defusificación descritos en el Capítulo 2. En particular, la forma de las funciones de pertenencia hace que en la mayoría de los casos las diferencias entre la defusificación llevada a cabo por algún método específico, sean pequeñas.

Considerando lo anterior, junto con las referencias en la literatura de métodos de defusificación utilizados para el control de la velocidad en vehículos [16], [17], [21], [22], se

determinó utilizar el método del centro de gravedad como método de defusificación para el controlador difuso de velocidad diseñado.

Con la selección del método de defusificación quedan absolutamente definidos los parámetros de diseño del controlador difuso de velocidad propuesto en esta Memoria de Título.

3.2 Diseño del controlador difuso de dirección

3.2.1 Selección de variables de entrada y salida del controlador difuso de dirección

Tal como sucede en el caso del controlador difuso de velocidad, para el diseño del controlador difuso de la dirección la selección adecuada de las variables de entrada y salida del controlador es muy importante para realizar correctamente las acciones de control. En el caso de los controladores difusos es deseable que las variables escogidas tengan algún significado físico o se disponga de información relevante y confiable acerca de ellas, ya que esto simplifica bastante el proceso de selección y diseño de los componentes principales del controlador difuso como son los conjuntos difusos asociados a cada variable y la base de conocimientos del sistemas. Junto a esto también es deseable que las variables escogidas permitan establecer algunas de las estructuras conocidas para los controladores difusos expuestas en la Tabla 2.1, ya que esto permite que el controlador a priori tenga un comportamiento y desempeño relativamente conocido.

Como es habitual en el diseño de los controladores en general, 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 de las ruedas. Por otra parte, la variable de salida del controlador difuso tiene relación con la variable manipulada del sistema, la cual dada la variable controlada establecida y el tipo de movimiento que se busca controlar, en este caso resulta natural definirla como el ángulo del volante. Es importante notar que entre la variable controlada y la variable manipulada hay una relación completamente lineal que en este caso se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\alpha_{volante} = A \cdot \alpha_{ruedas} \tag{3.4}$$

Donde A corresponde al factor que relaciona ambas variables. Para el caso particular del vehículo con el cual se desarrolló el simulador para hacer pruebas, y el cual se expone en el Sección 3.3, el valor de A es 14.7; según lo indicado por el fabricante. Aunque matemáticamente la variable controlada y manipulada son equivalentes, desde el punto de vista físico no lo son, ya que entre el volante y el eje que mueve las ruedas hay todo un sistema de actuación que incorpora retardos y perturbaciones que justifican el uso de las variables mencionadas como variable controlada y manipulada.

Dado que en el diseño de controladores difusos resulta fundamental el conocimiento heurístico que se tenga de las variables controladas y manipuladas, es importante que se disponga información sólida sobre aquellas que se escojan para ser entradas o salidas del controlador difuso de la dirección, a fin de simplificar el proceso de definición de los conjuntos difusos y la base de reglas.

Las entradas del controlador, como sucede en la mayoría de las estrategias de control, apuntan a monitorear el error entre el valor actual de variable controlada y una referencia y/o una función de dicho error. Dado que en este caso el ángulo de las ruedas es la variable controlada, el error de ángulo es una entrada natural para el controlador difuso definido de la siguiente forma:

$$\alpha_e = \alpha_{ref} - \alpha_{real} \quad (3.5)$$

Donde α_e es el error de ángulo de las ruedas, α_{ref} es la referencia de ángulo de la ruedas del sistema y α_{real} es el ángulo actual de las ruedas del vehículo. La selección del error de ángulo como entrada del controlador difuso de dirección se basa no solamente en el hecho de que el error, haciendo una asociación con las estrategias de control clásicas, sea la entrada natural del controlador, sino que también en el hecho de que se dispone de conocimiento significativo de esta variable, conocimiento que puede ser obtenido de expertos, fabricantes de vehículos terrestres y también conocimiento que puede ser obtenido empíricamente a través de experimentación.

De manera análoga a lo que sucede con el diseño del controlador difuso de velocidad, es posible llevar a cabo una estrategia de control basada exclusivamente en esta entrada, lo que correspondería a un control difuso del tipo proporcional. Pese a que es posible realizar un seguimiento de trayectoria utilizando este tipo de estrategia de control, las características del movimiento lateral que se intenta controlar lo hacen poco recomendable. El movimiento lateral

del vehículo está sometido a varias perturbaciones, siendo muy sensible a ellas. Si se considera que el control basado en el error es poco robusto frente a perturbaciones y tiene un error permanente que en la mayoría de los casos no es despreciable, la utilización exclusiva del error de velocidad puede conducir a que se desestabilice el sistema generando situaciones peligrosas en un aplicación a escala real. Resulta evidente entonces, que es necesario definir una entrada adicional a fin de asegurar la estabilidad del sistema.

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

$$\alpha_{ed} = \Delta\alpha_e = \alpha_e(k) - \alpha_e(k - 1) \quad (3.6)$$

Donde α_{ed} es la variación del error de ángulo y α_e es el error de ángulo de las ruedas. La elección de esta variable como segunda entrada del controlador difuso de dirección se basa en dos argumentos. El primero es de tipo práctico, ya que mediante esta elección es posible construir un controlador que tome la forma de las estructuras expuestas en la Tabla 2.1, las cuales poseen características y comportamientos definidos que pueden ser aprovechados según la aplicación que se esté realizando. Además la elección de esta variable no implica incorporar instrumentación o complejidad adicional a la implementación, ya que el cálculo de la variación del error puede ser computada con sencillez a partir de los datos obtenidos para el error de ángulo de la ruedas. El segundo motivo, y principal, por el cual se tomó esta decisión corresponde a la cantidad de conocimiento que se dispone de la variable escogida como entrada. La variación del error de ángulo, físicamente se asocia con la velocidad angular que es una variable manejada por los expertos humanos y ampliamente expuesta en la literatura, por lo que tanto desde un punto de vista intuitivo como técnico se posee bastante información que permitirá definir correctamente los conjuntos difusos, establecer el recorrido universal y definir la base de reglas del sistema, sin tener que recurrir a utilizar ensayo y error como sucedería en el caso de una variable no documentada o sin significado físico.

La elección de las dos variables de entradas mostradas en los párrafos previos permite elegir múltiples tipos de variables de salida del controlador para configurar algunas de las estructuras conocidas para los controladores difusos, por lo que a priori no queda definida una variable de salida como sucedió con el controlador difuso de velocidad. Es importante notar que no es un requisito que las variables escogidas en el diseño del controlador para la entrada y la

salida del mismo permitan conformar alguna estructura de las visualizadas en la Tabla 2.1; pero es altamente deseable esto, ya que dichas estructuras han sido ampliamente utilizadas y estudiadas en diversas aplicaciones, por lo que el grado de conocimiento que se tiene de ellas permite simplificar el proceso de diseño, análisis y ajustes que se deben realizar a los controladores.

En el caso de la variable de salida del controlador difuso de dirección se seleccionó la variación del error de ángulo del volante como variable de salida. La elección de esta variable se basó principalmente en dos factores: (i) Minimizar el error permanente y robustecer el controlador frente a perturbaciones y (ii) reflejar el pensamiento de un conductor humano experto al manejar un vehículo. En lo referido al primer factor, la elección de la variación del error de ángulo del volante permite configurar una estructura de controlador PI difuso. Con esto se logra el objetivo de hacer tender el error permanente a cero y también aumenta la robustez del sistema. Este último punto es significativo, ya que de haber escogido como variable de salida el ángulo del volante, se habría configurado una estructura de PD difuso. Aunque los controladores PD difusos permiten disminuir el error permanente y tiene mayor robustez frente a perturbaciones, son más sensibles al ruido. La presencia de ruido por lo general, dependiendo de la amplitud del ruido, involucra cambios de signo en las variables de salida. En un controlador PD difuso lo anterior significa alternar entre dos posiciones angulares de distinto signo, es decir, estar constantemente girando el volante hacia la derecha o la izquierda entorno al manubrio centrado; lo cual puede desestabilizar el sistema en caso que los cambios de ángulo sean muy disímiles. En el caso del controlador PI difuso este efecto se reduce ya que la alternación de signo se traduce en variaciones, acotadas, entorno al ángulo actual en que se encuentra el volante, lo que en la práctica se visualiza como pequeñas oscilaciones entorno a una referencia dada.

Aludiendo al segundo factor, por lo general el conductor humano cuando desea cambiar de dirección no hace referencia al ángulo al que desea llevar el manubrio, sino más bien, tomando como punto de partida el ángulo actual del volante, a la dirección en que desea moverlo, la magnitud del cambio y cuán rápido desea hacerlo. En ese sentido, el escoger como variable de salida del controlador difuso de dirección la variación del ángulo del volante refleja el comportamiento del conductor humano; lo cual contribuye significativamente a simplificar el diseño posterior de la base de reglas del controlador e incorporar conocimiento heurístico e intuitivo al diseño del controlador.

3.2.2 Definición de los conjuntos difusos asociados al controlador difuso de dirección

En la sección anterior se seleccionaron tres variables lingüísticas para las entradas y salida del controlador difuso de dirección. A cada una de esas variables tiene asignados sus respectivos conjuntos difusos. El proceso de determinar la cantidad de conjuntos difusos asociados a cada variable, la forma de las funciones de pertenencia y el recorrido universal de cada variable es una parte fundamental del proceso de diseño del controlador difuso ya que, como se ha mencionado para el control de velocidad, gran parte del comportamiento y desempeño de la estrategia dependerá de la adecuada selección de estos parámetros de diseño.

De las tres variables lingüísticas definidas para el controlador difuso de dirección dos corresponden a entradas del controlador (error de ángulo de las ruedas y variación del error de ángulo de las ruedas) y una a la salida (variación del ángulo del volante). En el caso de la dirección, considerando que el movimiento lateral tiene una dinámica más compleja que el movimiento longitudinal y está más expuesto a perturbaciones, la literatura sugiere utilizar entre 5 y 9 conjuntos difusos para cada variable del controlador [16], [17], [28]; siendo habitual utilizar 7 conjuntos difusos para cada variable. Lógicamente esta elección depende de la aplicación particular que se esté desarrollando, junto con los distintos factores que pudieran afectar su desempeño, y del grado de compromiso que se desee tener entre precisión, tiempo de respuesta y tiempo de estabilización del sistema, ya que el número de conjuntos difusos es directamente proporcional a la precisión del controlador, pero inversamente proporcional a la rapidez de la respuesta. En el caso del diseño del controlador difuso de dirección se definió, tomando en consideración los desarrollos expuestos en la literatura, que cada variable lingüística tendría asociada 7 conjuntos difusos cuyos valores lingüísticos para todas las variables son:

{Negativo grande, Negativo medio, Negativo pequeño, Cero, Positivo pequeño, Positivo medio, Positivo grande}

Los cuales se abrevian de la siguiente manera:

{NG, NM, NP, CE, PP, PM, PG}

Cada una de los conjuntos difusos definidos para cada variable lingüística tiene asociada una función de pertenencia, la cual en el este caso será una función triangular para todos los

conjuntos difusos de todas las variables lingüísticas. Los argumentos para la selección de una función con forma triangular como función de pertenencia de los conjuntos difusos asociados a las distintas variables lingüísticas del controlador son similares a los expuestos en el Sección 3.1.2 para el controlador difuso de velocidad y que básicamente se pueden resumir en que este tipo de funciones son sencillas de implementar, son fácilmente optimizables, su ajuste y reajuste es simple pudiendo incorporar sencillamente conocimiento heurístico del diseñador este proceso; y, finalmente, su uso es ampliamente avalado en la literatura para la aplicación asociada a este trabajo[16],[28].

Como sucede en todos los diseños de controladores difusos, aunque las variables lingüísticas pueden compartir la función de pertenencia, como es en este diseño, el ancho de cada función de pertenencia asociada a los diferentes conjuntos difusos, la simetría de las funciones, el traslape entre los conjuntos difusos y el recorrido universal son parámetros de diseño que dependen de la variable lingüística y del conjunto difuso particular sobre los cuales se esté trabajando.

Para la primera variable de entrada del controlador difuso (es decir, el error de ángulo de las ruedas) la asignación de los conjuntos difusos resulta bastante compleja debido a la complejidad del movimiento lateral, los factores de acoplamiento involucrados que no se consideran en este diseño y la sensibilidad de la variable misma. Intuitivamente el diseñador pudiera sentirse impulsado a asignar funciones de pertenencia triangulares con igual ancho, traslape y simétricas respecto al punto de mayor grado de pertenencia, tal como en el diseño del controlador difuso de velocidad, pensando así que si un error se considera que pertenece “poco” a un determinado conjunto difuso, por ejemplo tiene un grado de pertenencia 0.2; pertenecerá “bastante” al conjunto difuso inmediatamente contiguo, grado de pertenencia 0.8. Sin embargo, esta intuición no es válida en el caso del error de ángulo de la ruedas. El motivo es que la variable error de ángulo, al igual que el ángulo de la rueda propiamente tal, presenta una sensibilidad mucho mayor para valores pequeños de ángulo (inferiores a 5°) que para los valores mayores (superiores a 5°). La sensibilidad de la variable error de ángulo se puede verificar empíricamente, donde se puede visualizar que la diferencia entre tener un error de ángulo de 1° respecto a tener un error de 2° produce diferencias notables y visiblemente evidentes en la trayectoria del vehículo; sin embargo, la diferencia entre tener un error de ángulo de las ruedas 10° y uno de 12° no son tan evidentes y no tienen un efecto tan significativo como con los errores de ángulo

pequeño. Claramente, el tener un error de 10° es muy significativo e implica una desviación considerable de la trayectoria deseada, no obstante su efecto es similar al que se tiene con un error de 8° o de 12° . Estos aspectos muestran que el rango de valores del recorrido universal en que las funciones de pertenencia toman valores no nulos para los conjuntos difusos “Cero” y “Pequeño”², debieran ser más acotados que en el caso de los conjuntos difusos “Medio” y “Grande”. De igual forma, este comportamiento observado en el error del ángulo de las ruedas, indica que los conjuntos difusos debieran tender a aglomerarse en torno al origen, principalmente en el caso de los valores lingüísticos “pequeño”.

De manera análoga a lo acontecido con el controlador difuso de velocidad, para establecer correctamente el recorrido universal de la variable, sobre el cual se definen las funciones de pertenencia asociadas a los diferentes conjuntos difusos; es necesario definir una cota superior para el recorrido universal que permita limitar el intervalo sobre el cual se definen los conjuntos difusos. La elección de la cota pasa por definir un valor a partir del cual se considere que los valores iguales o superiores al definido tiene un grado de pertenencia 1 en el conjunto difuso “Grande”. Una vez definida la cota, todo valor mayor que el límite superior establecido será saturado para que pueda ser evaluado en el intervalo donde las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos están definidas.

Considerando las características poco intuitivas de los conjuntos difusos asociados al error de ángulo de las ruedas, la definición de los conjuntos difusos se realizó tomando como referencia la información publicada en trabajos previos que abordan esta problemática [16], [17], [28] y el conocimiento aportado por conductores expertos a través de pruebas empíricas. Estableciendo una cota superior genérica d para el recorrido universal, los conjuntos difusos para la variable error de ángulo de las ruedas que dan definidos como se muestra en la Figura 3.10.

La definición de la cota superior para el recorrido universal de esta variable de entrada del controlador difuso, debe tomar en consideración el ángulo máximo al que pueden llevarse las ruedas del vehículo. Considerando como vehículo el Volkswagen® Tiguan para el cual se propone el diseño de controladores de este trabajo de título, el ángulo máximo de las ruedas corresponde a 26° . Aunque este es el máximo error de ángulo que pudiera existir, tomando en cuenta que una acción de control fuerte, en este caso girar el volante lo más rápido posible en el

² Notar que cuando se menciona, por ejemplo, el conjunto difuso “Pequeño”, dado que siempre se habla de las variables lingüísticas haciendo alusión a su módulo, abarca los conjuntos difuso “Negativo pequeño” y “Positivo pequeño”. Lo mismo aplica para los conjuntos “Medio” y “Grande”.

sentido en que reduzca el error, no se desea realizar solo cuando se produce el máximo error posible, sino que también para otras situaciones donde se tiene errores “grandes”; se determinó que la cota para el error de ángulo se fijaría en $d = 13^\circ$. A razón que no se desea atenuar a o acrecentar el efecto de esta entrada, el factor de normalización para la entrada, K_{ae} , se establecerá en el mismo valor que la cota superior escogida para el error de ángulo. Con esta elección los conjuntos difusos asociados al error de ángulo de las ruedas quedan expresados como se indica en la Figura 3.11.

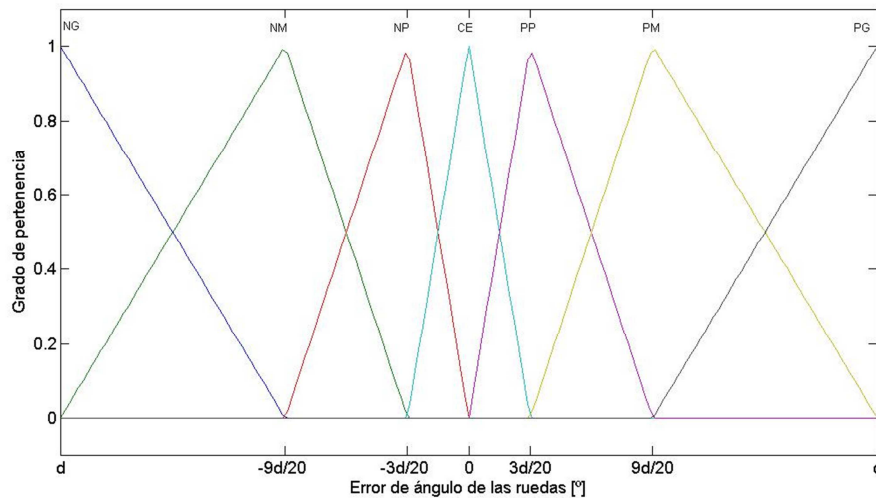


Figura 3.10 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Error de ángulo de las ruedas. Se utiliza una cota genérica d para limitar el recorrido universal. Se aprecia la asimetría en el ancho de los conjuntos difusos producto de la sensibilidad propia de la variable.

Aludiendo a la segunda variable de entrada del controlador difuso de dirección, la variación del error del ángulo de las ruedas, se observa que esta variable presenta menos dificultades que el error de ángulo para la definición de sus conjuntos difusos. Físicamente esta la variación del ángulo de las ruedas se asocia con la velocidad angular con que las ruedas se mueven y, como sucede frecuentemente con las velocidades en general, su comportamiento es conocido condiciéndose muy bien con la percepción de un conductor humano. Sin embargo, a diferencia de otras variables físicas que se miden o supervisan en un vehículo, la variación angular de las ruedas no es una variable medida, por lo que aunque resulta fácil comprender como esta variable es modificada habitualmente no se dispone información directa que permita establecer los conjuntos difusos. Por lo tanto en este caso, la definición del rango de valores del recorrido universal y el dominio donde las funciones de pertenencia relacionadas con los

diferentes conjuntos difusos son no nulas se debe realizar a partir de información indirecta o mediante la realización de pruebas empíricas.

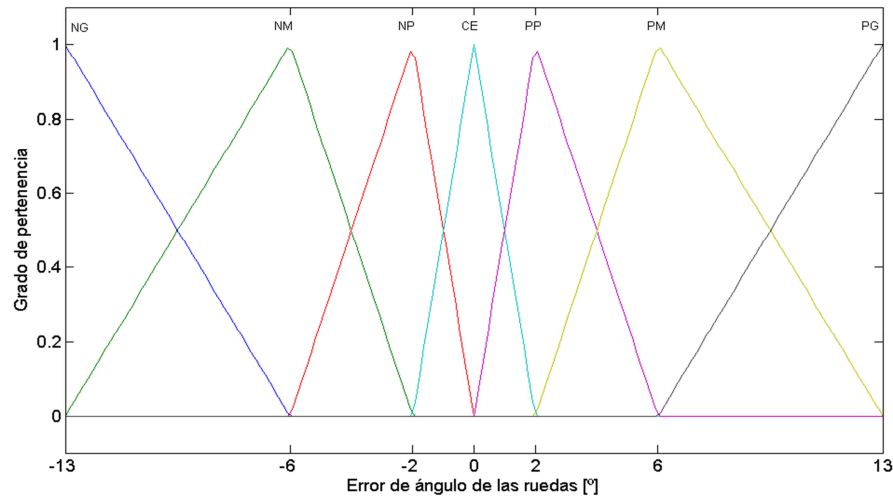


Figura 3.11 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Error de ángulo de las ruedas, reemplazando la cota genérica por el valor $d = 13^\circ$ para limitar el recorrido universal.

Al igual que para el controlador difuso de velocidad y para el error de ángulo, para establecer el recorrido universal de la variación del error de ángulo de las ruedas, es necesario definir una cota para el recorrido universal. Esto es necesario para poder normalizar la variable de entrada y definir apropiadamente los conjuntos difusos. En el caso de la variación del error de ángulo, el ancho de los conjuntos difusos se establece que será igual para todos ellos. La justificación de esta elección, tal como se argumentó para el controlador difuso de velocidad, se basa en la percepción de la variación del ángulo, o del error de ángulo en este caso, de las ruedas que realiza un ser humano; donde si la variación del error de ángulo de las ruedas es, por ejemplo, “bastante grande” (grado de pertenencia 0.8 al conjunto difuso “grande”) la asociación inmediata que se hace es que es “poco mediano” (grado de pertenencia 0.2 al conjunto difuso “medio”). La forma de reflejar esta intuición, que en la práctica funciona correctamente, de manera formal en el diseño del controlador difuso es definiendo que el ancho de cada conjunto difuso sea igual para todos los conjuntos, de tal forma que si un valor tiene un grado de pertenencia k a un determinado conjunto difuso, tenga un grado de pertenencia $(1-k)$ al conjunto difuso contiguo. Teniendo como referencia esta elección de diseño y estableciendo una cota superior genérica e para el recorrido universal de la variable, los 7 conjuntos difusos asociados a la variable variación del error de ángulo de las ruedas que dan definidos como se visualiza en la Figura 3.12.

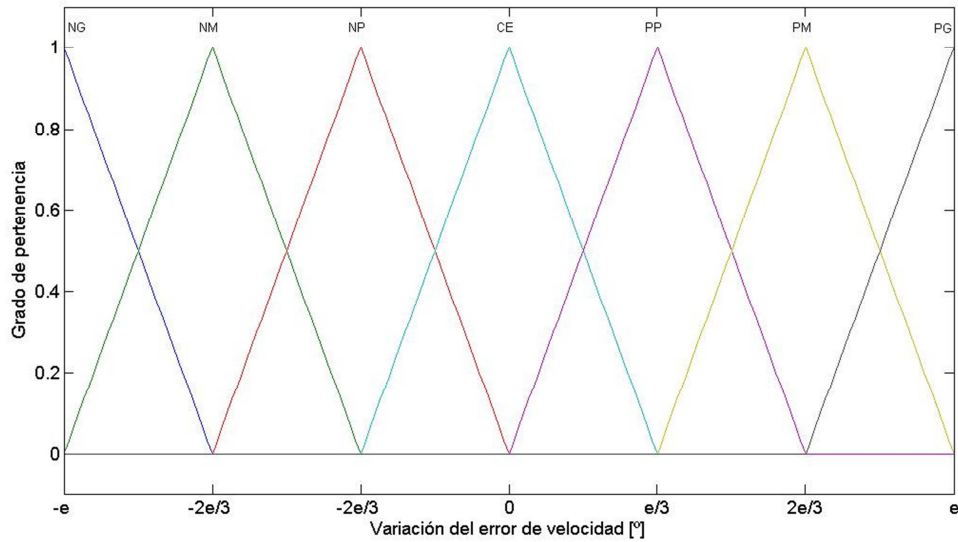


Figura 3.12 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Variación del error de ángulo de las ruedas. Se utiliza una cota genérica e para limitar el recorrido universal.

La elección de la cota superior de la variación del error de ángulo de las ruedas se realizó en base a los resultados de pruebas empíricas que se llevaron a cabo para determinar la variación del error de ángulo apropiada. Considerando que las ruedas se pueden girar en 26° grados hacia la derecha y la izquierda, las pruebas realizadas permitieron establecer que el tiempo promedio que demora que demora un ser humano en realizar el giro desde 0° hasta 26° es de $700[\text{ms}]$. Es importante notar que pese a que la entrada es la variación y no la derivada del error de ángulo de las ruedas, lo que se considera una variación “grande” o “pequeña”, depende del tiempo de muestreo con el que se registran las variables de interés del sistema. Por ello, aunque una variación del error de ángulo de las ruedas de 26° se puede considerar “grande”, esta variación se produce en un tiempo mucho mayor, del orden de decenas o cientos de veces, que los tiempos de muestreo estándar de los sistemas de medición y control. Por lo tanto dado que la variación del error de ángulo se medirá en función del tiempo de muestreo del sistema de adquisición de datos, es necesario ajustar el valor de la cota tomando en consideración este factor. Teniendo presente que el tiempo de muestreo utilizado en el simulador es de $10 [\text{ms}]$ y los resultados de las pruebas empíricas, con estos datos se fijó la cota superior para la variación del error de ángulo en $e = 1.5^\circ$. Dado que no se desea ni limitar ni magnificar el efecto de esta variable de entrada, el factor de normalización de la variación del error de ángulo, K_{aed} , se escogió del mismo valor que la cota superior seleccionada. Con la definición de este parámetro de diseño los conjuntos difusos

asociados a la variación del error de ángulo de las ruedas quedan representados gráficamente como se indica en la Figura 3.13.

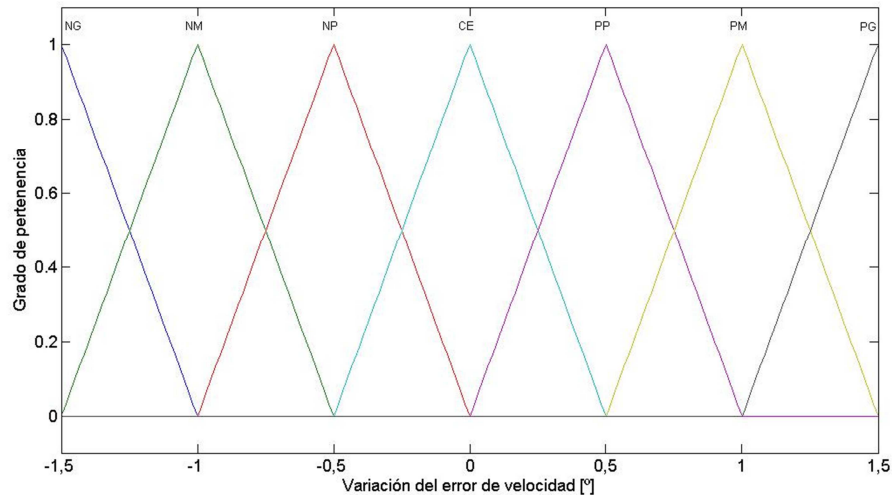


Figura 3.13 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Variación del error de ángulo de las ruedas, reemplazando la cota genérica por el valor $e = 1,5^\circ$ para limitar el recorrido universal.

Para la variable de salida del controlador de dirección, la variación del ángulo del volante, las consideraciones que deben realizarse son similares a las expuestas para la variable de entrada del controlador variación del error de ángulo de las ruedas. Esto resulta coherente con el hecho que entre el ángulo de las ruedas y el ángulo del volante hay una relación lineal, por lo que es natural que el comportamiento y diseño de los conjuntos asociados a estas variables sea similar. La percepción que tiene un conductor humano de esta variable es bastante acabada ya que, aunque no es una variable que se mida directamente, el conductor puede determinar directamente de forma gruesa el ángulo del volante y la variación que este ha sufrido respecto a una posición angular previa, más aún cuando las variaciones son amplias. Pese a lo anterior, dado que las percepción humana permite realizar mediciones gruesas y en intervalos de tiempo amplios, en comparación de los tiempo de muestreo habituales de los instrumentos de medición digitales, para determinar la variable de salida del controlador difuso de dirección resulta necesario interpolar información a partir de los datos que pueden aportar los conductores expertos y de las pruebas empíricas que se lleven a cabo.

Tal como se ha realizado con las variables de entrada del controlador, para la variación del ángulo del volante es necesario limitar el recorrido universal de esta variable fijando una cota para el conjunto difuso “grande”. Utilizando el mismo argumento que para la variable de entrada

variación del error de ángulo de las ruedas a fin de fijar el ancho de los conjuntos difusos, en el caso de los conjuntos difusos asociados a la variable de salida del controlador se determinó que ellos serían todos de igual ancho y el punto medio del intervalo con grado de pertenencia no nulo de las funciones de pertenencia asociadas a cada conjunto difuso, equidistantes. De esta forma precisando una cota superior genérica para el recorrido universal, f , los conjuntos difusos para la variación del ángulo del volante se definen de la forma que se expone en la Figura 3.14.

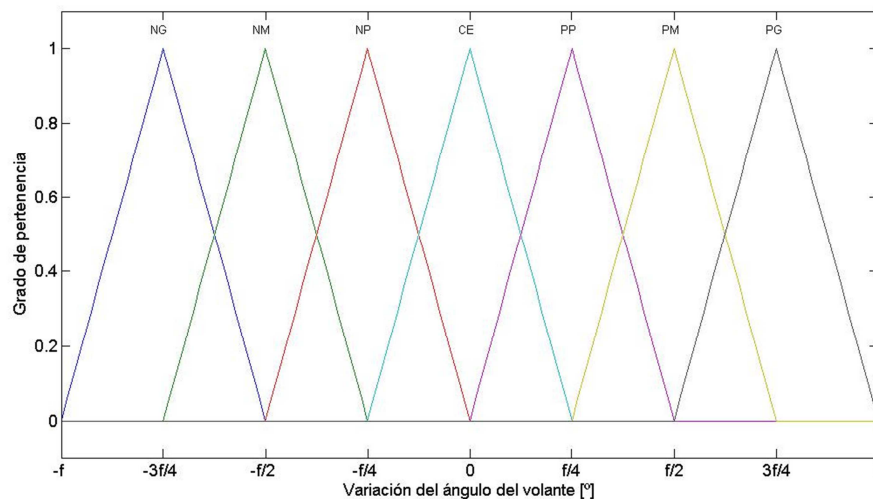


Figura 3.14 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de salida Variación del ángulo del volante. Se utiliza una cota genérica f para limitar el recorrido universal.

Para la elección de la cota superior definitiva se tomaron en cuenta los resultados de las pruebas empíricas a partir de las cuales se determinó los factores de escala y la cota para la variación del error de ángulo de las ruedas. Como entre el ángulo de las ruedas y el ángulo del volante existe una relación lineal, se puede obtener información relevante de la variación del ángulo del volante desde los datos obtenidos para la variación del error del ángulo. Antes de fijar el valor de la cota es importante notar que como se está trabajando con funciones de forma triangular, la elección de la cota debe ser tal que el intervalo en que se mueven los valores numéricos de la variable de salida sea $\left[-\frac{3f}{4}, \frac{3f}{4}\right]$, según el valor f escogido para la cota. De esta forma, se asegura que al defusificar la variable de salida pueda abarcar todo el rango de valores deseados para dicha variable.

Centrándose en la determinación de la cota, si se tiene presente que una variación del error de ángulo de las ruedas de 1.5° se considera “grande”, eso implica que en cada instante de muestreo un cambio igual o mayor de 1.5° en el ángulo de las ruedas también se considera

“grande”. Ahora bien, tomando en cuenta que la relación entre el ángulo del volante y el ángulo de las ruedas es de 14.7:1; entonces el valor que delimita una variación de ángulo del volante “grande” es 21° . Por lo tanto, dado que $\frac{3f}{4} = 21^\circ$, entonces el valor de la cota que se debe escoger es $f = 28^\circ$. Aunque el recorrido universal se normaliza en función de la cota superior elegida, el factor de denormalización para la variación del ángulo del volante, K_{st} , se fija pensando en el máximo valor que puede tomar la variable de salida, por lo que en este caso se escoge $K_{st} = 21^\circ$; considerando que no se desea limitar ni amplificar la salida del controlador difuso de dirección.

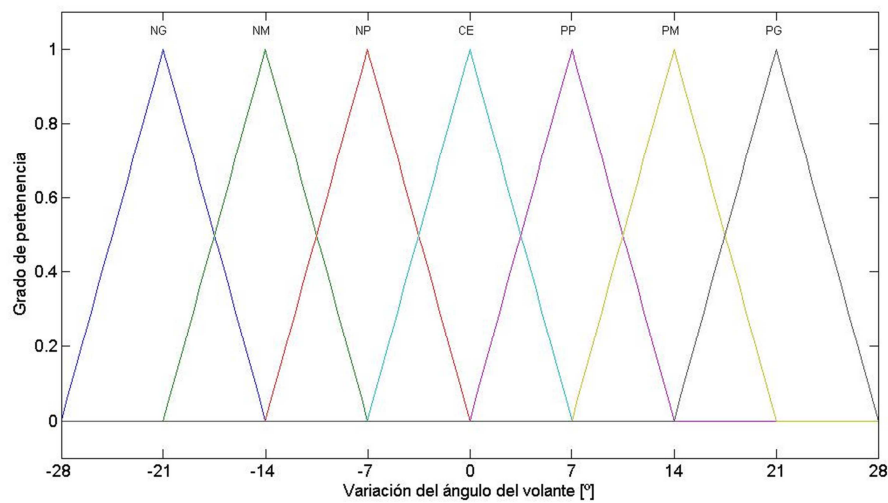


Figura 3.15 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Variación del error de ángulo de las ruedas, reemplazando la cota genérica por el valor $f = 28^\circ$ para limitar el recorrido universal. Se aprecia que el intervalo de valores numéricos para la variable defusificada es $[-21,21]$ tal como indicaban las pruebas empíricas.

Utilizando la cota superior seleccionada para el recorrido universal de la variable de salida del controlador difuso de dirección, los conjuntos difusos asociados a esta variable quedan definidos como se aprecia en la Figura 3.15.

Los resultados de las simulaciones, que se exponen y analizan en profundidad en el Capítulo 5, sugieren que el diseño propuesto es correcto y no necesita mayores modificaciones, siendo necesario solamente modificar el valor de la cota superior de la variable de salida, la que, de acuerdo a los resultados obtenidos y analizados, se modificó a un valor de $f = 20^\circ$ y el factor de denormalización a $K_{st} = 15^\circ$. Con esto los conjuntos difusos asociados a la variación del ángulo del volante quedan establecidos como se visualiza en la Figura 3.16.

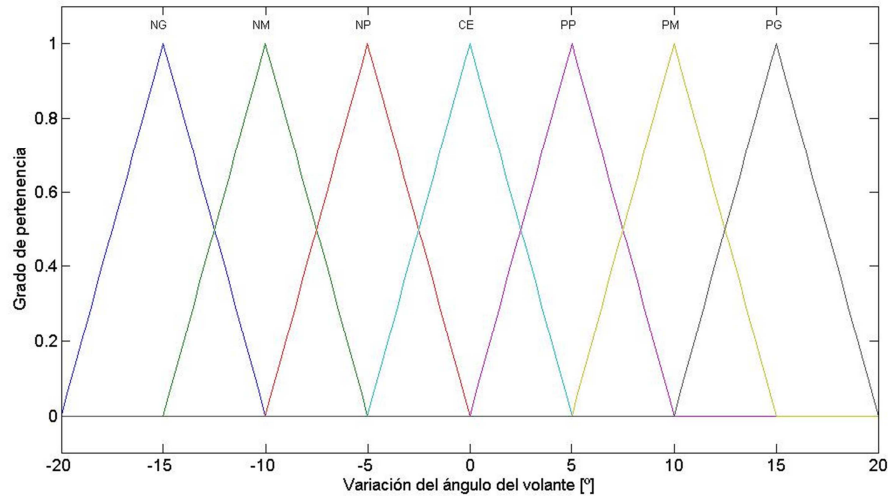


Figura 3.16 Conjuntos difusos asociados a la variable lingüística de entrada Variación del error de ángulo de las ruedas, modificando el valor de la cota a $f = 20^\circ$ para limitar el recorrido universal. Se aprecia que el intervalo de valores numéricos para la variable defusificada es $[-15,15]$ tal como sugerían las pruebas realizadas.

La modificación presentada en el párrafo previo junto con el diseño expuesto en esta sección, configuran el diseño final de los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada y salida del controlador difuso de dirección delineado en este trabajo.

3.2.3 Definición de la base de conocimientos del controlador difuso de dirección.

Como en todos los controladores difusos, la base de conocimientos es una parte clave del controlador, pudiéndose asemejar al cerebro del controlador que permite evaluar las entradas y decidir las acciones de control necesarias para que el sistema se comporte adecuadamente. La base de conocimientos, como se expone en el Capítulo 2, está compuesta por el motor de inferencia y la base de reglas, siendo ambos componentes de la base de conocimiento parámetros de diseño del diseñador del controlador difuso.

En el caso del controlador difuso de dirección, de manera análoga al controlador difuso de velocidad, la inferencia escogida para la base de conocimientos del controlador es la inferencia de Mamdani. La elección de este método de inferencia se basa, con más fuerza aún que el caso del controlador difuso de velocidad, en la carencia de un modelo exacto, la complejidad de la dinámica del movimiento lateral y la abundancia de conocimiento heurístico proveniente de expertos y referencias bibliográficas, factores que favorecen la utilización del método de

inferencia seleccionado, ya que no precisa de un modelo para realizar el diseño del controlador y puede manejar e incorporar muy bien la información heurística que no es modelable siempre matemáticamente.

Una vez definido el motor de inferencia del controlador difuso es necesario precisar la base de reglas del sistema. En este caso la complejidad del sistema y las frecuentes perturbaciones hacen necesaria que la base de reglas que se diseñe sea completa y consistente. Esto es necesario, ya que de otra forma si frente a alguna combinación de entradas del controlador no hubiera reglas definidas o fueran contradictorias podrían producirse situaciones riesgosas producto de la desestabilización del sistema que provocarían las salidas generadas en esos casos.

Tomando en cuenta las consideraciones destacadas en el párrafo previo, se procedió a formular la base de reglas buscando emular el comportamiento y las decisiones que toma un conductor humano al tratar de modificar la dirección del vehículo. Para la definición de las reglas hay que tener presente que los ángulos de las ruedas y del volante se miden tomando como referencia que 0° corresponde a las ruedas paralelas al eje central del vehículo. En la Tabla 3.4 se ilustran las decisiones intuitivas que toma un conductor humano. Estas no requieren mayor explicación porque responden a la lógica de cualquier persona que maneje un vehículo. Por otra parte, en la Tabla 3.5 se muestra la relación que existe entre esa intuición y las variables utilizadas en el controlador difuso.

Ubicación ángulo deseado respecto a ángulo actual de las ruedas	Sentido de giro actual de las ruedas	Dirección de movimiento del volante
Derecha	Derecha	Derecha
	Izquierda	Derecha
Izquierda	Derecha	Izquierda
	Izquierda	Izquierda

Tabla 3.4 Acciones que toma un conductor humano para modificar el ángulo de las ruedas considerando el ángulo deseado de las ruedas (asociado al error de ángulo) y el sentido de giro de las ruedas (asociado a la variación del error). La magnitud con que mueve el volante en un sentido u otro, dependerá cuán lejos estén las ruedas del ángulo de referencia y de hacia dónde giran las ruedas, es decir, si el ángulo actual de las ruedas se está alejando o acercando al ángulo de referencia.

Ubicación ángulo deseado respecto a ángulo actual de las ruedas	Error de ángulo	Sentido de giro actual de las ruedas	Variación del error de ángulo	Dirección de movimiento del volante	Variación ángulo del volante
Derecha	>0	Derecha	<0	Derecha	>0
		Izquierda	>0	Derecha	>0
Izquierda	<0	Derecha	<0	Izquierda	<0
		Izquierda	>0	Izquierda	<0

Tabla 3.5 Relación entre percepción humana y variables de entrada y salida utilizadas para el controlador difuso de dirección. En la tabla se observa la formalización entre los conceptos usados por un conductor humano y las variables, desde el punto de vista de su signo, que se utilizaran para confeccionar la base de reglas.

Las reglas del controlador de dirección se construyeron utilizando la información descrita en la Tabla 3.4 y Tabla 3.5. Por ejemplo, si el error de ángulo pertenece al conjunto difuso PG y la variación del error de ángulo pertenece a PG entonces la variación del ángulo del volante pertenece al conjunto difuso PG. Esta regla quiere decir que si el ángulo de referencia se encuentra a la muy a la derecha de la posición angular actual de las ruedas y que el ángulo actual se aleja hacia la izquierda rápidamente entonces se debe girar el volante rápidamente hacia la derecha para alcanzar la referencia. Esta acción de control se condice totalmente con lo que haría un conductor humano frente a esta situación. Siguiendo el mismo razonamiento para todas las reglas, y teniendo en cuenta que cada variable de entrada del controlador tiene asociada 7 conjuntos difusos, la base de reglas del controlador difuso está compuesta por 49 reglas, cuyo mapa de reglas se muestra en la Tabla 3.6.

La estructura de la base de reglas propuesta para el diseño del controlador difuso de velocidad coincide con la estructura clásica de base de reglas que se expuso en el Capítulo 2. Esta estructura garantiza la estabilidad del sistema controlado, sin embargo numerosas pruebas se realizaron para verificar dicha estabilidad es este caso particular. Las simulaciones llevadas a cabo, sus resultados y análisis se exhiben en detalle en el Capítulo 5. A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones se determinó que la base de reglas propuesta corresponde al diseño final de la base de reglas del controlador difuso de dirección desarrollado en este trabajo.

Δu		$\Delta \alpha_e$						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
α_e	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	CE
	NM	NG	NG	NG	NM	NP	CE	PP
	NP	NG	NG	NM	NP	CE	PP	PM
	CE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PG
	PM	NP	CE	PP	PM	PG	PG	PG
	PG	CE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tabla 3.6 Mapa de reglas difusas para el controlador difuso de dirección. Considera como entradas el error de ángulo de las ruedas (α_e) y la variación del error de ángulo ($\Delta \alpha_e$); y como salida la variación del ángulo del volante (Δu).

3.2.4 Elección del método de defusificación de la variable de salida del controlador de dirección

La defusificación de la salida del controlador difuso es un paso fundamental para poder proveer correctamente las señales de control al sistema que se está supervisando y, aunque existen métodos estándar ampliamente estudiados para llevar a cabo este proceso, la elección de un método particular no es trivial y requiere un conocimiento acabado del sistema controlado y del controlador diseñado.

En el caso del diseño del controlador difuso de dirección, de manera similar a lo acontecido en el diseño del controlador difuso de velocidad, la forma de las funciones de pertenencia escogidas en el diseño de los conjuntos difusos, permiten implementar de manera adecuada y sencilla todos los métodos de defusificación descritos en el Capítulo 2. Como las funciones de pertenencia son triangulares, no solamente la implementación de los métodos se simplifica, sino que las diferencias que se aprecian entre los diferentes métodos de defusificación en cuanto a los resultados obtenidos son mínimas.

Considerando lo expuesto en el párrafo anterior, la decisión del método de defusificación se tomó basándose en los métodos de defusificación utilizados habitualmente para el control de la dirección en vehículos que se exponen en la literatura [16], [17], [18], determinándose que se utilizará el método del centro de gravedad como método de defusificación para el controlador difuso de dirección diseñado.

Con la selección del método de defusificación quedan absolutamente definidos los parámetros de diseño del controlador difuso de dirección propuesto en este trabajo de título.

3.3 Validación del Sistema de Control Propuesto: Identificación de modelo y diseño de simulador para un vehículo terrestre de escala real

Una de las grandes ventajas de los controladores difusos es que se pueden diseñar sin la necesidad de contar con un modelo preciso y acabado del sistema que se busca controlar, el cual en muchas ocasiones no se encuentra disponible o resulta demasiado complejo producto de la dinámica natural de la planta. Pese a esto, es importante notar que resulta bastante útil, en caso de que esté disponible, el contar con un modelo del sistema a controlar ya que permite detectar errores en el diseño del controlador difuso, evaluar preliminarmente el desempeño del mismo y poder hacer correcciones y ajustes que de otra forma tendrían que realizarse mediante ensayo y error a través de pruebas empíricas exhaustivas.

Aunque no forma parte del trabajo realizado y expuesto en esta memoria, de forma paralela se colaboró en la identificación de un modelo para un vehículo de escala real, en particular un Volkswagen® Tiguan, y el diseño de un simulador que permitiera usar dicho modelo para efectuar pruebas y validar los controladores diseñados. Considerando que el simulador y modelo identificado se utilizaron ampliamente en el desarrollo de este trabajo, a continuación se presentaran las características principales y principios de diseño de dichas herramientas.

El tipo de modelo identificado se denomina *modelo bicicleta* y corresponde a una simplificación de la dinámica real de un vehículo. La simplificación principal de este modelo consiste en considerar que las ruedas del vehículo se encuentran en el eje central del vehículo, es decir, considerar que el vehículo tiene 2 ruedas en vez de 4; de ahí el nombre del modelo.

El modelo considera la presencia de fuerzas longitudinales y transversales, a fin de modelar el movimiento del vehículo en todas las direcciones. Las fuerzas longitudinales que considera son la fuerza de tracción total ejercida por el vehículo y la resistencia aerodinámica consecuencia directa del roce con el aire, donde ambas fuerzas son opuestas. Las fuerzas transversales incorporadas la modelo son las fuerza tangencial presentes en la rueda delantera y la rueda trasera. Los efectos de balanceo y cabeceo fueron despreciados para el desarrollo de este modelo. En la Figura 3.17 se pueden visualizar las fuerzas consideradas para realizar el modelo que se indicaron previamente.

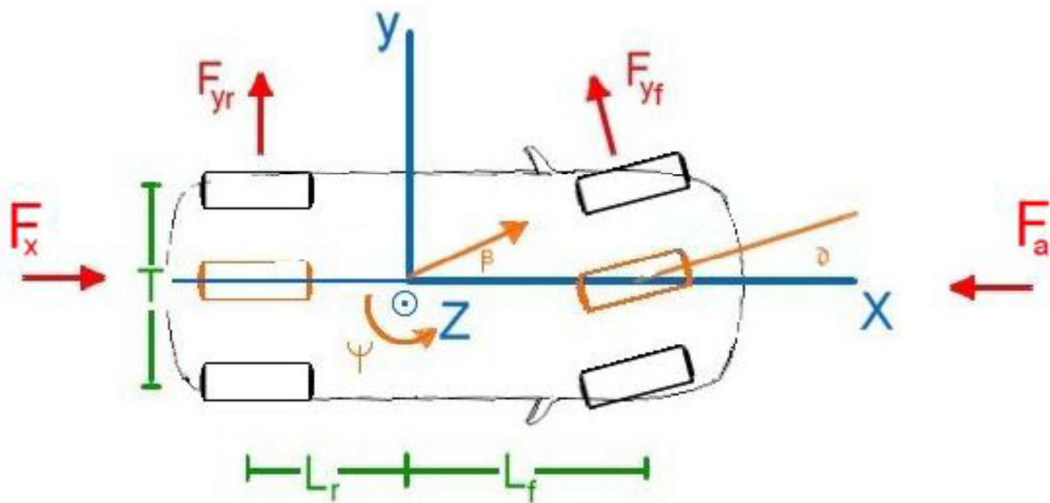


Figura 3.17 Esquema de vehículo y las fuerzas que son consideradas para el modelo. Las fuerzas longitudinales F_a y F_x corresponden a la resistencia aerodinámica generada por el roce con el aire y la tracción total respectivamente. Las fuerzas transversales F_{yr} y F_{yf} corresponden a las fuerzas tangenciales presentes en las ruedas trasera y delantera respectivamente. Los ángulos que se visualizan en la figura; β , δ y ψ , corresponden al ángulo del centro de gravedad del vehículo, el ángulo de inclinación de las ruedas delanteras y el ángulo de viraje.

Teniendo en consideración las fuerzas antes mencionadas y utilizando información procedente del fabricante, se utilizó el balance de fuerzas para obtener las ecuaciones que modelan el comportamiento dinámico del vehículo, y cuya implementación permite obtener el simulador del vehículo de escala real. Para un mayor detalle de las ecuaciones determinadas, así como los parámetros utilizados, se sugiere ver [61]. En un vehículo de escala real, cada eje del vehículo aporta a la fuerza de tracción. Para efectos del modelamiento y las ecuaciones que describen el sistema, se considera que cada eje aporta a la fuerza de tracción con la misma magnitud, por lo cual la fuerza total de tracción que se considera para el balance de fuerza corresponde al doble de la fuerza de tracción que realiza un eje del vehículo.

Dado que la modelación se realiza mediante balance de fuerzas, las entradas naturales del modelo del vehículo son la fuerza de tracción, la fuerza de frenado y el ángulo de las ruedas. Por

otra parte, el modelo entrega información acerca de la velocidad del vehículo y de la posición del mismo en el plano X-Y. Sin embargo, en el caso del sistema de control que se está diseñando en este trabajo de título, las referencias que entrega el controlador hacen referencia a la apertura de los pedales de aceleración y freno; y no a las fuerzas generadas al manipular estos actuadores. Por ello es necesario establecer la relación existente entre la apertura de los pedales y las fuerzas que se generan al presionarlos. El encontrar dichas relaciones es una tarea altamente compleja, ya que son muchos y diversos los factores que están involucrados en las relaciones entre las fuerzas generadas al presionar los pedales y la apertura de los mismo. Por ello se requiere realizar experimentación exhaustiva para poder determinar dichas relaciones, la cuales por lo general son complicadas y aumentan considerablemente la complejidad del modelo.

A fin de poder generar un modelo compatible con el controlador que se busca diseñar y validar, se buscaron maneras de poder relacionar las variables antes mencionadas de la manera más realista posible. En el caso del acelerador, existe una relación directa entre la apertura de este pedal y la fuerza de tracción total presente en el vehículo. En el modelo del vehículo implementado se optó por utilizar una relación estrictamente lineal entre la apertura del pedal de aceleración y la fuerza de tracción. Se tomó como base para la definición de esta relación la información que entrega el fabricante que da cuenta del tiempo que demora el vehículo en alcanzar los 100 [km/h]. Es importante notar que, aunque pudiera parecer bastante simple y burda la aproximación que se realiza para la relación entre acelerador y fuerza de tracción; más aún al analizar todos los factores que son despreciados como el cambio de marchas del vehículo y las variaciones del torque del motor que se producen, los resultados obtenidos al probar el simulador muestran un desempeño aceptable del vehículo utilizando este supuesto.

En el caso del freno y la relación con la fuerza de frenado, también se consideró una relación lineal, tomando en cuenta el peso del vehículo y el coeficiente de roce del pavimento para establecer la constante de proporcionalidad entre ambas variables. La experimentación realizada del freno también da cuenta de un buen desempeño del simulador, pese a la simplicidad de la relación definida.

El establecimiento de estas relaciones configura plenamente el modelo del vehículo terrestre de escala real modelo que fue utilizado exitosamente para la validación y ajuste de parámetros de los controladores difusos de velocidad y dirección diseñados en este Memoria de Título.

4. Implementación de controladores difusos de velocidad y dirección

Una vez diseñados los controladores difusos de velocidad y dirección según lo expuesto en el Capítulo 3, el siguiente paso es implementar dichos controladores para poder evaluar su desempeño y, en base a los resultados obtenidos, realizar los ajustes necesarios para mejorar el rendimiento de los controladores.

La implementación de los controladores consta de dos etapas. Como se indicó en el Capítulo 3, se encuentra disponible un simulador basado en un modelo simplificado de un vehículo de escala real, con el cual es posible revisar la validez y coherencia de los controladores difusos diseñados; además de poder realizar los ajustes de parámetros de diseño necesarios en función de las pruebas realizadas utilizando el simulador. Este simulador está desarrollado en Simulink, que es la herramienta gráfica para modelamiento, simulación y análisis que funciona en el entorno de programación de MATLAB®. Por esta razón la primera etapa de la implementación de los controladores corresponde a desarrollar los controladores en Simulink para poder hacer uso del modelo del vehículo.

La segunda etapa consiste en implementar los controladores en la plataforma que permitirá interactuar a los controladores con los dispositivos físicos que proveerán las referencias y llevarán a cabo las acciones de control. Esta plataforma corresponde a un computador que estará montado en un vehículo de escala real, el cual mediante puertos seriales se comunicará con las interfaces de los actuadores y otros dispositivos del vehículo; permitiendo de esta forma recibir los valores actuales de las variable de interés de los controladores y enviar las referencias para que los actuadores ejecuten las acciones de control determinadas por los controladores. En este caso, los controladores desarrollarán en el lenguaje de programación C, funcionando bajo el sistema operativo GNU/Linux en el computador antes mencionado.

4.1 Implementación de los controladores difusos en MATLAB®

La implementación de los controladores en MATLAB® se puede dividir en dos sub-etapas de ejecución básicas: (i) Transferir el diseño en papel de los controladores a MATLAB® y

(ii) desarrollo de un modelo en Simulink que integre los controladores diseñados y les provea un contexto adecuado para su correcto funcionamiento e integración con el modelo del vehículo de escala real.

La primera sub-etapa, tal como se mencionaba, consiste en trasladar el diseño de los controladores diseñados en papel al ambiente MATLAB®-Simulink a fin de posteriormente implementarlos en Simulink para poder ser integrados con el modelo del automóvil que se encuentra disponible. MATLAB® posee herramientas particulares que permiten realizar de manera relativamente sencilla este proceso de transferencia. En particular, el *Fuzzy Logic Toolbox* que contiene instrucciones preprogramadas que permiten diagramar completamente un sistema basado en lógica difusa, además de contar con los bloques gráficos necesarios para la integración del código generado en MATLAB® con Simulink.

Las instrucciones disponibles en el *Fuzzy Logic Toolbox* permiten, entre otras cosas, definir:

- Número de entradas del controlador
- Número de salidas del controlador
- Nombre de las variables lingüísticas
- Número de conjuntos difusos asociado a cada variable y sus valores lingüísticos
- Forma y parámetros de las funciones de pertenencia asociadas a cada conjunto difuso
- Recorrido universal de cada variable lingüística
- Método de fusificación
- Motor de inferencia
- Base de reglas
- Método de defusificación

En el Anexo A se muestra en detalle el código que implementa exactamente el diseño expuesto en el Capítulo 3 para cada controlador y se comentan el propósito de cada instrucción. Es importante notar que en la definición del controlador difuso no se especifica las características propias de la entrada, por ejemplo si es la integral o la variación de alguna variable, ya que eso se define en Simulink cuando se indican cuáles son las variables de entrada o salida del controlador.

Cada controlador se programa de manera independiente en el lenguaje de MATLAB® haciendo uso de las instrucciones provistas por el *Fuzzy Logic Toolbox*. La ejecución del código para cada controlador genera una estructura que almacena toda la información relevante del sistema de lógica difusa. También es posible crear un archivo de extensión *fis* (.fis) que cumple la misma labor que la estructura antes mencionada con la diferencia el contenido del archivo .fis puede ser visualizado en una interfaz gráfica de usuario.

La creación de esta estructura permite integrar el diseño de los controladores difusos a Simulink, ya que el bloque de Simulink que representa al controlador difuso recibe como parámetro esta estructura. Una vez provista la estructura con toda la información del diseño del controlador, el bloque es capaz de procesar las entradas, realizar la inferencia según la base de reglas y generar la salida defusificada de acuerdo al diseño realizado para el controlador.

La segunda sub-etapa corresponde al desarrollo de los controladores difusos en Simulink, a fin de poder crear el lazo cerrado con el modelo del vehículo que permita evaluar el desempeño de los controladores. Como se mencionaba en el párrafo anterior, una vez generada la estructura con el diseño del controlador difuso, es necesario asignarla al bloque que representa al controlador difuso. Toda la implementación en Simulink se realizó considerando un tiempo de muestreo de 10 [ms]. En la Figura 4.1 se puede ver el bloque utilizado para el controlador difuso y la interfaz para poder asignar la estructura como parámetro.

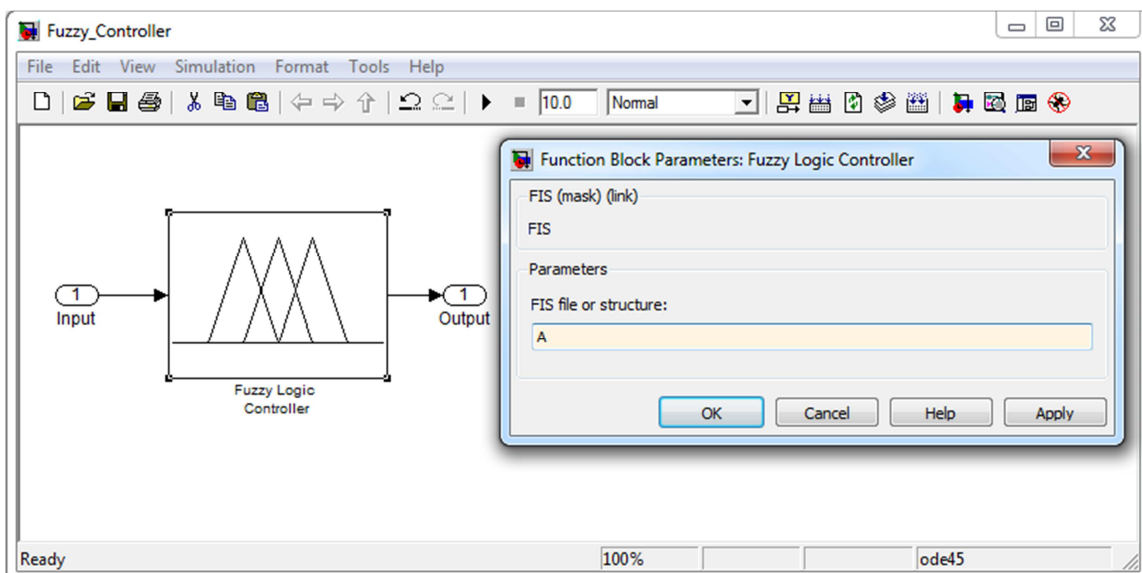


Figura 4.1 Bloque de Simulink que representa el controlador difuso y la interfaz para asignar la estructura que contiene el diseño del controlador difuso al bloque.

La implementación en ambiente MATLAB®-Simulink considera los conjuntos difusos normalizados. Esto permite tener definidos los conjuntos difusos de forma genérica pudiendo modificar la cota superior del recorrido universal de forma externa y luego normalizando las entradas por un factor de normalización adecuado. Por ello, una vez establecido el bloque del controlador difuso, es necesario definir todas las estructuras auxiliares necesarias para preprocesar las entradas y postprocesar la salida del controlador a fin de que este se pueda comunicar de forma correcta con el modelo del vehículo disponible.

Para ambos controladores difusos, tal como se expuso en el Capítulo 3, el establecimiento de una cota superior permite delimitar el recorrido universal de las variables, considerándose que todo valor de entrada mayor que a la cota superior establecida se satura al valor de la cota. Esto implica que todas las entradas de los controladores deben incorporar un bloque saturador, que permita limitar la entrada a un rango de valores. Como las entradas de los controladores difusos pueden alternar de signo, la cota superior definida para el módulo del valor de las entradas en el diseño, debe especificarse como una cota superior para los valores positivos y una cota inferior para los valores negativos que tomen las variables de entrada. Los factores de normalización son simplemente ganancias, que como se mostró en el Capítulo 3, se escogen iguales a la cota superior del recorrido universal. El factor de denormalización de las salidas también es una ganancia y su valor corresponde al máximo valor numérico que puede tomar la variable manipulada del sistema. Genéricamente en la Figura 4.2 se puede observar un controlador difuso con dos entradas y una salida, tal como los diseñados en este trabajo de título, con los factores antes mencionados.

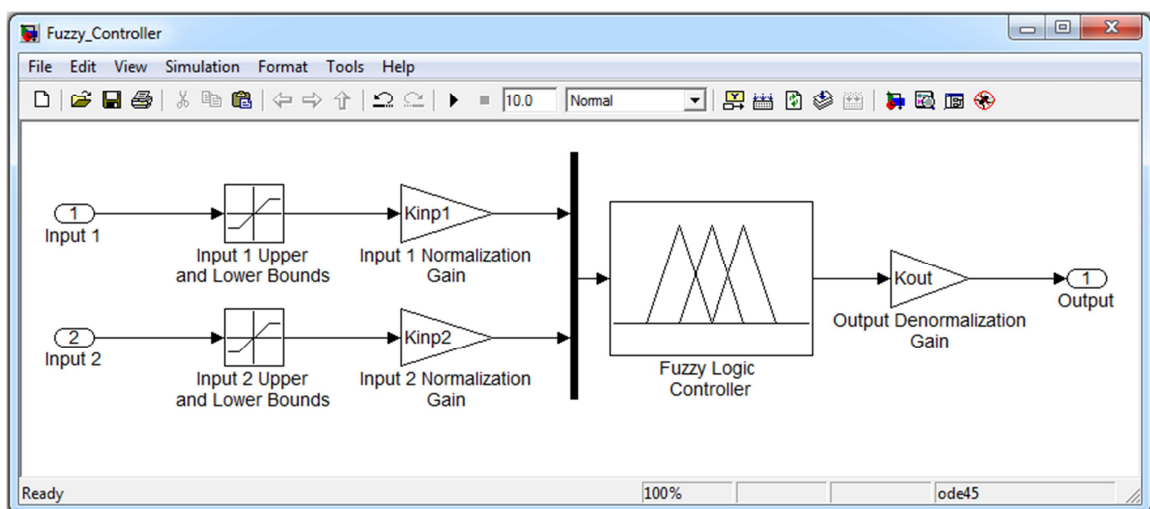


Figura 4.2 Controlador difuso genérico con dos entradas y una salida. Se puede apreciar la presencia de los saturadores para fijar las cotas superiores e inferiores de las variables de entrada y las ganancias de normalización y denormalización.

En el caso particular del controlador difuso de velocidad, la entrada del controlador son el error de velocidad y la integral del error de velocidad. El error de velocidad corresponde a la diferencia entre la referencia de velocidad y la velocidad actual, mientras que la integral se puede obtener a partir del error incorporando un bloque de la librería de objetos de Simulink denominado Integrador de tiempo discreto (Discrete-Time Integrator), el cual computa en cada tiempo de muestro de la simulación la integral, en es te caso, del error de velocidad.

Sin embargo como se describió en el capítulo de diseño del controlador difuso de velocidad, a fin de evitar los efectos nocivos de que aporta la integral al sistema (*wind-up*) es necesario no solamente integrar el error de velocidad, sino que establecer un esquema *anti wind-up*. Es importante notar que dado que el diseño de los conjuntos difusos asociados a la integral del error de velocidad se hizo en metros y la velocidad se mide en [km/h] es necesario transformar el error de velocidad a [m/s] antes de poder realizar su integración. Esto se logra incorporando una ganancia que divida el error de velocidad por 3.6. Tomando en consideración las ecuaciones discretas para la integral del error con el esquema *anti wind-up* incorporado, que se ven en (3.3), en la Figura 4.3 se ve la implementación de la integración del error de velocidad con el esquema *anti wind-up*.

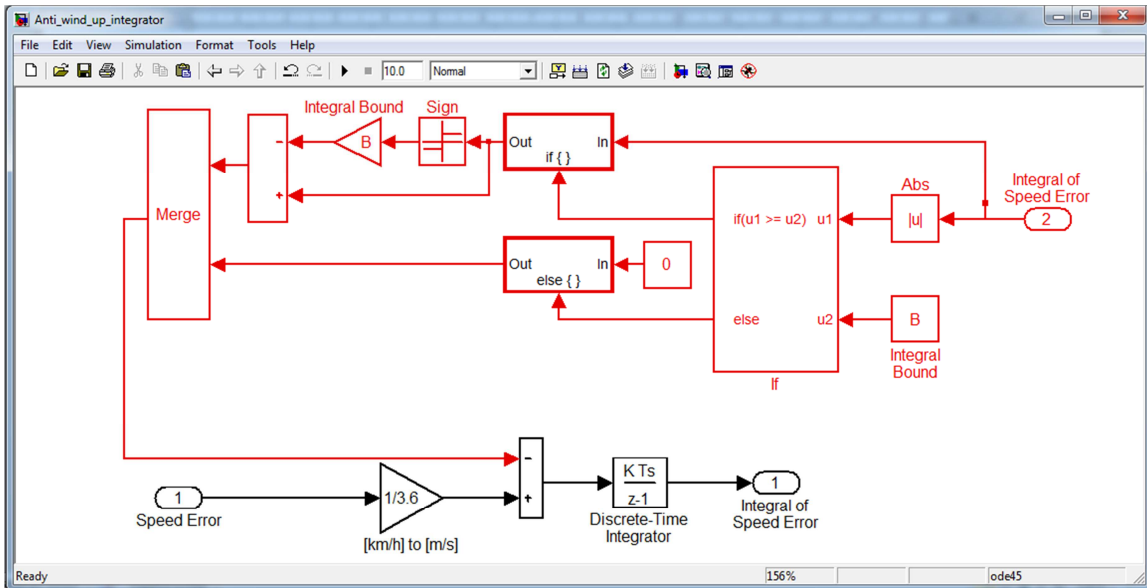


Figura 4.3 Diagrama de bloques en Simulink del integrador con el esquema *anti wind-up* incorporado. En rojo se puede ver el esquema *anti wind-up* que traduce a diagrama de bloques las ecuaciones expuestas en (3.3)

En el caso de la salida del controlador difuso de velocidad, a fin de evitar la alternación constante de signo en la salida, además del traslape del conjunto difuso “Cero”, en el diseño del controlador difuso se definió que era necesario incorporar una zona muerta que fijará un rango de

valores el recorrido universal donde la salida siguiera siendo nula. Simulink provee dentro de su librería estándar un bloque que permite definir una “zona muerta” (Dead Zone). La incorporación de este bloque a la salida del controlador permite cumplir con esta especificación de diseño.

Como la salida del controlador difuso de velocidad es única y debe manipular dos actuadores según el signo de ella, es necesario incorporar un sistema que permita accionar sólo el acelerador, si el signo de la variable de salida es positivo, y solo el freno, en caso de que sea negativo. Son las herramientas que provee Simulink existen diversas maneras de hacer esto, pero en la implementación que se realizó en este trabajo de título, se optó por utilizar un bloque de Simulink denominado “Interruptor” (Switch). Este bloque permite poseer tres entradas, permitiendo alternar entre dos posiciones (1ª y 3ª entrada) según el valor que reciba en la entrada central; funcionando de manera similar a un relé. De esta forma se puede definir que si la entrada central toma un valor superior, igual o inferior que un cierto umbral, el interruptor permita el paso del flujo de datos de la 1ª entrada y, en caso de que suceda lo opuesto al criterio establecido, de la 3ª entrada. Los factores de denormalización para la variable de salida deben incorporarse después de esta etapa de selección y al igual que para los factores de normalización corresponden a bloques de ganancias con los valores adecuados especificados en el diseño del controlador.

Considerando los valores de las cotas superiores y los factores de denormalización establecidos en el diseño del controlador difuso de velocidad, expuesto en el Capítulo 3, en la Figura 4.4 muestra la implementación del controlador difuso de velocidad en Simulink incorporando las etapas de preprocesamiento de las entradas y postprocesamiento de la salida del controlador.

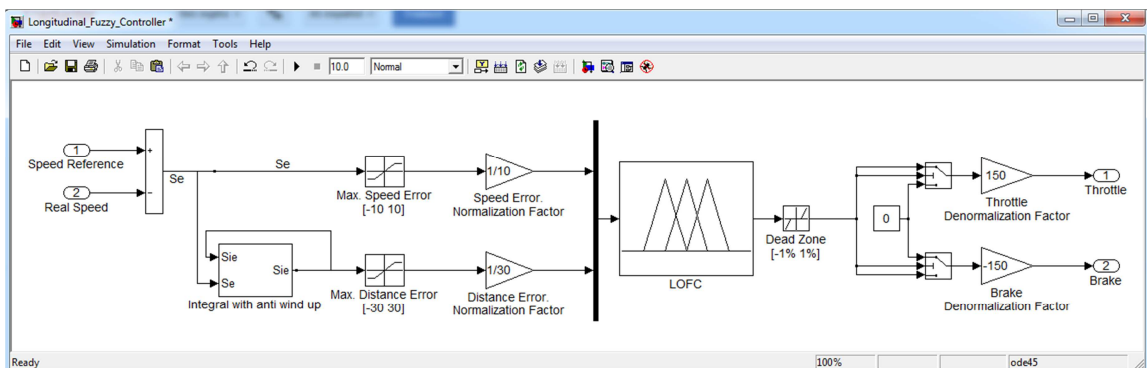


Figura 4.4 Modelo en Simulink el controlador difuso de velocidad (o controlador difuso longitudinal, LOFC, por sus siglas en inglés). En la figura se aprecian los valores definidos para las cotas de las variables de entrada y los factores de normalización y denormalización en el diseño expuesto en el Capítulo 3. A fin de simplificar la notación en el diagrama se habla de error de distancia en vez de integral del error de velocidad.

A fin de mejorar la interacción con el diseñador, y con cualquier potencial desarrollador o usuario, se incorporó una máscara al controlador difuso de velocidad que permite asignar, modificar y visualizar de manera sencilla y rápida, cualquiera de los parámetros de diseño que incorporan los bloques del modelo en Simulink del controlador difuso. En la Figura 4.5 se puede ver la interfaz de esta máscara, donde se pueden ver todos los parámetros de diseño que son posible modificar a través de dicha interfaz y sus valores por defecto de acuerdo al diseño final expuesto en el Capítulo 3 de este trabajo de título.

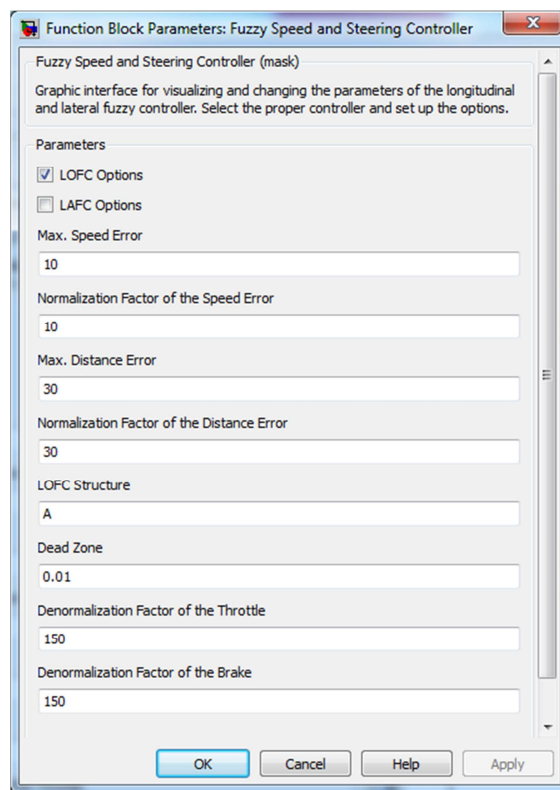


Figura 4.5 Interfaz gráfica para modificar y visualizar los parámetros actuales del controlador difuso de velocidad.

Centrándose ahora en el controlador difuso de dirección las entradas de este controlador son el error de ángulo de las ruedas y la variación del error de ángulo. El error de ángulo se computa al calcular directamente la diferencia entre el ángulo de referencia y el ángulo actual del vehículo. La variación del error de ángulo se determina a partir del error de ángulo. Como se trata de un sistema discreto para obtener la variación del error es necesario considerar la diferencia entre el error actual y el error medido en el instante de muestreo previo. Aunque en Simulink hay varias maneras de implementar esto, con distinta eficiencia y complejidad, en este trabajo de título se hará uso del bloque “Diferencia” (Difference) disponible en la librería de Simulink. Este

bloque automáticamente almacena la muestra anterior y realiza la resta entre la muestra actual y la muestra anterior almacenada. Una vez computadas estas variables se deben insertar los saturadores y los factores de normalización mencionados previamente para realizar el preprocesamiento de las entradas.

Para la variable de salida del controlador difuso de dirección, se incorporó una zona muerta filtrar las variaciones de ángulo del volante muy pequeñas, utilizando el bloque de la librería de Simulink “Zona Muerta” (Dead Zone) utilizado previamente en el controlador difuso de velocidad. El modelo con el cual se validará este controlador tiene como entrada el ángulo del volante, por lo tanto, dado que el controlador difuso provee como salida la variación del ángulo del volante, es necesario a partir de la salida determinar la posición actual del ángulo. Para esto también existen varias posibilidades de implementación, pero en este trabajo de título, dada la relación lineal entre el ángulo de las ruedas y el ángulo del volante, se consideró obtener el ángulo actual del volante a partir del ángulo actual de las ruedas, y a esa medición adicionarle la variación del ángulo del volante para finalmente obtener el ángulo actual del volante y poderlo entregar como referencia al modelo del vehículo de escala real. En la Figura 4.6 se puede apreciar la implementación del controlador difuso de dirección en Simulink, junto con el preprocesamiento de las entradas y el postprocesamiento de la salida.

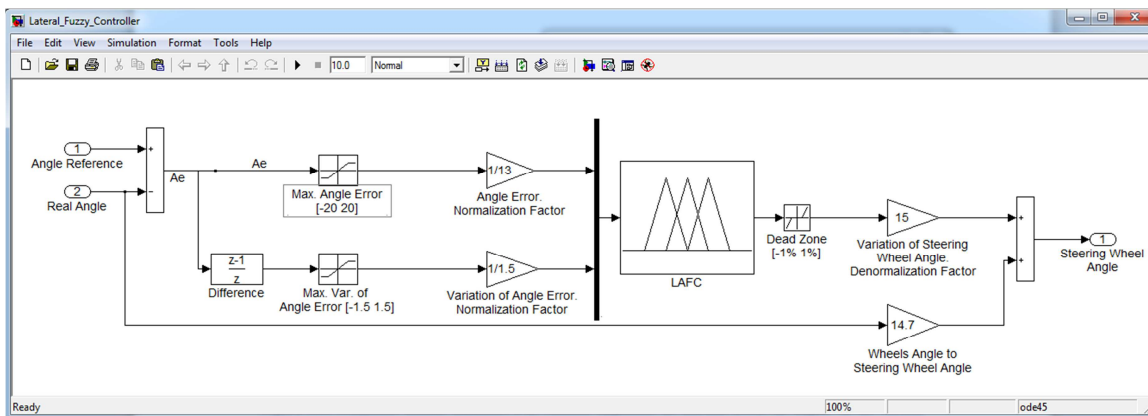


Figura 4.6 Modelo en Simulink el controlador difuso de dirección (o controlador difuso lateral, LAFC, por sus siglas en inglés). En la figura se aprecian los valores definidos para las cotas de las variables de entrada y los factores de normalización y denormalización en el diseño expuesto en el Capítulo 3. A fin de simplificar la notación en el diagrama se habla de error de ángulo y variación de ángulo para hacer referencia al error del ángulo de las ruedas y variación del error del ángulo de las ruedas.

Al igual que para el controlador difuso de velocidad, a fin de mejorar interacción con el usuario, se programó una máscara que permite asignar, modificar y visualizar los parámetros de diseños considerados en los distintos bloques que forma el modelo del controlador difuso de

dirección en Simulink. En la Figura 4.7 se puede ver la máscara diseñada para el controlador de dirección, se muestran los parámetros de diseño modificables en la máscara y los valores por defectos definidos en el diseño final del controlador difuso de dirección, expuesto en el Capítulo 3.

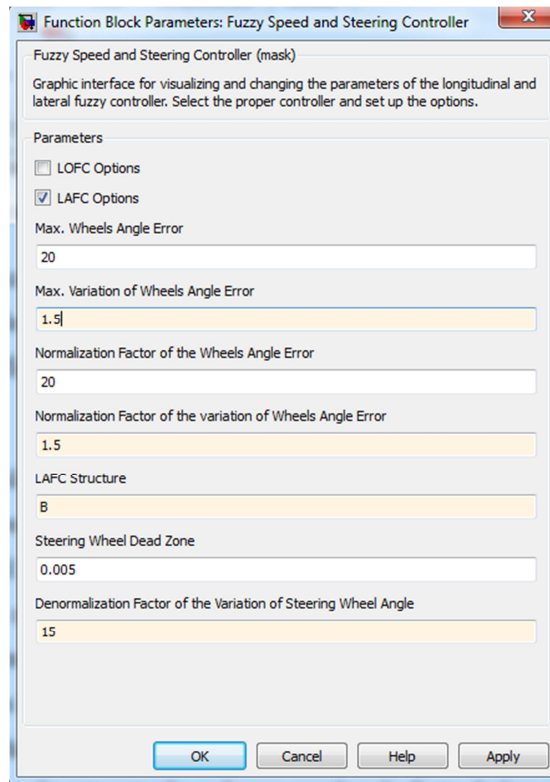


Figura 4.7 Interfaz gráfica para modificar y visualizar los parámetros actuales del controlador difuso de dirección.

A fin de simplificar la integración de los controladores difusos con el modelo se juntaron ambos controladores en un solo sistema de control difuso de velocidad y dirección como se aprecia en la Figura 4.8 el cual se utilizará para realizar las pruebas con el simulador del vehículo.

Dado que el simulador del vehículo retorna la velocidad, pero no el ángulo de las ruedas, para incorporar la posibilidad de validar el controlador difuso de dirección se implementó un bloque que relacionará el ángulo del volante con el ángulo de las ruedas del vehículo. El sistema implementado es muy sencillo y básicamente consta de una ganancia, que permite incorporar la relación lineal que hay entre el ángulo de las ruedas y el ángulo del volante, y un bloque de retardo de la librería de Simulink, denominado “Retardo entero” (Integer Delay). Este bloque retarda la señal en N tiempo de muestreo, donde en este caso se ha escogido $N = 3$. Con la incorporación de este retardo se busca emular el efecto de los actuadores que hay entre el volante y el eje de la ruedas, ya que es claro que el movimiento del volante no tiene un efecto instantáneo

en la el ángulo de las ruedas. En la Figura 4.9 se puede apreciar la implementación de este sistema Volante-Ruedas.

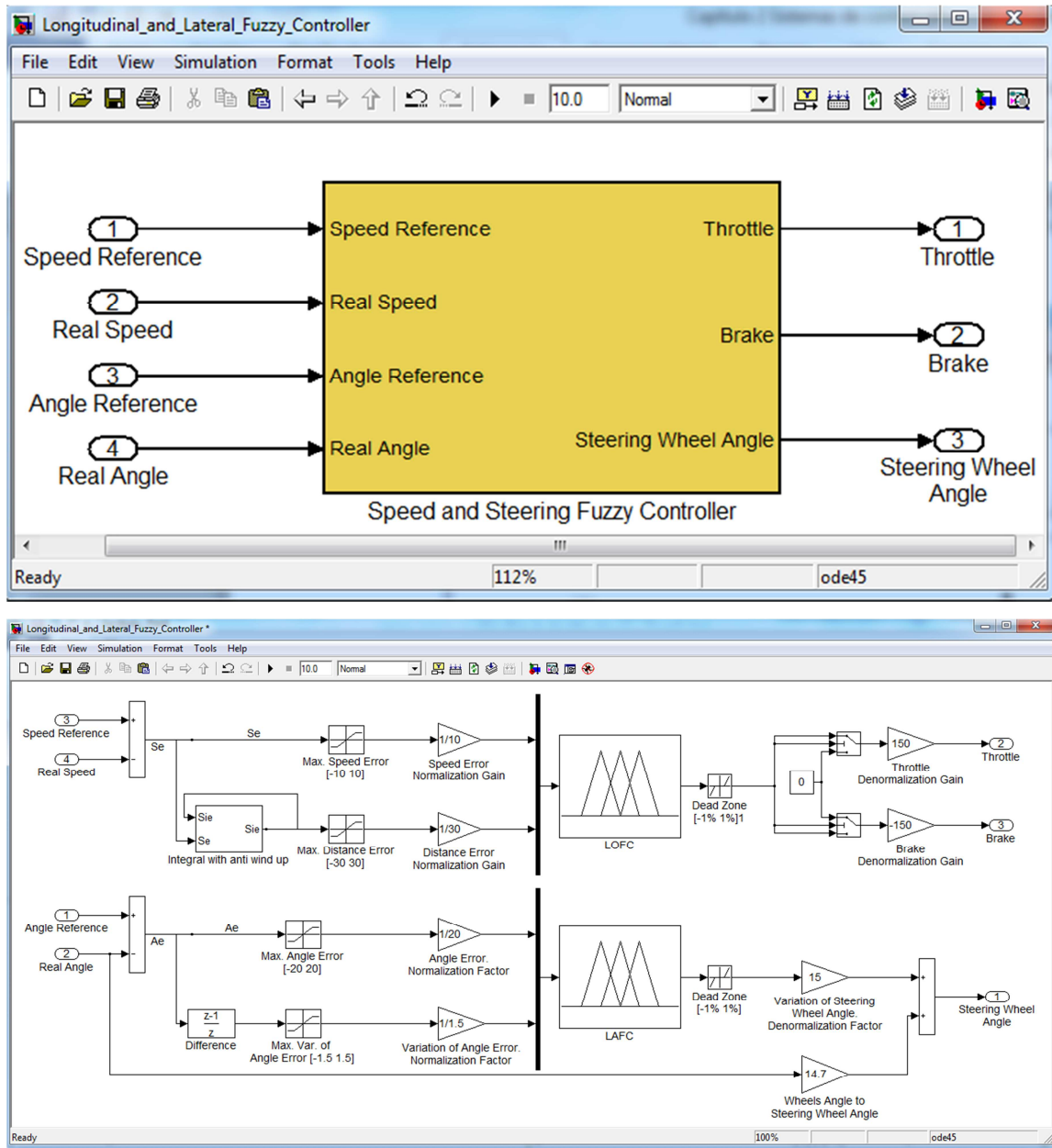


Figura 4.8 Modelo en Simulink para los controladores difusos de velocidad y dirección integrados. Arriba el bloque que integra a ambos controladores, denominado Controlador difuso de velocidad y dirección. Abajo el detalle del interior del bloque donde se aprecia la implementación previa de ambos controladores de forma independiente.

El modelo del vehículo de escala real, que da forma al simulador utilizado para validar y evaluar el desempeño de los controladores, se proveyó en forma de un bloque que tiene 3 entradas y 3 salidas, tal como se mostró en el Capítulo 3. En la Figura 4.10 se puede visualizar la integración del modelo en Simulink del controlador difuso y el modelo del vehículo de escala real. Además de estos bloques se pueden visualizar algunos visores que tienen como propósito

poder observar algunas variables de interés y dos bloques que proveen las referencias de ángulo de las ruedas y velocidad al sistema.

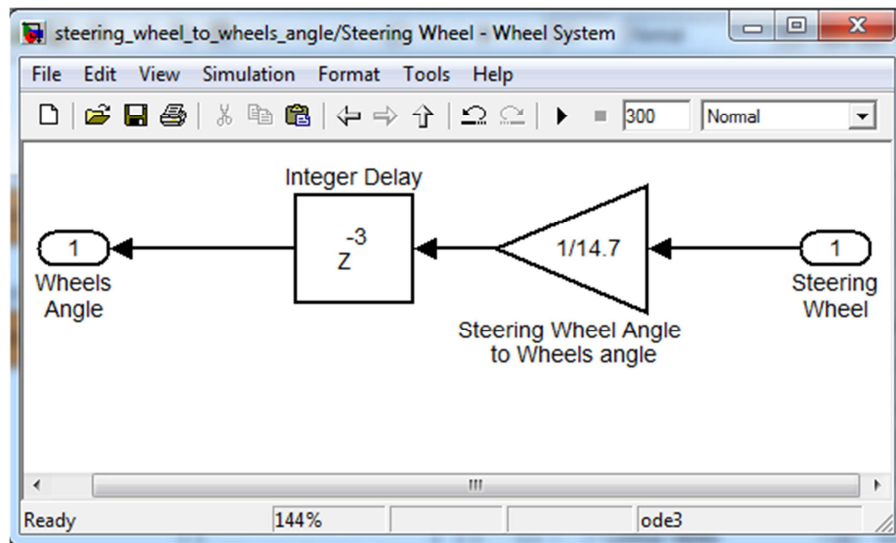


Figura 4.9 Detalle del sistema volante-ruedas implementado en Simulink.

Con la implementación mostrada en la Figura 4.10, haciendo uso de los diseños de los controladores difusos desarrollados en el Capítulo 3 de este trabajo de título, se llevaron a cabo todas las pruebas para verificar la coherencia y apreciar el rendimiento y desempeño de los controladores difusos diseñados, cuyos resultados y análisis se exponen en el Capítulo 5.

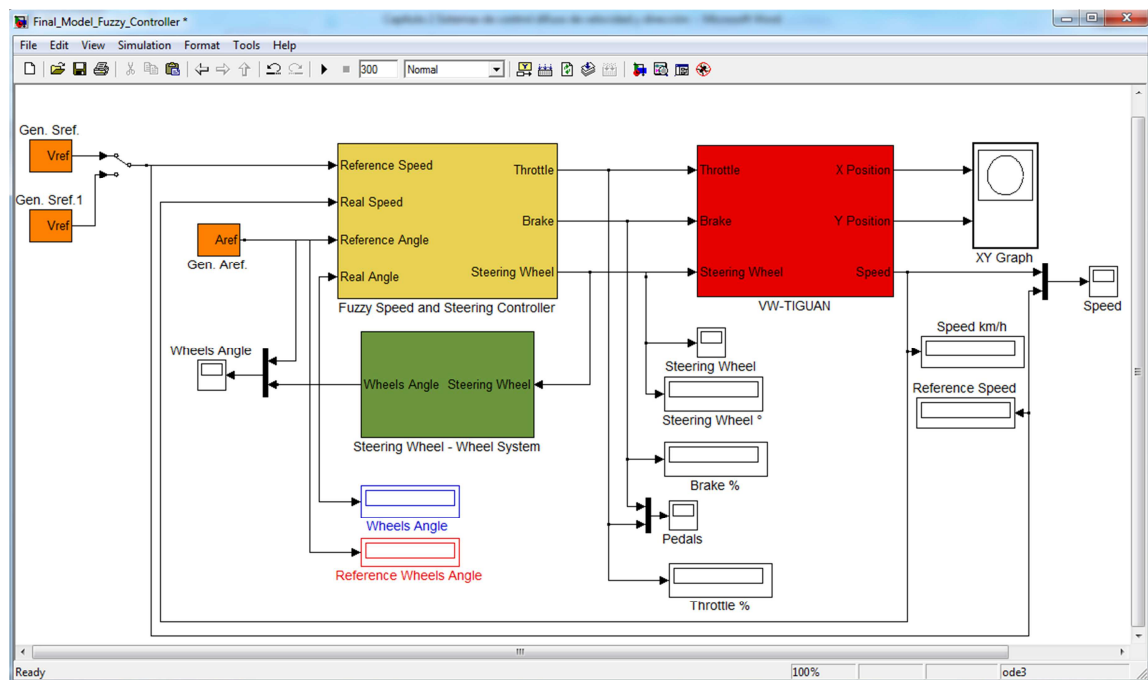


Figura 4.10 Implementación final de los controladores difusos de velocidad y dirección en Simulink; e integración con el modelo para llevar a cabo pruebas de validación y coherencia de los controladores diseñados. Se ven en la figura los distintos visores colocados para poder medir adecuadamente las variables de interés.

4.2 Implementación de los controladores difusos en C

En la implementación en un vehículo de escala real, el sistema de control difuso diseñado para supervisar la velocidad y la dirección se encontrará inserto en una plataforma computacional que estará físicamente en el interior del vehículo. El computador en el que se encontrarán programados y funcionando los controladores difusos no es un computador o laptop estándar, sino que es un computador industrial, es decir, un equipo de alto rendimiento preparado para resistir temperaturas elevadas y vibraciones por lo cual resulta apropiado para ser montado en un vehículo. Debido a que es necesario que los controladores difusos funcionen en cualquier computador, sin la necesidad de tener instalado algún software en particular, no es posible utilizar MATLAB® para realizar la integración de los controladores difusos con los actuadores y los dispositivos que proveerán las referencias a los controladores. Además de lo anterior, la gran cantidad de recursos que consume MATLAB® para funcionar y las no despreciables posibilidades que el software deje de funcionar son otros factores que condicionan el uso de este programa. Por esta razón, bajo el sistema operativo GNU/Linux, se ha optado por realizar toda la programación utilizando el lenguaje de programación C, lo que hace que los ejecutables generados con los controladores difusos sean universalmente utilizables en cualquier equipo que comparta el sistema operativo antes mencionado.

La implementación en lenguaje C de los controladores difusos diseñados incorpora problemas que no habían sido considerados al trabajar en un ambiente simulados como son los tiempos de procesamiento, tiempos de transmisión de datos y las comunicaciones entre los controladores y los otros dispositivos involucrados en el esquema de control, todo esto además de tener que portar todo el diseño realizado en la implementación en MATLAB® al lenguaje de programación C. Referente a este último punto, afortunadamente MATLAB® cuenta con extensión denominada Real Time Workshop que automáticamente genera y compila código fuente en C/C++ a partir de modelos realizados en Simulink para diseñar aplicaciones de tiempo real como la que se desea realizar en esta implementación. Esta herramienta simplifica significativamente el proceso de transferir el modelo de los controladores implementados en Simulink a código fuente en C. Esta generación de código se encarga de generar todas las librerías necesarias con los métodos e información de datos y parámetros utilizados en Simulink, en este caso en el modelo de los controladores difusos. Real Time Workshop a la vez genera un código principal genérico que puede ser modificado y compilado para obtener un archivo

ejecutable que realice las acciones implementadas en el modelo Simulink. A grandes rasgos este código principal lo que realiza es invocar cada ciertos instantes de tiempo, utilizando siempre como referencia el tiempo de muestreo utilizado en el modelo Simulink a partir del cual se generó el código, una función tipo *void* en la cual está programada todo el procesamiento de las variables de interés, fusificación, inferencia y defusificación, por lo cual esta función procesa las entradas que se le indiquen y actualiza las salidas de los controladores difusos, las que pueden ser utilizadas dentro del mismo código principal o ser enviados a otros programas para darle el uso que se le estime conveniente. El detalle del código principal generado por MATLAB® y sus comentarios se pueden ver en el Anexo B. Las librerías así como las funciones generadas por MATLAB® no son explicadas en detalle debido a su complejidad, pero dado que emulan el comportamiento del modelo de los controladores difusos en Simulink se puede referir a la Sección 4.1 para mayores detalles de esta implementación.

Es importante notar que la transferencia del modelo de los controladores difusos en Simulink al lenguaje C no se realizó íntegramente a partir del modelo de los controladores difusos expuestos en la Sección 4.1, sino que se excluyeron las etapas de preprocesamiento de las entradas y el postprocesamiento de las salidas. Específicamente del preprocesamiento fueron excluidos el cálculo de los errores, integrales del error y variaciones del error de las variables de entrada, y en el postprocesamiento se excluyó la obtención del ángulo actual del volante. La razón de estas exclusiones se debe a que, como se indicaba anteriormente, el procesamiento de las entradas y la actualización de las salidas en el código principal de los controladores difusos se realiza de acuerdo al tiempo de muestro utilizado en Simulink para realizar las simulaciones; y es en este punto donde se presenta el problema ya que los tiempos de muestreo utilizados en Simulink son del orden de [ms] mientras que en la implementación de escala real que se desea realizar, los datos son transmitidos y recibidos con tiempos del orden de [μ s]. Esto implica, por lo tanto, que los datos deben procesarse más rápido que los tiempos de muestreo y ejecución de los controladores. Por ello, a fin de poder procesar los datos de entrada y salida de los controladores correctamente, todo el preprocesamiento de las entradas y el postprocesamiento de la salida de los controladores difusos serán programados separadamente y siendo excluidos al transferirse el modelo de los controladores difusos desde Simulink a C. El programar de manera independiente el preprocesamiento y postprocesamiento permitirá procesar los datos de entrada y salida de los controladores a medida que estos sean recibidos o solicitados, tiempo del orden de [μ s], independientemente de los tiempos de ejecución de los controladores difusos en sí. En la Figura

4.11 se pueden ver los bloques del modelo de Simulink que fueron transferidos al lenguaje C utilizando Real Time Workshop.

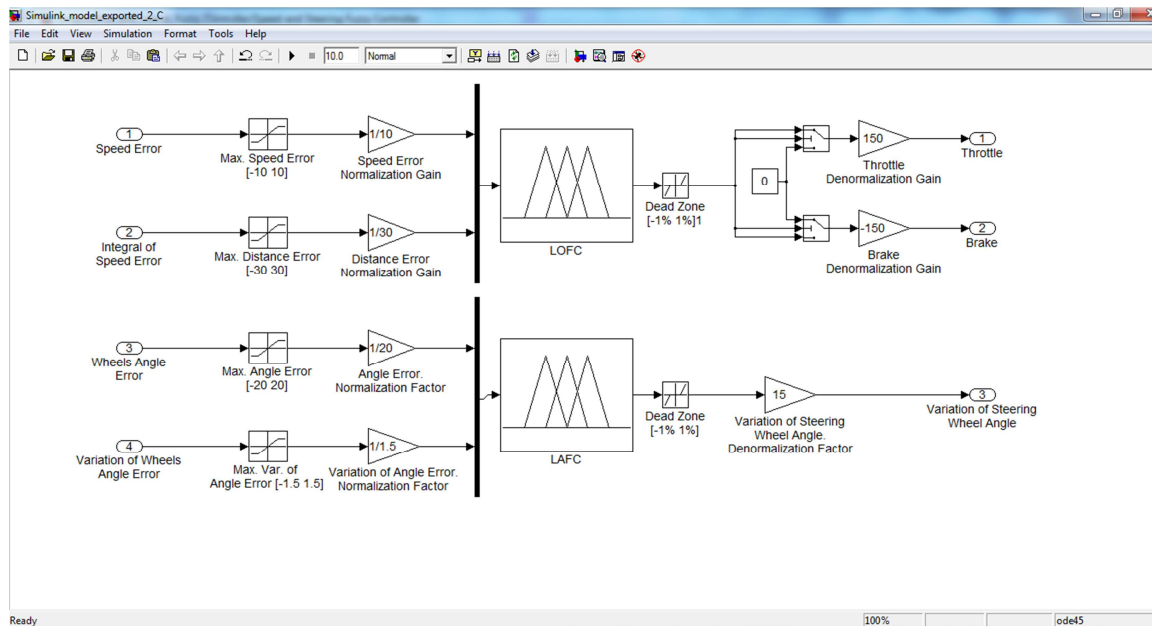


Figura 4.11 Componentes del modelo del sistema de control difuso de velocidad y dirección exportados a lenguaje C mediante Real Time Workshop.

Respecto a los problemas adicionales a la transferencia de los controladores difusos desde Simulink a un ejecutable compilado a partir de un programa en C, el de mayor relevancia para la implementación es el relacionado con la implementación de las comunicaciones entre los controladores difusos, es decir, entre el computador en que estén corriendo los programas asociados a estos controladores, y el resto de los dispositivos. En la Figura 4.12 se puede visualizar esquemáticamente la conexión entre los controladores difusos y los otros dispositivos físicos con los que deberán interactuar. La comunicación entre los controladores y los otros dispositivos se realizará a través de los puertos seriales del computador, por lo que el código que se genere para las comunicaciones debe considerar el poder manipular correctamente estos puertos. Como se puede apreciar en la Figura 4.12, los controladores interactúan básicamente con dos dispositivos: (i) Control remoto o sistema de control supervisor y (ii) PIC encargado de realizar la interfaz entre los controladores difusos y los actuadores del vehículo. Cada uno de estas partes que componen el sistema de escala real requiere un canal de comunicaciones dedicado, por lo que el programa encargado de las comunicaciones deberá monitorear paralelamente dos puertos seriales, cada uno asociado a un dispositivo. En el caso de la comunicación con el control remoto, o el control supervisor, esta es de carácter unidireccional, ya

que solamente ellos se comunican con los controladores difusos para proveer las referencias de velocidad y ángulo de las ruedas. En el caso del PIC la comunicación es bidireccional, ya que los controladores le envían las referencias de ángulo del volante, y apertura de los pedales de aceleración y freno; y el PIC envía a los controlares la velocidad y ángulo de las ruedas actuales. A fin de estandarizar las comunicaciones de entre los distintos dispositivos que forman parte del sistema de control y actuación, dentro del proyecto del AMTC en el que se enmarca este trabajo de título, se definió un protocolo de comunicaciones en base al cual se deberá programar la interfaz de comunicaciones de los controladores difusos. En la Figura 4.13 se puede visualizar el formato del mensaje utilizado en el protocolo de comunicaciones y en la Tabla 4.1 se puede apreciar la interpretación de cada parte constituyente del mensaje.

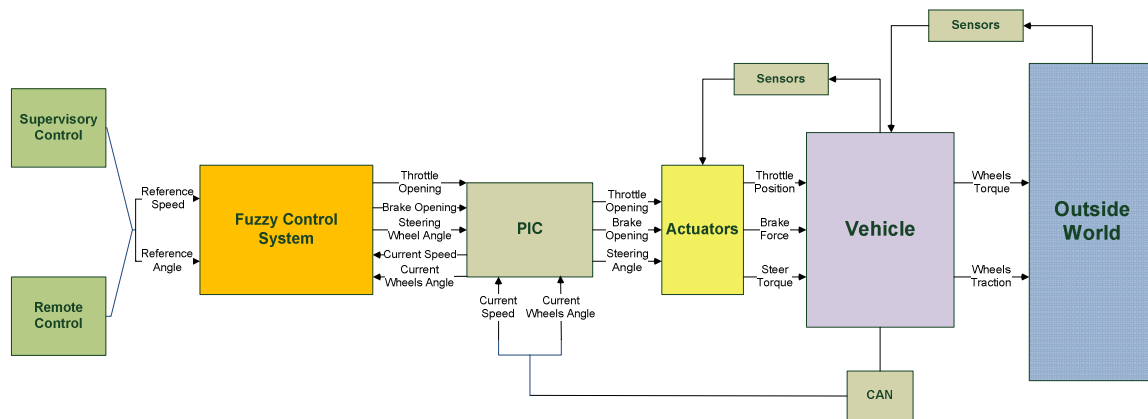


Figura 4.12 Diagrama de conexiones del sistema de control y actuación del vehículo autónomo donde se implementarán los controladores difusos de velocidad y dirección.

El protocolo de comunicación establece, además de la estructura del mensaje, otras disposiciones como la forma en que se deben solicitar los datos, el tipo de datos que deben tener la información que se transmite y el largo de cada “byte” de datos. Además define que constantemente debe enviarse una señal denominada *Ping alive* que permite dar a conocer a los otros dispositivos que el módulo que está transmitiendo o recibiendo mensajes está funcionando correctamente. La correcta implementación de esta característica del protocolo de comunicaciones resulta fundamental para poder activar los procedimientos de emergencia que se establezcan en caso de falla de cualquiera de los módulos que forman parte del sistema de control, actuación y sensores.

0xFF	0xFF	ID	Length	Command	Data MSB	...	Data LSB	Checksum
------	------	----	--------	---------	----------	-----	----------	----------

Figura 4.13 Formato del mensaje según el protocolo de comunicaciones. El largo máximo de un mensaje son 259 bytes (253 bytes de datos). El mensaje está compuesto por 6 partes: encabezamiento, identificación del dispositivo (ID), Largo de paquete de datos (Length), comando a realizar (Command), datos (Data MSB a Data LSB) y suma para corrección de errores (Checksum).

Componente	Descripción	Tamaño
0xFF	Corresponde al encabezamiento del mensaje. Ningún paquete del mensaje puede tomar este valor.	2 bytes
ID	Es el identificador del dispositivo al que va dirigido el mensaje. 0xFE dirige el mensaje a todos los dispositivos que estén escuchando.	1 byte
Length	Largo de los datos y el comando en bytes. El largo total máximo es 0xFE.	1 byte
Command	Comando a realizar. Se pueden disponer hasta 0xFE comandos.	1 byte
Data	Los datos se separan en “bytes” de 7 bits cada uno. Se envían de forma decreciente el byte más significativo hasta el menos significativo.	Hasta 253 bytes
Checksum	Corresponde a los 7 bits menos significativos de la suma de ID, Length, Command y Data.	1 byte

Tabla 4.1 Descripción y tamaño de los paquetes que componen el mensaje definido en el protocolo para transmitir y recibir información entre los diferentes dispositivos.

Con el propósito de ordenar la programación y poder testear de forma independiente las funcionalidades de la comunicación y el procesamiento de los datos, la comunicación de los controladores difusos con el medio externo se dividió en tres módulos que funcionan en paralelo junto al módulo de control, todos los cuales se encuentran comunicados internamente entre sí a nivel de software. De los tres módulos mediante los cuales se implementan las comunicaciones de los controladores con los otros dispositivos, un programa está encargado de la lectura de los datos y el preprocesamiento de las entradas, otro módulo está a cargo de enviar los datos asociados a la salida de los controladores y otras señales y finalmente el último módulo chequea el funcionamiento de todos los programas asociados a los controladores y la comunicación y da aviso del correcto o mal funcionamiento del sistema de control en general. A fin de simplificar la referencia a los módulos antes mencionados, estos se denominaron READ, WRITE y ALIVE respectivamente. En la Figura 4.14 se puede ver la comunicación interna a nivel de código entre los distintos programas asociados a cada módulo y las variables que son enviadas y/o recibidas por cada uno de ellos.

El módulo READ es el encargado de estar monitoreando los datos recibidos en los puertos seriales, tanto los datos asociados a referencias de alguna variable (provenientes desde el control

remoto o el control supervisor) o a valores actuales de las variables de interés de los controladores (provenientes del PIC). Este módulo se asegura que los datos recibidos cumplan con el protocolo de comunicaciones establecido y revisa la integridad de los mismos. Una vez recibida una referencia o un valor actual de una variable de manera íntegra y correcta, lleva a cabo el preprocesamiento de las variables y almacena los datos hasta que estos sean requeridos por los controladores. En este programa también se preocupa de enviar todas las entradas requeridas por los controladores cuando son solicitadas por el módulo de control, así como de enviar un señal al módulo WRITE cuando algún dispositivo externo solicita algún dato asociado a las salidas de los controladores. De forma adicional a las tareas antes mencionadas el módulo READ cumple una labor esencial en el monitoreo del estado del programa y de las comunicaciones, ya que se encarga de enviar el estado de funcionamiento propio y el del módulo de control al módulo ALIVE. Mayores detalles del código y las funciones utilizadas para la programación del módulo READ se puede visualizar en el Anexo C.

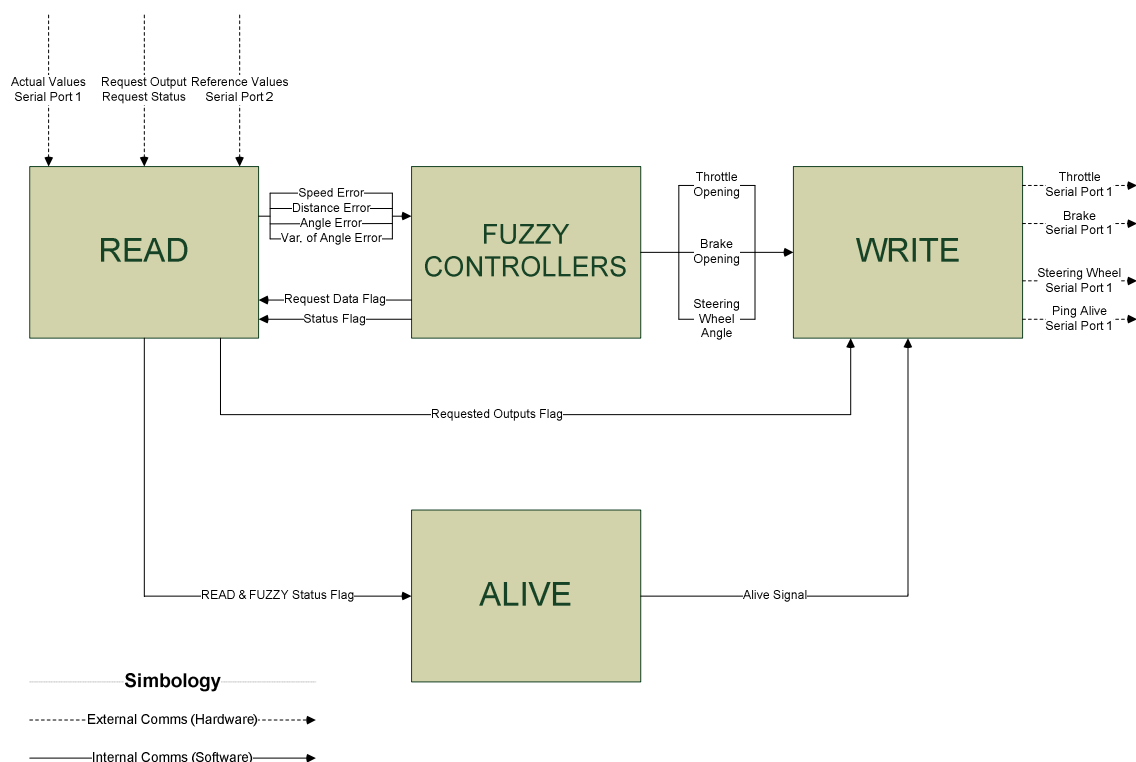


Figura 4.14 Diagrama de bloques de los módulos que componen el programa que implementa los controladores difusos de velocidad y dirección.

El módulo WRITE es el encargado de enviar mediante uno de los puertos seriales los mensajes con las referencias de ángulo de volante y apertura de los pedales para que el PIC las dirija a los actuadores. Mediante un *buffer* almacena los últimos valores disponibles de las

salidas de los controladores, de tal forma que si el módulo READ recibe una petición de alguna variable de salida en particular, al informarle al módulo WRITE este pueda enviar inmediatamente el dato solicitado. Los datos sobre el ángulo del volante y la apertura de los pedales son obtenidos desde módulo de control a través de una comunicación interna entre los programas. Junto a las tareas antes mencionadas, este módulo también envía los mensajes con la información proveniente desde el módulo ALIVE que dan cuenta del estado de los programas asociados a cada módulo y las comunicaciones entre los controladores difusos y los dispositivos externos al computador³. En el Anexo D se puede apreciar íntegramente el código del módulo WRITE junto con los respectivos comentarios de las funciones utilizadas para su implementación.

El módulo ALIVE es aquel que supervisa el correcto funcionamiento de los programas que constituyen el sistema de control difuso, la operación normal de los canales de comunicación con los dispositivos externos y envía información al módulo WRITE donde indica el estado del sistema y en cuantos milisegundos se enviará el siguiente reporte de estado a los dispositivos externos. Técnicamente la implementación de este módulo monitorea exclusivamente el funcionamiento del módulo de control y el módulo READ. El funcionamiento de sí mismo y el del módulo WRITE no son supervisados ya que, si alguno de estos programas fallan, no se enviarán más reportes de estado, lo cual dará cuenta de que hay un error en el sistema de control difuso y que se deben activar los sistemas de emergencias implementados en el vehículo de escala real. El funcionamiento de este módulo se basa en el uso de temporizadores que permiten medir el tiempo transcurrido desde el envío del último reporte de estado y así poder enviar a tiempo el siguiente reporte. Dado que en cada reporte de estado que envía el módulo ALIVE se indica al dispositivo receptor del mensaje en cuanto tiempo más se debiera recibir el siguiente reporte, a fin de evitar fallas por retardos en la comunicación entre los controladores y los dispositivos externos, en la implementación de este módulo se determinó que el tiempo real en el que se enviará el siguiente reporte será 0.8 veces el tiempo indicado en el reporte de estado previo. Además de enviar regularmente los reportes de estado este módulo se preocupa de procesar las solicitudes de estado recibidas por el módulo READ, enviando inmediatamente la respuesta independiente del tiempo restante para enviar el siguiente reporte. Los detalles de la

³ Dispositivos externos hace referencia a todo lo que no encuentra integrado a la plataforma computacional utilizada, como los actuadores, PIC y control remoto.

programación de este módulo así como las funciones y métodos utilizados en el código pueden verse en detalle en el Anexo E.

La integración de todos los módulos son implementados mediante un programa que se preocupa de establecer las comunicaciones internas entre los diferentes módulos y realizar la ejecución en paralelo de todos ellos. En el Anexo F se puede el código fuente de este programa integrador en detalle.

La compilación de este programa es el que permite generar un archivo ejecutable que implementa los controladores de lógica de velocidad y dirección junto con las interfaz de comunicaciones necesaria, y según el protocolo de comunicaciones especificado, lo que permite que el sistema de control difuso de velocidad y dirección pueda interactuar con los dispositivos físicos y virtuales necesarios para poder supervisar las variables de interés del vehículo de escala real. Esta implementación final expuesta en este capítulo es la que se utilizará para realizar las pruebas y validación de los controladores difusos en el vehículo de escala real, lo cual forma parte del trabajo futuro de esta Memoria.

5. Resultados

La evaluación del desempeño, coherencia y estabilidad de los controladores difusos de velocidad y dirección implica la realización de diferentes pruebas exhaustivas, de modo de reunir suficiente información como para hacer una valoración correcta sobre el rendimiento general de los controladores.

En el caso del presente trabajo, todas las pruebas de los controladores de velocidad y dirección se realizaron utilizando el simulador de un vehículo de escala real, basado en un automóvil Volkswagen® Tiguan (presentado y descrito en el Capítulo 3). Los controladores difusos se probaron considerándose diferentes referencias y puntos de operación a fin de poder evaluarlos en un amplio rango de operación. También se consideraron pruebas en un ambiente perturbado con el propósito de estudiar la respuesta a las perturbaciones de los controladores diseñados.

A continuación se exponen, detallan y analizan los resultados obtenidos como parte del proceso de evaluación de los controladores difusos de velocidad y dirección que fueron diseñados en este trabajo de Título.

5.1 Evaluación del controlador difuso de velocidad

Las pruebas realizadas con el controlador difuso de velocidad pretenden evaluar el desempeño de dicho controlador en el seguimiento de perfiles de referencia para la velocidad del vehículo, lo que implica valorarlo frente a cambios bruscos de puntos de operación y transiciones paulatinas; todo en un amplio rango de velocidades y considerando perturbaciones. Estas pruebas permiten apreciar, en un ambiente simulado, las respuestas del controlador frente a situaciones que se observan frecuentemente en un ambiente real. Además de las pruebas típicas mencionadas previamente, se experimentará cambiando los parámetros del controlador difuso de velocidad para visualizar el efecto de estos cambios y observar la sensibilidad del controlador frente a estas modificaciones. En el caso de las pruebas realizadas con el controlador difuso de velocidad todas consideran que el vehículo se desplaza en línea recta con un ángulo de las ruedas de 0° .

La primera prueba considera el seguimiento de un perfil de velocidad basado en escalones para simular el efecto de cambios bruscos de puntos de operación. En esta prueba no se consideraron perturbaciones de ningún tipo. El controlador difuso evaluado corresponde al diseñado en el Capítulo 3, considerando los conjuntos difusos de entrada y salida expuestos en la Figura 3.2, Figura 3.4 y Figura 3.6; junto a la base de reglas que se puede visualizar en la Tabla 3.1. En la Figura 5.1 se puede apreciar la respuesta del sistema frente a la referencia de velocidad.

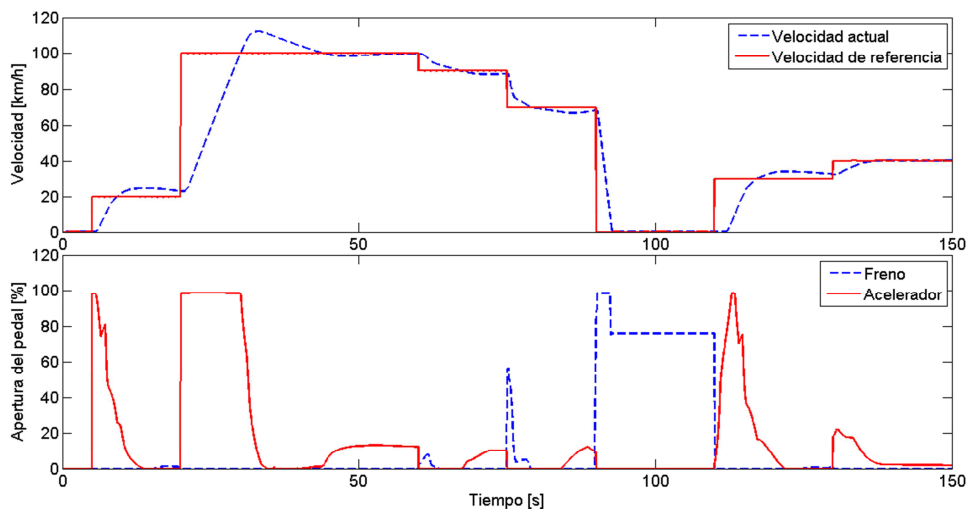


Figura 5.1 Respuesta del sistema frente a una referencia de velocidad basada en escalones utilizando el diseño preliminar para el controlador difuso de velocidad expuesto en la Sección 3.1. En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

De los resultados obtenidos se puede apreciar que el controlador cumple el objetivo de seguir la referencia de velocidad propuesta, ejerciendo las acciones de control adecuadas. Este resultado es coherente con lo esperado, ya que dado que el diseño del controlador difuso de velocidad se realizó pensando en realizar una acción de control similar a un controlador PI clásico, es decir, que buscará llevar el error permanente de velocidad a la vecindad de cero. La presencia de sobreoscilaciones también es característica de los controladores PI difusos. Este primer resultado sugiere que el diseño del controlador es correcto, ya que éste tiene una respuesta congruente con los sustentos teóricos en base a los cuales se planteó el diseño del mismo. La variable manipulada también da prueba de la correctitud del diseño, ya que se puede observar que la variable manipulada emula las acciones de un conductor humano en la búsqueda de alcanzar las referencias de velocidad, tal como se había ideado al momento de diagramar el diseño del controlador.

Dado el aparente buen desempeño del controlado, el cual debe ser refrendado mediante pruebas adicionales, frente a una referencia de tipo escalón resulta evidente que frente a otras referencias orden mayor los resultados debieran ser similares e incluso mejores. Sin embargo, al analizar los tiempos de estabilización y la sobreoscilación máxima obtenida para cada punto de operación resulta patente que el controlador requiere algunos ajustes para mejorar su rendimiento. La definición de los requerimientos deseados para efectos de análisis se realizó utilizando la información disponible que se tiene de un vehículo de escala real. En particular, se fijó el sobrenivel máximo tomando en consideración que resulta deseable que, considerando especialmente velocidades urbanas, la banda de error máximo sea de 5 [km/h]. Esto se traduce en un sobrenivel máximo de 10% lo que asegura el cumplimiento del requisito antes citado y da un margen de holgura suficiente a las velocidades más elevadas. La definición del tiempo de estabilización es más compleja, ya que dado que el controlador funciona en un amplio rango de velocidades, resulta evidente que el tiempo de estabilización no es el mismo al pasar de 0 a 100 [km/h] que al pasar de 40 a 50 [km/h]. Por ello resulta más adecuado hablar de un tiempo de estabilización normalizado, es decir, el tiempo de estabilización dividido por la magnitud del cambio de velocidad. De esta forma se tiene el tiempo de estabilización para un escalón unitario y se puede definir independiente de la velocidad en que se trabaje. Considerando que según el fabricante el tiempo que demora el vehículo en ir de 0 a 100 [km/h] es 10.4 [s], a fin de dejar un margen para los cambios de velocidad menores, se decidió en fijar el tiempo de estabilización normalizado en $0.15 \left[\frac{s}{km/h} \right]$. Con esto quedan definidos los requisitos principales en base a los cuales se analizarán los resultados que se exponen a continuación. En la Tabla 5.1 se pueden apreciar los tiempos de estabilización y sobreoscilación máxima para cada punto de operación que componen el perfil de velocidades utilizado como referencia.

De la Tabla 5.1 también se desprende que la mayoría de los cambios de velocidad que involucran una diferencia igual o superior a 20 [km/h], particularmente en la aceleración, tienen un tiempo de estabilización normalizado superior a $0.15 \left[\frac{s}{km/h} \right]$ y/o un sobrenivel máximo superior a 10%. Es importante notar que cuando se utiliza una referencia de velocidad cero no hay sobrenivel como se esperaría frente a un cambio de referencia de la magnitud que se indica en la Figura 5.1, pero eso es una situación ficticia generada por la saturación inferior de la variable controlada a cero, razón por la cual no se aprecia el sobrenivel. Desde el punto de vista

de diseño del controlador difuso de velocidad, el ajuste del tiempo de estabilización⁴ y el sobrenivel máximo pasa por modificar los conjuntos difusos, cambiar la base de reglas o ambas. La elección de que parámetro de diseño es necesario modificar no es sencilla y requiere un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos.

Referencia velocidad [km/h]	Cambio de velocidad [km/h]	Sobrenivel máximo [%]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de estabilización normalizado [s (km/h) ⁻¹]
20	+20	24	21.3	1.07
100	+80	12.5	19.4	0.24
90	-10	2.3	2.5	0.25
70	-20	4.3	2.2	0.11
0	-70	0	2.7	0.04
30	+30	13.6	22.4	0.75
40	+10	0.4	2.4	0.24

Tabla 5.1 Tabla comparativa para las distintas referencias de velocidad para sobrenivel máximo y tiempo de estabilización. Se muestra también el tiempo de estabilización normalizado que corresponde a la división entre el tiempo de estabilización y la magnitud del cambio de velocidad que sufre la referencia.

Una primera aproximación a la solución, que apunta principalmente a disminuir el sobrenivel máximo, consiste en modificar el factor de normalización y la cota superior del recorrido universal de los conjuntos difusos asociados a la variable de salida del controlador difusos de velocidad, manteniendo intacta la base de reglas y las variables de entrada del controlador. En la Figura 5.2 y la Figura 5.3 se pueden apreciar los resultados obtenidos, los cuales dan cuenta que se puede obtener una reducción significativa del sobrenivel máximo en el caso de referencias superiores a 40 [km/h], pero a costa de aumentar el tiempo de estabilización en más un 50% en los casos más extremos y tener sobreniveles máximos superiores al 25% para las referencias inferiores a 40 [km/h]. Resulta evidente que esta alternativa nos resulta factible

⁴ El tiempo de estabilización es directamente proporcionales al tiempo de estabilización normalizado. Por lo tanto, las modificaciones que sufre el tiempo de estabilización son equivalentes a las que sufre el tiempo de estabilización normalizado, por lo que se hablará indistintamente de ambas para efectos de modificaciones.

para la aplicación que se está desarrollando, por lo que las modificaciones deben apuntar a modificar los conjuntos difusos asociados a las variables de entrada del controlador y/o a la base de reglas.

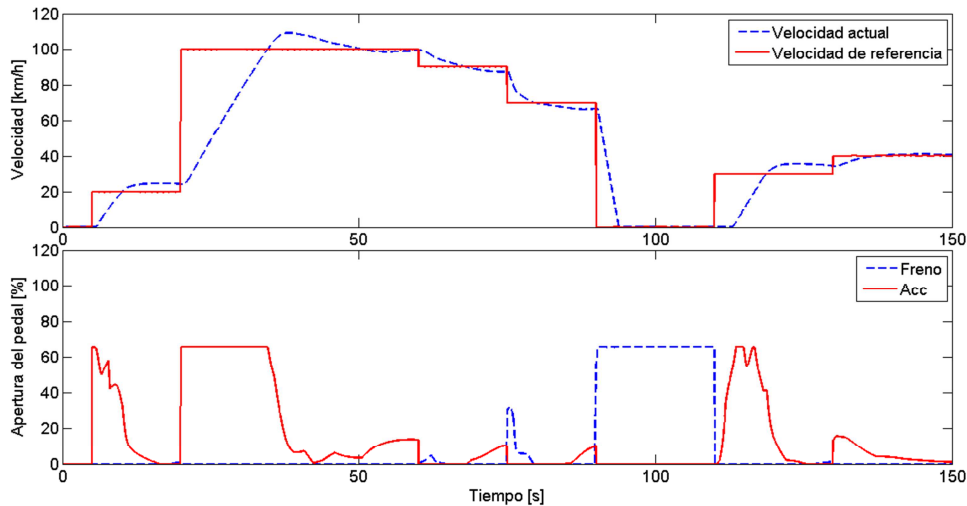


Figura 5.2 Respuesta del sistema al modificar el factor de denormalización de la variable de salida a $K_{acc}=K_{brk}=67\%$. En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

Al observar los resultados de la Figura 5.1 y la Tabla 5.1 se aprecia que, considerando los casos en que el cambio de punto de operación involucra más de 20 [km/h], se presentan dos situaciones que requieren un análisis diferenciado: (i) cuando la velocidad de referencia es inferior a los 40 [km/h] y (ii) cuando es superior a los 40 [km/h]. Tomando en cuenta el primer caso, en la Figura 5.1 se puede apreciar que el error de velocidad para las referencias de velocidad en ningún caso supera los 8 [km/h], siendo en general inferior a 5 [km/h]. De la forma en que están definidos los conjuntos difusos asociados a la variable error de velocidad, según la Figura 5.1, se puede apreciar que si se tiene un error de velocidad de 5 [km/h] este tiene un grado de pertenencia 0.5 al conjunto difuso “Cero” y un grado de pertenencia 0.5 al conjunto difuso “Medio”. Claramente, si el error de velocidad es inferior a 5 [km/h] el error velocidad será más cercano al conjunto difuso “Cero” lo cual desde el punto de vista de un conductor humano implica que ya se alcanzó a un grado razonable la referencia. Sin embargo, como las velocidades en el caso que se está analizando son comparables con los errores de velocidad medidos se obtienen sobreoscilaciones que escapan de los rangos deseados. Aunque una modificación a la base de reglas pudiera resultar efectiva en este caso para disminuir el sobrenivel máximo y

mejorar el tiempo de estabilización, un análisis de las reglas gatilladas para el caso de las velocidades muestra que las mayoría de las reglas gatilladas corresponden a aquellas que se encuentran en el centro del mapa de reglas. Estas reglas forman el núcleo de la base de reglas y tienen una influencia muy significativa en la estabilidad y robustez del sistema, razón por la cual su modificación no resulta recomendable. En vista de esto, los resultados obtenidos para este caso sugieren que la modificación a realizar debe ser acotar el recorrido universal de la variable “Error de velocidad”. Al acotar el recorrido universal de esta variable de entrada, el error de velocidad que se considera nulo, es decir, que tiene un grado de pertenencia significativo en el conjunto difuso “Cero” disminuye; lo cual permite realizar acciones de control que apunten a disminuir el sobrenivel máximo de la variable controlada. Considerando que un conductor humano difícilmente puede percibir errores de velocidad inferiores a 5 [km/h] junto a la realización de pruebas mediante ensayo y error, se determinó que la cota superior y el factor de normalización adecuados para la variable de entrada error de velocidad se fijaría en 10 [km/h]. En la Figura 5.4 y la Figura 5.5 se observan los resultados que condujeron a esta elección de diseño al probar con diferentes cotas. Esta modificación se ve reflejada en la Figura 3.7 del diseño del controlador difuso de velocidad.

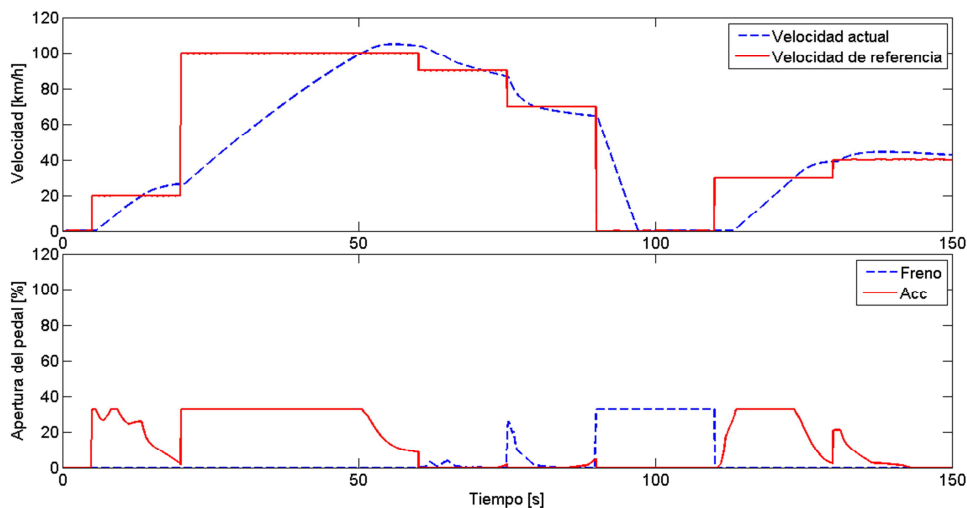


Figura 5.3 Respuesta del sistema al modificar el factor de denormalización de la variable de salida a $K_{acc}=K_{brk}=34\%$. En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

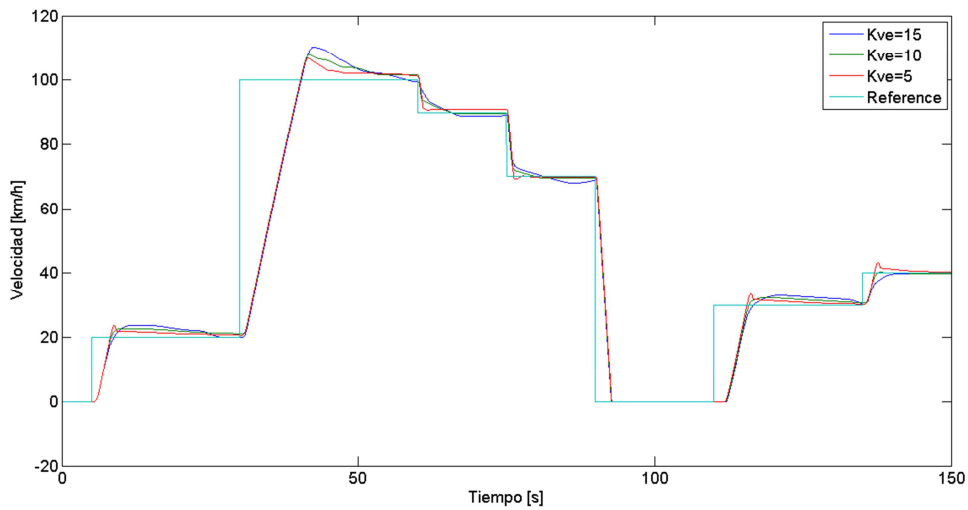


Figura 5.4 Respuesta del sistema modificando la cota superior y el factor de normalización de los conjuntos difusos asociados al error de velocidad. Los valores utilizados son $K_{ve}=15$ [km/h] (azul), $K_{ve}=10$ [km/h] (negro) y $K_{ve}=5$ [km/h] (rojo). El perfil de velocidad usado como referencia se visualiza en color cian.

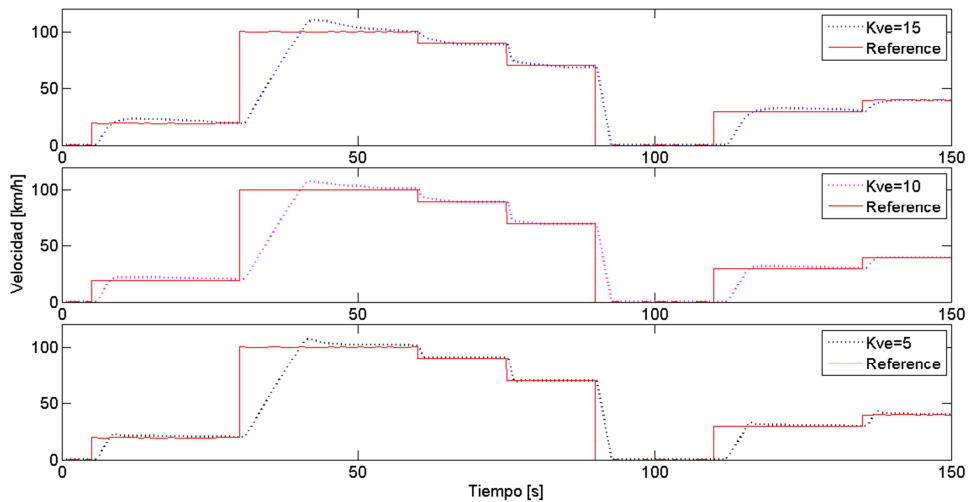


Figura 5.5 Desglose de los resultados obtenidos en la Figura 5.4 al modificar la cota superior y el factor de normalización para el error de velocidad. De arriba abajo los valores utilizados son $K_{ve}=15$ [km/h], $K_{ve}=10$ [km/h] y $K_{ve}=5$ [km/h].

Se observa que la modificación realizada contribuye a disminuir el sobrenivel máximo para referencia de velocidad superiores a 40 [km/h], lo cual corresponde al caso (ii), ya que al disminuir el recorrido universal de la variable error de velocidad el controlador actúa más rápido, lo que permite disminuir el error de seguimiento. En la Tabla 5.2 se muestran los nuevos valores medidos para el tiempo de estabilización y sobrenivel máximo con esta modificación.

Referencia velocidad [km/h]	Cambio de velocidad [km/h]	Sobrenivel máximo [%]	Tiempo de estabilización [s]	Tiempo de estabilización normalizado [s (km/h) ⁻¹]
20	+20	13.5	25	1.25
100	+80	8	16.1	0.20
90	-10	0.7	1.57	0.157
70	-20	0.8	1	0.05
0	-70	0	2.7	0.04
30	+30	7.8	17.2	0.57
40	+10	0.4	1.87	0.187

Tabla 5.2 Tabla comparativa para las distintas referencias de velocidad para sobrenivel máximo y tiempo de estabilización. Para la generación de esta tabla se usó para la variable error de velocidad un factor de normalización $K_{ve}=10[\text{km/h}]$.

Aunque la modificación del recorrido universal de la variable error de velocidad permite una reducción significativa del sobrenivel máximo, tanto para el caso (i) como para el caso (ii), es visible de los resultados expuestos en la Figura 5.6 y la Tabla 5.2 que resulta necesario realizar modificaciones adicionales para ajustar de mejor manera la respuesta del controlador al seguir perfiles de velocidad. Considerando que el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización son afectados principalmente por las reglas que forman parte de la parte central del mapa de reglas, cuya modificación como se mencionó previamente resulta poco deseable, la opción lógica, considerando además los resultados de la Tabla 5.2 es modificar los conjuntos difusos asociados a la segunda variable de entrada del controlador difuso de velocidad.

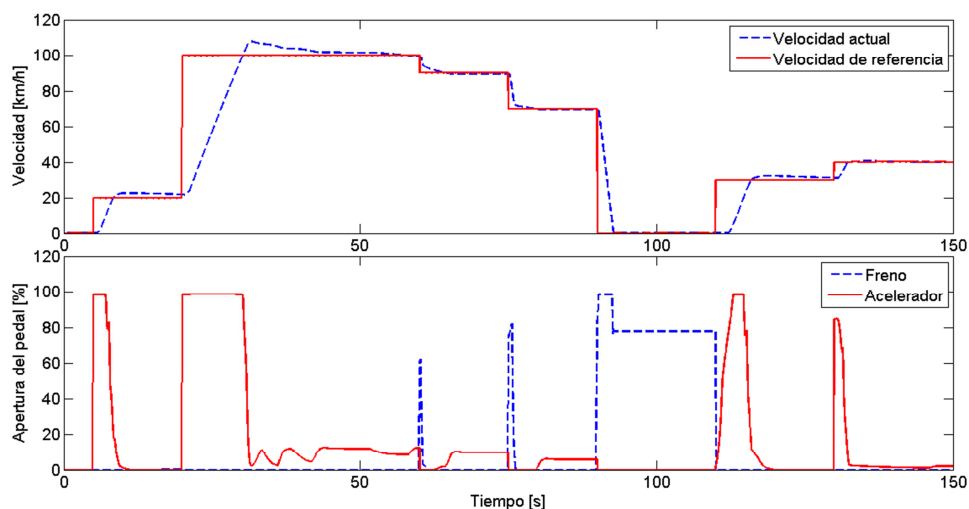


Figura 5.6 Respuesta del sistema considerando como factor de normalización $K_{ve}=10[\text{km/h}]$ para el error de velocidad. En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

En la Figura 5.7 se puede observar el comportamiento de la variable integral del error de velocidad cuando el sistema debe seguir el perfil de velocidad que se ve en la Figura 5.6. De la Figura 5.7 se puede apreciar que, particularmente referencias de velocidad inferiores a 40 [km/h] o cambios de referencia de velocidad inferiores a 10[km/h], la integral del error de velocidad toma valores en torno a 10 [m], lo que implica un grado de pertenencia cercano o superior a 0.5 al conjunto “Medio”⁵. Al observar la base de reglas de la Tabla 3.1, se puede visualizar lo significativo de la implicancia descrita anteriormente, ya que cuando el error de velocidad tiene un grado de pertenencia significativo al conjunto difuso “Cero” (mayor o igual que 0.5), el que la integral del error de velocidad pertenezca al conjunto difuso “Medio” implica el que el controlador realice acciones de control no despreciables que contribuyen a que la variable controlada sobrepase el valor deseado que se provee como referencia. De igual forma, cuando la variable controlada ya ha sobrepasado la referencia en la base de reglas se aprecia que el que la integral del error de velocidad pertenezca al conjunto difuso “Medio” contribuye a mantener el estado actual hasta que el valor de la integral del error de velocidad disminuya debido al valor negativo que toma el error de velocidad de acuerdo a (3.1). La descripción anterior explica totalmente el comportamiento observado para las referencias de velocidad inferiores a 40 [km/h] que se ven en la Figura 5.6, donde se aprecia que una vez alcanzado el sobrenivel máximo la

⁵ Al igual que en los capítulos anteriores, cuando se habla de un conjunto difuso utilizando los valores lingüísticos “Pequeño”, “Medio” o “Grande” hace referencia tanto los conjuntos “Positivos” como “Negativos”.

variable controlada tiende a mantenerse en ese valor y comienza a disminuir lentamente por efecto del roce y el error de velocidad negativo, generando que el sobrenivel máximo y los tiempos de estabilización sean mayores que los valores deseados, tal como se visualiza en la Tabla 5.2.

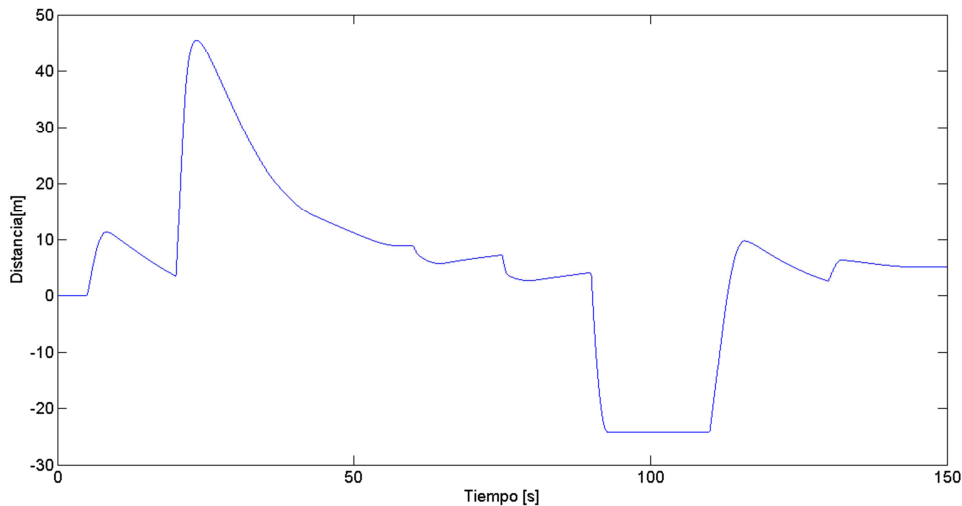


Figura 5.7 Integral del error de velocidad medida al realizar la prueba que generan los resultados expuestos en la Figura 5.6.

En la Tabla 5.3 se puede visualizar la trayectoria en el mapa de reglas, de las reglas gatilladas considerando la referencia de 20 [km/h] que se ve en la Figura 5.6. Haciendo un análisis de la trayectoria observada se puede apreciar que las reglas activadas coinciden plenamente con la explicación dada al comportamiento observado en el párrafo anterior. Se visualiza de estos resultados que la solución para evitar el aumento del tiempo de estabilización y disminuir el sobrenivel máximo pasa por evitar la activación de las reglas #14 y #9 que son las que precisamente contribuyen a que se produzcan estos fenómenos, tal como se comentaba anteriormente. Una solución, siguiendo el patrón utilizado con la variable “Error de velocidad”, sería en este caso modificar el recorrido universal aumentando la cota superior de los conjuntos difusos asociados a la integral del error. Un aumento en la cota superior, desde el punto de vista teórico, involucra extender el intervalo de valores que tiene un grado de pertenencia no nulo a los diferentes conjuntos difusos⁶ lo que se debiera traducir en que las la trayectoria del mapa de reglas se desplazará hacia la derecha, ya que valores numéricos de la integral del error de

⁶ Técnicamente, al ver los valores numéricos de la integral del error de velocidad, el ancho de los conjuntos aumenta, pero dado que se trabaja con los conjuntos difusos normalizados el ancho de los conjuntos no varía, ya que el factor de normalización es igual a la nueva cota superior escogida. Por esta razón no se habla de que los conjuntos difusos sean más anchos, pero si los valores numéricos de la variable de entrada que tiene grado de pertenencia no nulo en los distintos conjuntos difusos aumenta.

velocidad que antes tenían una pertenencia considerable (mayor o igual que 0.5) al conjunto “Medio” ahora ven disminuida su pertenencia a este conjunto y aumentada en la misma proporción al conjunto difuso “Cero”. En la Figura 5.8 se pueden ver los resultados obtenidos usando diferentes cotas superiores.

De los resultados obtenidos al variar la cota superior de los conjuntos difusos para la integral del error de velocidad se puede visualizar que se logra mejorar considerablemente el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización para todas las referencias bajo los 40 [km/h], llegando incluso a alcanzar los valores deseados de sobrenivel y tiempo de estabilización cuando se utiliza una cota superior y un factor de normalización igual a 70 [m]. Sin embargo, es importante notar que a medida que se aumenta el valor de la cota se puede apreciar que para referencias altas de velocidad aunque el tiempo de estabilización y sobrenivel máximo casi no se ven afectados, variando en menos de un 2% respecto a los valores previos, el tiempo que demora el sistema en tender a un error permanente nulo aumenta considerablemente.

u		V_{ei}				
		NG	NM	CE	PM	PG
v_e	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	CE	PM
	CE	NG	NM	CE	PM	PG
	PM	NM	CE	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG

Tabla 5.3 Evolución de la variable manipulada sobre el mapa de reglas preliminar del controlador difuso de dirección para la referencia de 20 [km/h] de la Figura 5.6. Las reglas gatilladas se muestran en colores y el orden de activación se muestra en orden ascendente desde el color más claro al más oscuro. Las reglas se numeran por filas de arriba abajo y de izquierda a derecha, por lo que las reglas gatilladas que generan la trayectoria serían: 23-24-19-14-9-8-13.

Esta situación se explica de forma clara al analizar lo que sucede al aumentar el valor de la cota superior de la variable integral del error de velocidad. Al aumentar el valor de la cota superior de esta variable lo que hace el controlador es restarle importancia a la parte integral del controlador difuso, por lo que mientras más grande el valor de la cota, gran parte de los valores de la integral del error de velocidad van a tener un grado de pertenencia más representativo en el

conjunto difuso “Cero” lo que hace que el controlador se comporte de forma más cercana a un controlador proporcional mientras mayor sea el valor de la cota. Aunque a nivel de simulación se aprecia que los resultados siguen siendo válidos, esta situación en un ambiente no simulado no es deseable, ya que hay muchos factores y perturbaciones que no son considerados en el simulador por lo que la pérdida de robustez del sistema que involucra la modificación puede tener consecuencias poco favorables en lo que se refiere al desempeño del controlador en la aplicación final implementada en un vehículo de escala real.

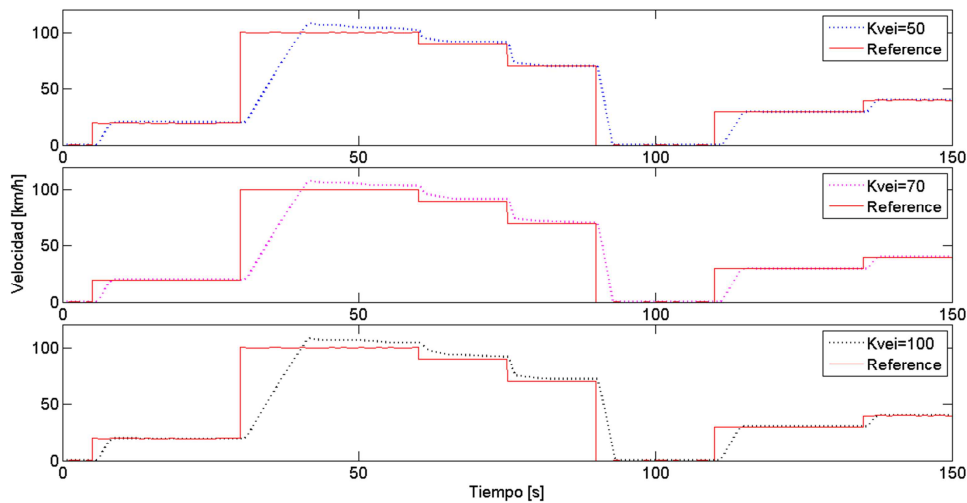


Figura 5.8 Resultados obtenidos al variar el factor de normalización de la integral del error de velocidad. De arriba abajo, lo gráficos muestran los resultados utilizando los siguientes factores: $K_{vei}=50[m]$, $K_{vei}=70[m]$ y $K_{vei}=100[m]$.

Incluso a nivel de simulación es importante lograr que las variables tiendan un error permanente nulo, por lo tanto, resulta relevante en este punto, pese a que los resultados no son desfavorables, buscar otras alternativas que impliquen mantener la robustez y estabilidad del sistema junto con permitir que los parámetros que miden el desempeño del controlador se encuentren dentro de los rangos deseados. Apuntando en esa dirección, se puede visualizar que otra solución sería modificar el número de conjuntos difusos incorporando conjuntos difusos que reflejen un estado intermedio entre los conjuntos difusos “Cero” y “Medio” que es precisamente en donde en la actualidad están los problemas. La incorporación de estos nuevos conjuntos permitiría que en los valores actuales de la integral del error de velocidad que tiene un grado de pertenencia más representativo en el conjunto difuso “Medio”, tuvieran un grado de pertenencia mayor en los nuevos conjuntos difusos que se están definiendo, de tal forma que sea posible definir reglas específicas que eviten que se produzcan los fenómenos que se observan en la Figura 5.6 que son consecuencia directa de la reglas gatilladas según la Tabla 5.3.

Dado que la idea es no aumentar la cota superior de los conjuntos difusos asociados a la variable integral del error de velocidad, en base a los resultados y los argumentos presentados previamente, la inserción de estos nuevos conjuntos, denominados “Negativo Pequeño” y “Positivo Pequeño” se debe traducir en una nueva redistribución y definición de las funciones de pertenencia asociadas a cada conjunto difuso, la cual se ajusta a los criterios de diseño presentados en el Capítulo 3.

La asignación de las reglas asociadas a los nuevos conjuntos difusos debe realizarse con cuidado a fin de no alterar la estabilidad del sistema controlado. Considerando la trayectoria observada en la Tabla 5.3 y los resultados obtenidos hasta ahora es patente que las reglas que se asocien a los conjuntos difusos “Positivo Pequeño” y “Negativo Pequeño” de la variable integral del error de velocidad deben apuntar a reducir el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización. De la evolución de la variable manipulada expuesta en la Tabla 5.3 se ve que las acciones de control que gatillen las reglas que se le asocien a estos los nuevos conjuntos difusos, no pueden emular las reglas asociadas al conjunto difuso “Medio” de la integral del error de velocidad, ya que son precisamente estas reglas las que contribuyen a aumentar el tiempo de estabilización y el sobrenivel máximo en la variable controlada. Teniendo en cuenta lo anterior, al observar el mapa de reglas de la Tabla 5.3 se puede apreciar que la mejor opción es que las reglas asociadas a los conjuntos difusos “Pequeño” sean similares a las del conjunto difuso “Cero” relacionado con la integral del error de velocidad. Estas consideraciones obtenidas a partir de los resultados exhibidos previamente generan las modificaciones de diseño expuestas en la Figura 3.8 y la Tabla 3.2.

En la Figura 5.9 se pueden visualizar los resultados obtenidos al implementar estas modificaciones, donde se observa la disminución del tiempo de estabilización y el sobrenivel para todos los casos que involucran velocidades de referencia inferiores 40 [km/h]. En el caso del sobrenivel máximo este disminuye a valores inferiores al 5% y el tiempo de estabilización normalizado es inferior a $0.2 \left[\frac{s}{km/h} \right]$ y en algunos casos inferior al valor deseado para el tiempo de estabilización normalizado $0.15 \left[\frac{s}{km/h} \right]$. La evolución de la variable manipulada sobre el nuevo mapa de reglas, que se expone en la Tabla 5.4, revela que las reglas gatilladas generan acciones de control acorde a lo esperado. Esto muestra que las modificaciones propuestas permiten

mejorar significativamente el desempeño del controlador a nivel de simulación y que su incorporación al diseño es adecuada.

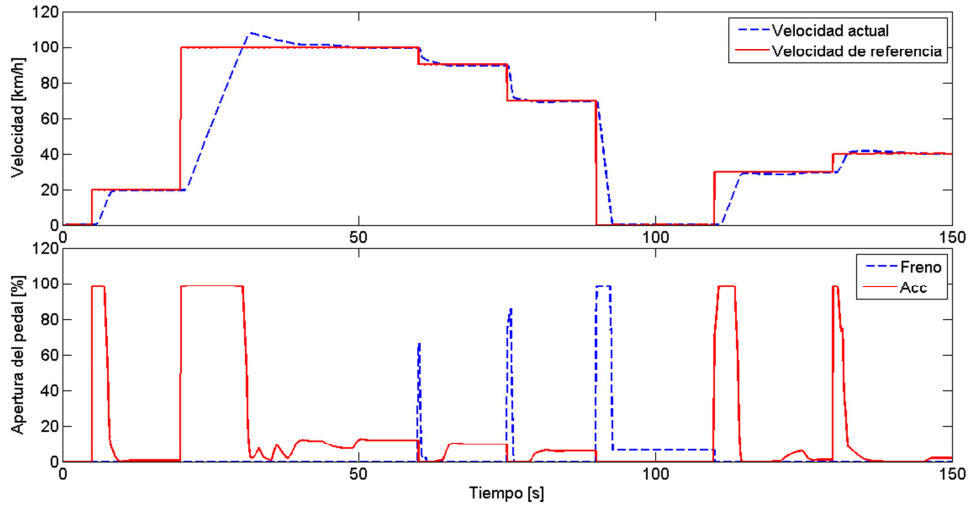


Figura 5.9 Respuesta del sistema al modificar los conjuntos difusos asociados a la integral del error de velocidad, incorporando los conjuntos difusos “Negativo Pequeño” y “Positivo Pequeño”. En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

u		V _{ei}						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
V _e	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	NM	NM	CE	PM
	CE	NG	NM	CE	CE	CE	PM	PG
	PM	NM	CE	PM	PM	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG	PG	PG

1^a

2^a

3^a

4^a

5^a

Tabla 5.4 Evolución de la variable manipulada sobre el mapa de reglas del controlador difuso de velocidad, modificado al incorporar los nuevos conjuntos difusos asociados a la integral del error de velocidad. Esta trayectoria representa las reglas gatilladas para la referencia de 20 [km/h] de la Figura 5.6. Las reglas gatilladas se muestran en colores y el orden de activación se muestra en orden ascendente desde el color más claro al más oscuro. Las reglas se numeran por filas de arriba abajo y de izquierda a derecha, por lo que las reglas gatilladas que generan la trayectoria serían: 32-33-26-19-18.

u		V_{ei}						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
V_e	NG	NG	NG	NG	NG	NG	NM	CE
	NM	NG	NG	NM	NM	NM	CE	PM
	CE	NG	NM	CE	CE	CE	PM	PG
	PM	NM	CE	PM	PM	PM	PG	PG
	PG	CE	PM	PG	PG	PG	PG	PG

Tabla 5.5 Evolución de la variable manipulada sobre el mapa de reglas del controlador difuso de velocidad, modificado al incorporar los nuevos conjuntos difusos asociados a la integral del error de velocidad. Esta trayectoria representa las reglas gatilladas para la referencia de 100 [km/h] de la Figura 5.6. Las reglas gatilladas se muestran en colores y el orden de activación se muestra en orden ascendente desde el color más claro al más oscuro. Las reglas se numeran por filas de arriba abajo y de izquierda a derecha, por lo que las reglas gatilladas que generan la trayectoria serían: 33-34-35-28-21-14-7-14-13-20-19.

Los resultados también muestran que las modificaciones incorporadas permiten disminuir levemente el tiempo de estabilización y el sobrenivel en el caso (ii), es decir cuando las velocidades son superiores o iguales a 40 [km/h]. Aunque con las modificaciones implementadas se logra disminuir el sobrenivel máximo a menos de un 10% de la referencia de velocidad, el tiempo de estabilización normalizado sigue siendo superior a $0.15 \left[\frac{s}{km/h} \right]$. Particularmente para los cambios de velocidad superiores a 20 [km/h], donde la integral del error de velocidad toma valores cercanos a la cota superior para dicha variable, se puede apreciar que al realizar la trayectoria de control sobre el mapa de reglas para estos cambios de referencia, tal como se visualiza en la Tabla 5.5; las reglas 10, 15, 16 y 21, asociadas al conjunto difuso “Grande” de la integral del error de velocidad y a los conjuntos “Medio” y “Cero” del error de velocidad, son las reglas que más contribuyen a que aumente el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización. Cuando se trabaja con velocidades superiores a 40 [km/h], o se producen cambios de velocidad de referencia superiores a 30 [km/h], el valor de la integral se acerca bastante al valor de la cota superior definida para la integral del error de velocidad, lo que se traduce en que el grado de pertenencia al conjunto difuso de esta variable considerable (mayor que 0.5). Al analizar la trayectoria de control se puede apreciar que incluso cuando el error de velocidad es cercano a

ceros, si la integral del error de velocidad es “grande” se llevarán a cabo acciones de control que, a nivel de simulación hacen que la variable controlada supere significativamente la referencia de velocidad deseada. En vista de esto, el análisis de estos resultados sugiere que para disminuir el tiempo de estabilización y el sobrenivel máximo es necesario modificar la magnitud de las acciones de control gatilladas por las reglas antes mencionadas. En la Tabla 3.3 se muestran las modificaciones de diseño de la base de reglas que se derivan del análisis de los resultados.

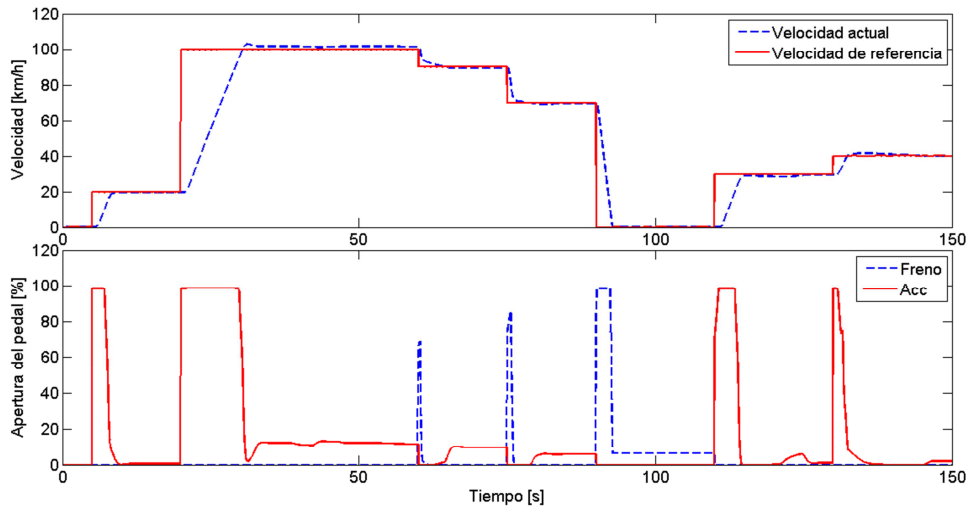


Figura 5.10 Respuesta del sistema simulando con el diseño final del controlador difuso de velocidad expuesto en la Figura 3.9 y la Tabla 3.3 . En el gráfico superior se ve la variable controlada (en línea discontinua azul) y la referencia de velocidad (en línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada del sistema, diferenciándose el acelerador (línea continua roja) del freno (línea discontinua azul).

En la Figura 5.10 se puede visualizar los resultados obtenidos al realizar estas modificaciones al diseño del controlador difuso de velocidad. Se puede apreciar que para todo el rango de velocidades en el que fue probado el simulador se cumple los requisitos impuestos para el tiempo de estabilización normalizado y el sobrenivel máximo, lo cual es congruente con los cambios realizados en el diseño del controlador difuso de velocidad. Es importante notar que, todos los cambios de diseño realizados al controlador difuso de velocidad hasta este punto han sido hechos en base a los resultados disponibles a partir de las simulaciones, por lo que es muy probable que en un ambiente no simulado el efecto de los cambios realizados no sea el mismo que el observado en los resultados antes expuestos, más aún si se tiene en cuenta todos los factores que no han sido considerados en el simulador como con el paso de los cambios, el efecto del roce dinámico y las condiciones ambientales.

Pese a lo anterior, de los resultados obtenidos es indudable la coherencia y correcto diseño del controlador difuso de velocidad a nivel de simulación, lo que permite estimar que el

controlador tendrá un funcionamiento similar en condiciones no simuladas aunque obviamente no con los mismos niveles de desempeño que los observados al realizar las pruebas en el simulador.

Otro aspecto digno de análisis a partir de los resultados es el comportamiento de la variable manipulada, es decir, la salida del controlador difuso de velocidad. De los resultados expuestos hasta ahora se aprecia que el controlador evita al máximo el uso del freno, minimizando la alternación entre acelerador y freno, tal como se propuso en el diseño del controlador de velocidad. En todas las pruebas realizadas se puede observar que, dependiendo de la tasa de cambio de la velocidad, el uso de le freno se establece únicamente para disminuciones abruptas de la velocidad o cuando el cambio de la referencia es muy rápido, tal como sucede en conducción de un vehículo en un ambiente no simulado. Llevando las acciones de control realizadas en la Figura 5.10 a un histograma, como se ve en la Figura 5.11, se puede observar que el acelerador, considerando cuando no se presiona ningún pedal como control con el acelerador, participa en el 93% en el ajuste de la velocidad. En particular, para las velocidades inferiores a 40 [km/h] se puede visualizar de los resultados anteriores que el acelerador es utilizado más del 89% de las veces para realizar el ajuste de velocidad y un 98% en el caso de las velocidades superiores a 40 [km/h], lo que evidencia la preponderancia del uso del acelerador tal como se consideró en el diseño. Incluso si se considera netamente las acciones de control llevadas a cabo por el acelerador y el freno, sin considerar cuando ningún pedal está siendo accionado se observa que el acelerador participa en el 85% de los ajustes de velocidad. En el caso la salida del controlador, se puede notar que las acciones de control que son llevadas a cabo son bastantes bruscas en la mayoría de los cambios de velocidad, presionando completamente el acelerador o el freno por algunos segundos para aproximarse a la referencia de velocidad y luego soltando los pedales o presionándolos con menor intensidad. A primera vista, esta forma de llevar a cabo el control no resulta correcta, ya que constante se fuerza a los actuadores a llegar al límite, lo cual se traduce en un consumo poco eficiente de combustible y en un desgaste de los actuadores. Sin embargo, al analizar las forma de las referencias de velocidad y los cambios de referencia que tiene el perfil de velocidad utilizado en las pruebas se puede visualizar que la respuesta del controlador es apropiada, ya que al tratarse de escalones, los cambios de velocidad que se producen son instantáneos lo que desde el punto del controlador implica utilizar toda la capacidad de los actuadores para alcanzar lo más rápidamente posible la referencia deseada. Desde de un conductor humano el utilizar el perfil de velocidad usado en las simulaciones es equivalente a decir: “¡Acelera a X velocidad ahora! o ¡Detente, o disminuye la velocidad, inmediatamente!

Frente a indicaciones como las anteriores, dependiendo por supuesto de la velocidad actual, tal como se ve también en los resultados, si la velocidad actual difiere en más 10 [km/h] de la velocidad deseada, el conductor presionará al máximo el acelerador o el freno para alcanzar la velocidad de referencia.

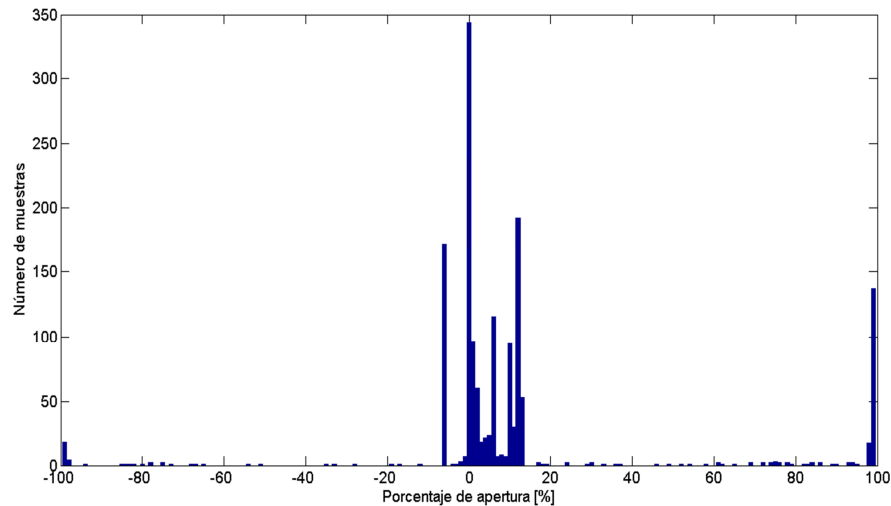


Figura 5.11 Histograma de la variable de salida del controlador. Los valores negativos de apertura corresponden al uso del freno y los positivos, al acelerador. Para generar el histograma se utilizó un décimo de las muestras disponibles, es decir, se escogieron las muestras cada 100[ms] para realizarlo, a fin de mejorar la visibilidad de los resultados.

En ese sentido, el diseño del controlador difuso de velocidad no incorpora un estilo de conducción propio que le permita limitar las acciones de control, sino que es el control supervisor, o el control remoto, el que debe proveer las referencias de velocidad de manera adecuada para que las acciones de control no sean tan drásticas.

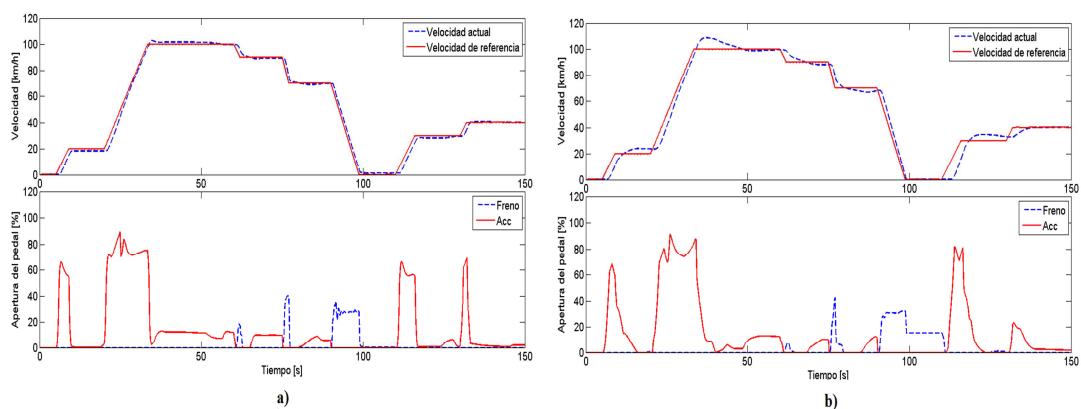


Figura 5.12 Respuesta del sistema utilizando un perfil de referencia basado en rampas para emular cambios paulatinos de la referencia de velocidad. En a) se visualiza la respuesta considerando el diseño final del controlador difuso de velocidad y en b) la respuesta usando el diseño preliminar del controlador de velocidad.

Paralelamente a las pruebas realizadas utilizando el perfil de velocidad observado en la Figura 5.1, y cuyos resultados condujeron a las modificaciones de diseño antes mencionada, se realizaron pruebas utilizando un estilo de conducción más suave, es decir, utilizando un perfil de velocidad cuyos cambios de velocidad son paulatinos. En la Figura 5.12 se visualizan los resultados obtenidos considerando el diseño original del controlador difuso de velocidad y el diseño final con las modificaciones. Al observar los resultados obtenidos se aprecia que el controlador difuso funciona correctamente acercándose y siguiendo de manera efectiva la referencia de velocidad deseada. Estos resultados no sorprenden, ya que el hecho de que el controlador funcionara adecuadamente siguiendo un perfil de velocidad basado en escalones aseguraba en gran medida el correcto y coherente funcionamiento del controlador con un perfil de velocidad que reflejará un estilo de conducción más suave. Particularmente de la Figura 5.12a, se puede visualizar que el uso del freno y el acelerador es mucho más acotado que en el caso que se expone en la Figura 5.10; resultado que se explica por la modificación del perfil de velocidad que permite transiciones más suaves. Los resultados usando este perfil de velocidad revelan que el controlador difuso de velocidad cumple con los requisitos establecidos para el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización normalizado para todas las referencias, avalando el diseño propuesto para el controlador.

A fin de garantizar un uso acotado de los actuadores independiente del perfil de velocidad, es posible limitar la acción de los actuadores modificando el factor de denormalización de la salida, tal como proponen algunos autores en trabajos que abordan esta problemática [17],[21]. El disminuir el valor del factor de denormalización, permite acotar la apertura de los pedales de aceleración y freno, lo que se traduce en una conducción más suave que en el caso en que no están limitados. Lógicamente, al limitar la variable manipulada el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización normalizado, especialmente este último parámetro, se ven afectados. En la Figura 5.13 y la Figura 5.14 se ven los resultados obtenidos al variar el factor de denormalización del acelerador y el freno, K_{acc} y K_{brk} , a 67% y 33% respectivamente.

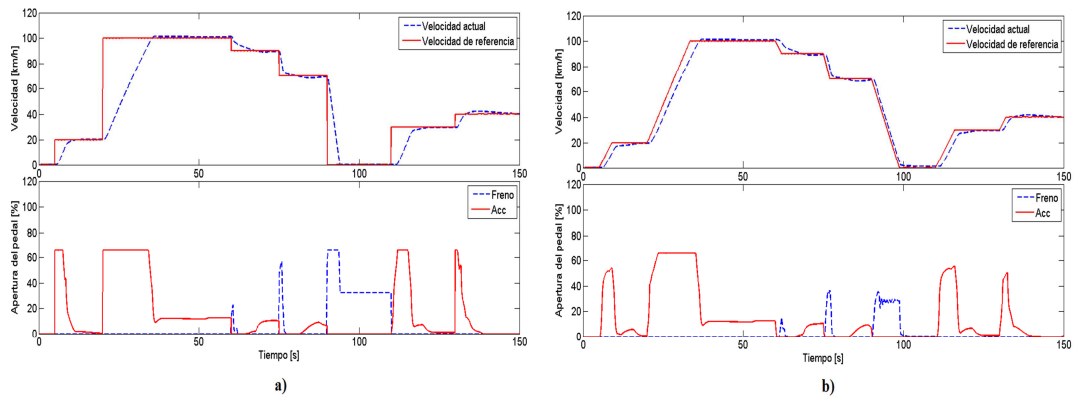


Figura 5.13 Respuesta del sistema limitando la apertura de los actuadores a un 67% del rango de apertura máximo. En a) se muestran los resultados obtenidos usando un perfil de velocidad basado en escalones como referencia y en b) se muestran los resultados conseguidos utilizando un perfil de velocidad basado en rampas como referencia.

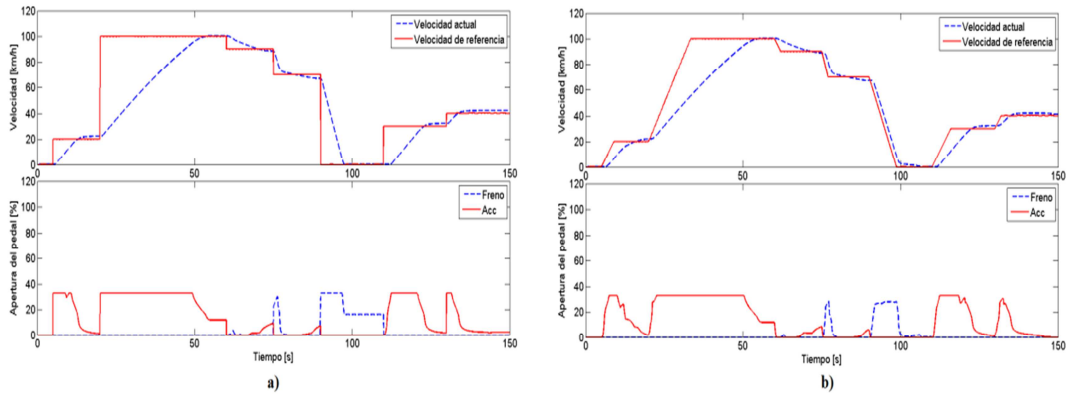


Figura 5.14 Respuesta del sistema limitando la apertura de los actuadores a un 34% del rango de apertura máximo. En a) se muestran los resultados obtenidos usando un perfil de velocidad basado en escalones como referencia y en b) se muestran los resultados conseguidos utilizando un perfil de velocidad basado en rampas como referencia.

De estos últimos resultados se puede ver que la utilización de los actuadores, a raíz de la limitación propuesta, es mucho menos intensa que en el caso en que no hay ninguna restricción en ellos. Sin embargo, los tiempos de estabilización aumentan considerablemente, superando en los requerimientos impuestos para este parámetro por lo que, tal como sucede en la conducción que realizan los seres humanos, existe un compromiso entre el tiempo de estabilización, el tiempo de subida, y la magnitud con que se llevan cabo las acciones de control. En ese sentido, se puede visualizar que la limitación de los actuadores no es imperiosa si se establece un perfil de velocidades adecuado que garantice tiempos de respuesta adecuados, según el tiempo de estabilización normalizado definido, para las transiciones de velocidad.

Para evaluar el desempeño del controlador difuso de velocidad frente a perturbaciones se realizaron varias pruebas con distintos niveles de ruido y perfiles de velocidad. Considerando ruido en la referencia de velocidad se llevaron a cabo pruebas usando una señal de ruido blanco de banda limitada con diferentes intensidades de ruido. A modo de acotar el análisis en las Figura 5.15 y la Figura 5.16 se muestran los resultados al utilizar los dos perfiles de velocidad exhibidos en las pruebas previas y una señal de ruido con densidad espectral de potencia 1 y 5 respectivamente.

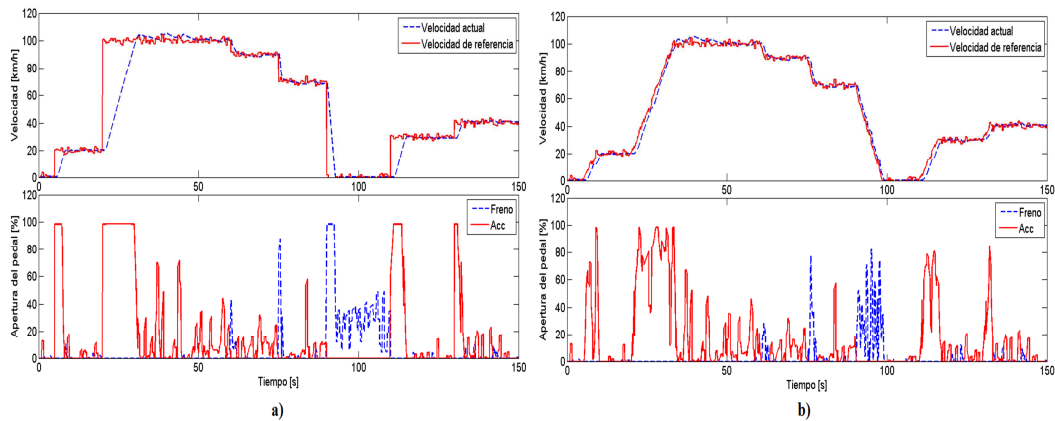


Figura 5.15 Respuesta del sistema frente a la presencia de perturbaciones en la referencia. El ruido que contamina a la referencia es ruido blanco de banda limitada de intensidad 1. Los gráficos superiores corresponden a la variable controlada y los inferiores a la variable manipulada del sistema. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que b) se utiliza un perfil de velocidad basado en rampas.

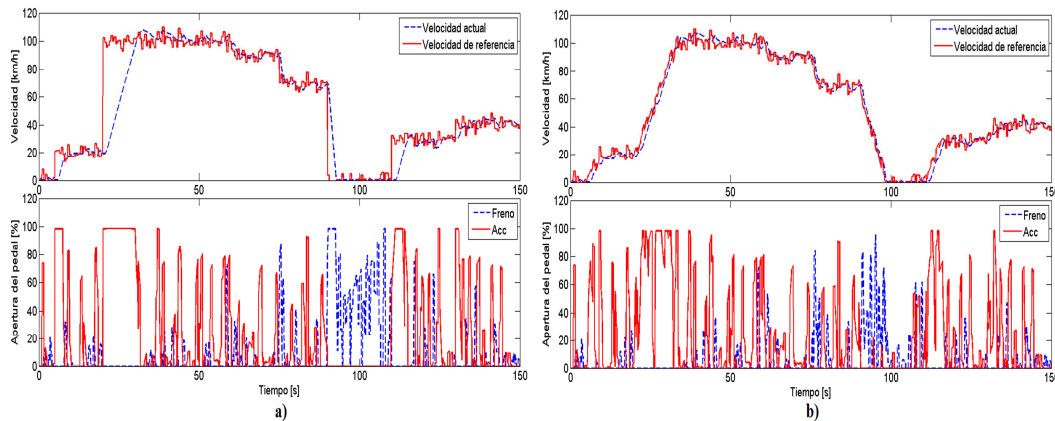


Figura 5.16 Respuesta del sistema frente a la presencia de perturbaciones en la referencia. El ruido que contamina a la referencia es ruido blanco de banda limitada de intensidad 5. Los gráficos superiores corresponden a la variable controlada y los inferiores a la variable manipulada del sistema. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que b) se utiliza un perfil de velocidad basado en rampas.

De los resultados conseguidos se puede apreciar que el controlador difuso de velocidad responde muy bien a las perturbaciones en la referencia manteniendo las características

observadas en las pruebas minimizando el efecto de dichas perturbaciones. Se puede apreciar que en todos los casos, considerando como referencia la media de la señal ruidosa, la respuesta del sistema se enmarca dentro de los valores deseados para el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización. Es importante notar en este caso, que en pruebas adicionales observadas se puede ver que al limitar los actuadores o utilizar programación de ganancias para limitar los actuadores por tramos, el efecto de las perturbaciones en la referencia de velocidad afectaba significativamente al sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización, incrementándolo en algunos casos por sobre los valores deseados para estos parámetros; especialmente en el caso de velocidades de referencia inferiores a los 40 [km/h]. Sin embargo, pese a lo anterior, en todos los casos el sistema se comporta de manera coherente con el diseño del controlador difuso y logra converger a las vecindades de un error permanente nulo dentro de la banda del 5% de la referencia de velocidad. Flexibilizando los criterios de evaluación de los controladores, tomando en cuenta que un conductor humano difícilmente puede percibir un error de velocidad inferior a los 3 [km/h] y que un error de velocidad de 2.5 [km/h] tiene una pertenencia de 0.5 al conjunto difuso “Cero”, al considerar errores de velocidad inferiores a 2.5 [km/h] como despreciables se puede notar que los controladores difusos frente a perturbaciones y con los actuadores limitados mantienen un muy buen desempeño. En la Figura 5.17 se puede visualizar los resultados al utilizar una referencia basada en escalones, contaminada con ruido blanco de banda limitada con intensidad de ruido 5 y con la apertura de los actuadores limitada a un 67%, donde se puede apreciar los efectos antes mencionados.

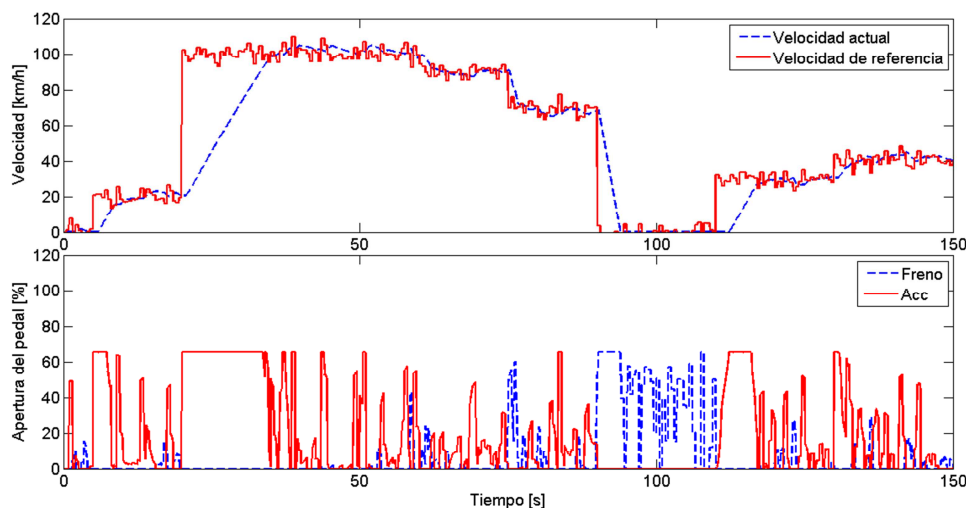


Figura 5.17 Respuesta del sistema considerando una referencia perturbada con ruido blanco de banda limitada de intensidad 5 y los actuadores limitados al 67% de la apertura máxima. En el gráfico superior se observa la variable controlada del sistema y en el inferior la variable manipulada.

Al analizar la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de los resultados expuestos previamente, observando la Tabla 5.6 se puede notar que al enfrentarse a perturbaciones en todos los casos el RMSE aumenta respecto a la situación no perturbada. Estos resultados son congruentes con lo esperado, ya que al haber perturbaciones, y dado que el controlador no es capaz de seguir completamente el perfil de velocidad ruidoso de referencia, es natural que el error aumente. Sin embargo, se puede ver que pese al aumento observado, el RMSE no supera el 5% del error del sistema sin perturbar cuando el perfil de velocidad es basado en escalones, no obstante, es superior al 70% cuando el perfil utilizado se basa en rampas, todo esto teniendo presente el caso más extremo que es cuando se tiene una señal de ruido de 7 [km/h] de amplitud. Aunque pudiera parecer un valor elevado este porcentaje todavía se encuentra dentro de los límites aceptables, considerando además que la amplitud del ruido representa un error sobre el 10% para un amplio rango de referencias. Lo anterior se ve refrendado al comparar los resultados obtenidos para la variable controlada con la referencia de velocidad filtrada mediante el uso de la Transformada Wavelet Discreta (DWT por sus siglas en inglés). En la Figura 5.18 se puede ver la variable controlada junto con la referencia de velocidad filtrada, utilizando para el filtrado la wavelet de Haar con un nivel de aproximación 8. La señal de referencia de velocidad filtrada corresponde a aquella a la que se le añadió un ruido blanco de banda limitada de intensidad 5, a fin de ilustrar los resultados conseguidos al estudiar la situación más extrema vista anteriormente. Al calcular el RMSE entre la referencia filtrada y la velocidad actual del vehículo, considerando el perfil de velocidades basado en escalones, se obtuvo que este es 14.57, error que es cercano al valor del RMSE de la referencia sin perturbar, habiendo sólo un 2.1% de diferencia entre ambos. En el caso del perfil de velocidades basado en rampas, el RMSE entre la referencia filtrada y la velocidad actual del vehículo es de 3.82, lo que implica una diferencia de 42% con el RMSE calculado en la situación no perturbada. Aunque es natural que el RMSE disminuya al filtrar la señal de referencia ruidosa, esto muestra que la respuesta del controlador incluso bajo el efecto de perturbaciones sigue adecuadamente la referencia de velocidad y que los RMSE obtenidos para el sistema perturbado son adecuados para las intensidades de ruido utilizadas.

Intensidad de ruido	Perfil de velocidad	RMSE
Sin perturbaciones	Escalones	14.88
	Rampas	2.64
1	Escalones	15.04
	Rampas	3.212
5	Escalones	15.6
	Rampas	4.572

Tabla 5.6 RMSE calculado para los diferentes perfiles de velocidad usados como referencia e intensidades de ruido que perturban a la referencia. La variable manipulada y controlada no se someten a ninguna perturbación.

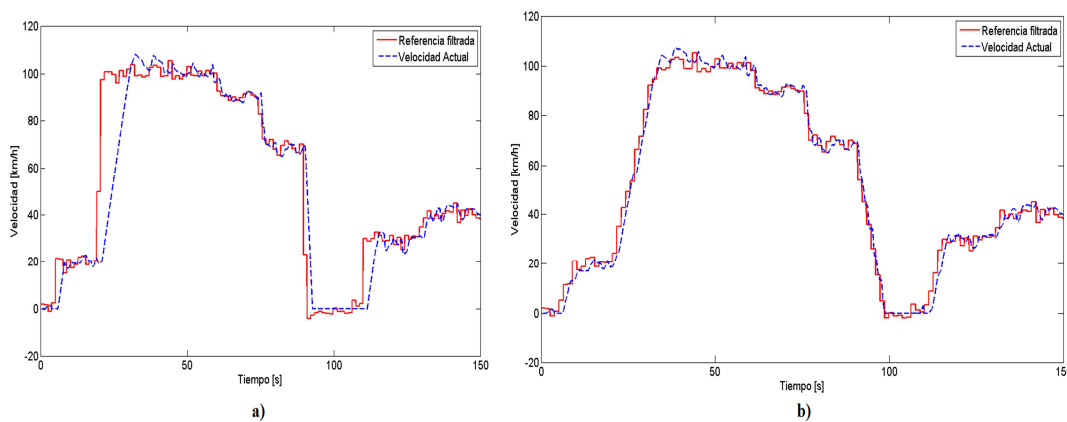


Figura 5.18 Comparación entre la velocidad actual del vehículo y la referencia de velocidad perturbada filtrada mediante DWT con un nivel de aproximación 8. En a) se observa el perfil de velocidades basado en escalones filtrado y en b) se ve el perfil de velocidades basado en rampas filtrado.

Al observar la variable manipulada se puede visualizar que ante la presencia de ruido en la referencia se genera una mayor alternación en el uso de los pedales, tal como se observa en la Figura 5.16 donde se muestran las variables manipuladas para dos perfiles de velocidad con un ruido blanco de banda limitada de intensidad 5 contaminando la referencia de velocidad. Pese a este aumento en la conmutación entre acelerador y freno producto de la perturbación se puede apreciar que se mantiene la condición de diseño de realizar la mayoría del control con el acelerador, observándose de los resultados que pese a que el freno se utiliza más frecuentemente a fin de seguir la referencia ruidosa, en contadas oportunidades el freno supera el 25% de apertura (esto considerando solamente las situaciones en ausencia de perturbaciones el vehículo realizaba el control solo con el acelerador). En el histograma mostrado en la Figura 5.19, basado en la Figura 5.16a), es visible el punto antes comentado. Analizando la Figura 5.19 se puede apreciar que globalmente el 77% del control de velocidad se realiza con el acelerador y si se estudia separadamente las velocidades altas (superiores a 40 [km/h]) y bajas (inferiores a 40 [km/h]) se

puede observar que el acelerador ejecuta el control de velocidad en el 86% y 70% de los casos respectivamente. Es importante notar, que los resultados expuestos en la Figura 5.19 fueron realizados considerando un ruido blanco de banda limitada con intensidad de ruido 5, lo que se traduce en una desviación estándar del ruido de 7 [km/h] aproximadamente. Un error de velocidad de 7 [km/h] tiene una pertenencia de 0.6 al conjunto difuso “Medio” y 0.4 al conjunto difuso “Grande” por lo que corresponde a una situación de error bastante extrema, por lo que es natural observar la alternación entre el uso del acelerador y el freno que se observa en los resultados. Al realizar pruebas con intensidades de ruido menores se puede observar que el uso del freno, en situaciones en que sin perturbaciones se utilizaba solamente el acelerador, la apertura del freno no supera el 5%. Esto muestra que incluso en un ambiente perturbado se mantiene, en mayor o menor medida dependiendo del nivel de ruido que aporte la perturbación, la condición de diseño de minimizar el uso del freno y restringirlo a situaciones puntuales.

Además de evaluar perturbaciones en la referencias se realizaron pruebas considerando perturbaciones en la variable controlada y en las salidas del controlador. En la Figura 5.20 y la Figura 5.21 se muestran algunos resultados considerando una perturbación de ruido blanco de banda limitada con intensidad de ruido 5 en la variable controlada y la salida del controlador respectivamente. Como se aprecia de las figuras los resultados son similares a los obtenidos con las perturbaciones en la referencia de velocidad. En la Tabla 5.7 se muestra el RMSE obtenido de estas pruebas. El análisis de estos resultados es similar al expuesto previamente para la perturbación en la referencia de velocidad. De los resultados obtenidos, se observa que las perturbaciones añadidas a la entrada del sistema, es decir, las perturbaciones añadidas a la salida del controlador difuso de velocidad, son las que tienen el menor efecto en la variable controlada del sistema. Esto es congruente con lo indica la teoría de control clásica donde se espera que la función de transferencia del sistema se comporte como un filtro pasabajos, filtrando las componentes de ruido de alta frecuencia. Precisamente en los resultados conseguidos, se observa que el sistema filtra el ruido añadido a la variable manipulada, trayendo como consecuencia un efecto muy disminuido en la variable controlada producto de la perturbación añadida.

El análisis de los resultados obtenidos para las diferentes perturbaciones estudiadas muestra que el controlador difuso de velocidad diseñado, junto con las modificaciones realizadas a partir de los resultados previos, es robusto frente a perturbaciones y que es capaz de tener un buen desempeño al seguir perfiles de velocidad incluso en situaciones que involucran niveles de

ruido que generan errores que escapan a los rangos considerados pequeños por el controlador, lo cual resulta muy positivo especialmente al pensar en una aplicación en escala real del controlador difuso de velocidad. Digno de destacar es el hecho que existen otras perturbaciones que difícilmente puede introducidas en el modelo, como son las perturbaciones dadas por condiciones ambientales o tipo de camino en que se desplaza el vehículo, y que pueden afectar en un ambiente no simulado significativamente al vehículo. Sin embargo, los resultados antes expuestos muestran que la forma en que se provean las referencias de velocidad puede contribuir mucho a minimizar el efecto de dichas perturbaciones.

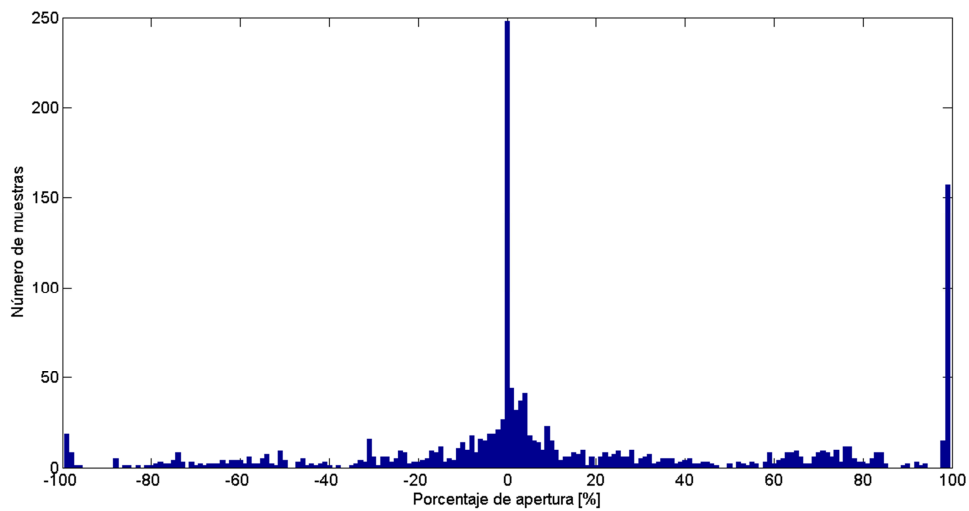


Figura 5.19 Histograma de la variable de salida del controlador considerando un perfil de velocidad basado en escalones contaminado con ruido blanco de banda limitada. Los valores negativos de apertura corresponden al uso del freno y los positivos, al acelerador. Para generar el histograma se utilizó un décimo de las muestras disponibles, es decir, se escogieron las muestras cada 100[ms] para realizarlo, a fin de mejorar la visibilidad de los resultados.

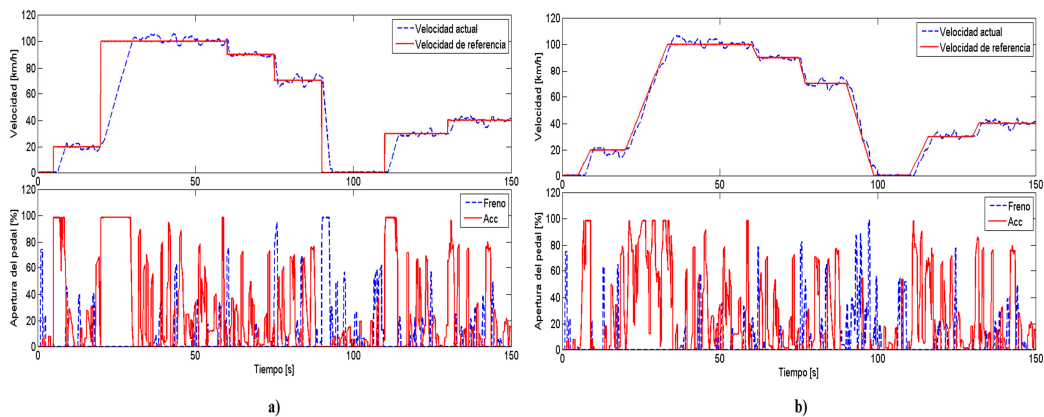


Figura 5.20 Respuesta del sistema al perturbar la retroalimentación de la variable controlada con un ruido blanco de banda limitada de intensidad 5. En los gráficos superiores se muestra la variable controlada y en los inferiores la variable manipulada. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que en b) se utiliza uno basado en rampas.

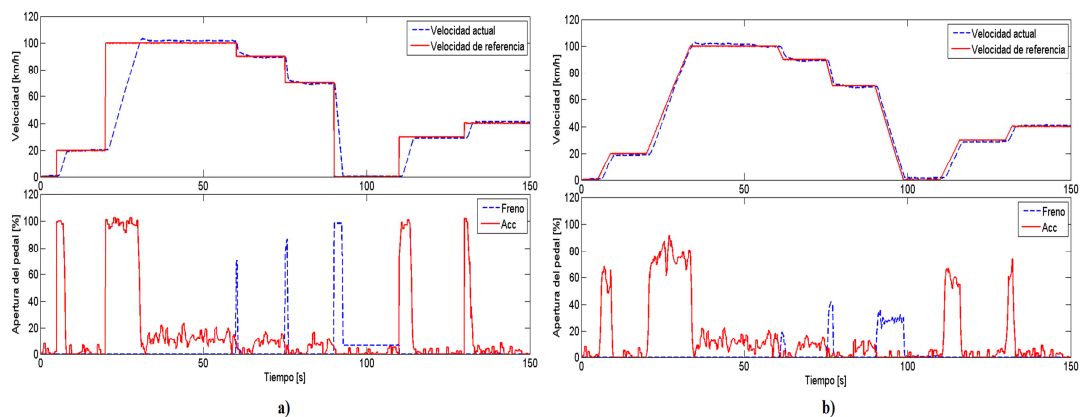


Figura 5.21 Respuesta del sistema al perturbar la variable manipulada con un ruido blanco de banda limitada de intensidad 5. En los gráficos superiores se muestra la variable controlada y en los inferiores la variable manipulada. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que en b) se utiliza uno basado en rampas.

Lugar Perturbación	Perfil de velocidad	RMSE
Sin perturbaciones	Escalones	14.88
	Rampas	2.64
Variable controlada	Escalones	14.6
	Rampas	3.46
Variable manipulada	Escalones	14.93
	Rampas	2.7

Tabla 5.7 RMSE calculados para las pruebas realizadas con perturbaciones en la variable controlada y la variable manipulada del sistema. En todas las pruebas se perturbaron estas variables de forma independiente y no simultánea.

Los resultados expuestos, y el análisis de ellos, muestran que el diseño del controlador difuso de velocidad propuesto, que se exhibe en el Capítulo 3, junto con las modificaciones inducidas por los resultados, es adecuado, permitiendo realizar un control de velocidad que cumple correctamente con los requerimientos de usuario y que resulta ser robusto frente a perturbaciones.

5.2 Evaluación del el controlador difuso de dirección

Con el controlador difuso de dirección se realizaron pruebas similares a las mostradas en la sección anterior (controlador difuso de velocidad). Estas pruebas buscan evaluar el rendimiento y desempeño del controlador frente a diferentes situaciones que incluyen (i) cambios abruptos en la referencia de ángulo de las ruedas, como sucedería en una situación de emergencia, (ii) cambios paulatinos que reflejan un manejo normal del vehículo, lo cual es más cercano a la

conducción cotidiana de un ser humano, y (iii) la respuesta del sistema controlado a perturbaciones para poder evaluar la robustez del controlador diseñado. Todas estas pruebas buscan poder evaluar el diseño ante situaciones semejantes a las que pudieran verificarse en una implementación de escala real; con la salvedad que en este caso se utiliza un ambiente simulado, a fin de poder verificar que el controlador cumpla con los requisitos de diseño y no presente inconsistencias que pudieran generar situaciones de peligro. Además de las pruebas antes mencionadas se realizarán pruebas en paralelo modificando, dentro de ciertos márgenes, los parámetros de diseño a fin de evaluar las respuestas del controlador de dirección a estos cambios y la sensibilidad del mismo a estas modificaciones.

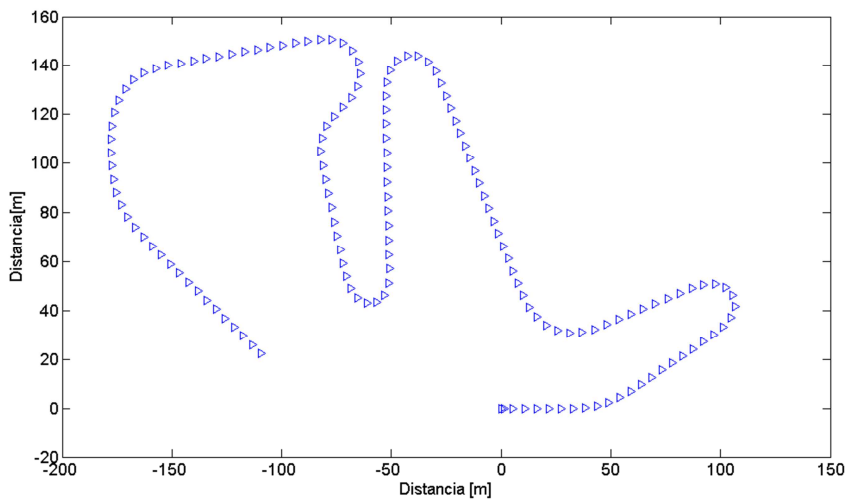


Figura 5.22 Trayectoria en el plano X-Y generada por la referencia de velocidad mostrada en la Figura 5.23 y teniendo el vehículo una velocidad constante de 20 [km/h]. La trayectoria comienza en el origen y sigue la dirección indicada por las flechas.

Las primeras pruebas se realizaron utilizando una referencia formada por escalones que, a 20 [km/h] como velocidad constante, genera una trayectoria sobre el plano X-Y como la que se ve en la Figura 5.22. Para esta primera prueba se utilizaron los conjuntos difusos expuestos en la Figura 3.11, Figura 3.13 y Figura 3.15 además de la base de reglas que expone la Tabla 3.6. En las pruebas realizadas, a menos que se indique explícitamente lo contrario, se consideró que el vehículo se desplazaba a una velocidad constante igual a 20 [km/h]. La Figura 5.23 muestra los resultados obtenidos al llevar a cabo la simulación.

De los resultados obtenidos se puede visualizar que si bien el sistema se acerca a la referencia de velocidad y es evidente que hay una intención patente de seguir el perfil de ángulo de la ruedas provisto como referencia, el controlador no logra que la variable controlada

converja a un error permanente nulo. De hecho, la variable controlada oscila en torno a la referencia deseada de ángulo. La situación observada no está ligada a la referencia de ángulo, pensando que lo abrupto de los cambios pudiera generar algún tipo de inestabilidad del sistema, ya que como se ve en la Figura 5.24 al utilizar un perfil de referencia que considera cambios paulatinos de la referencia de ángulo de las ruedas, basados en rampas, los resultados obtenidos son similares a los conseguidos al utilizar un perfil de referencia de ángulo de las ruedas basado en escalones, lo que da prueba de que existe un problema de diseño o hay factores que no han sido considerados en él y que están afectando el desempeño del controlador.

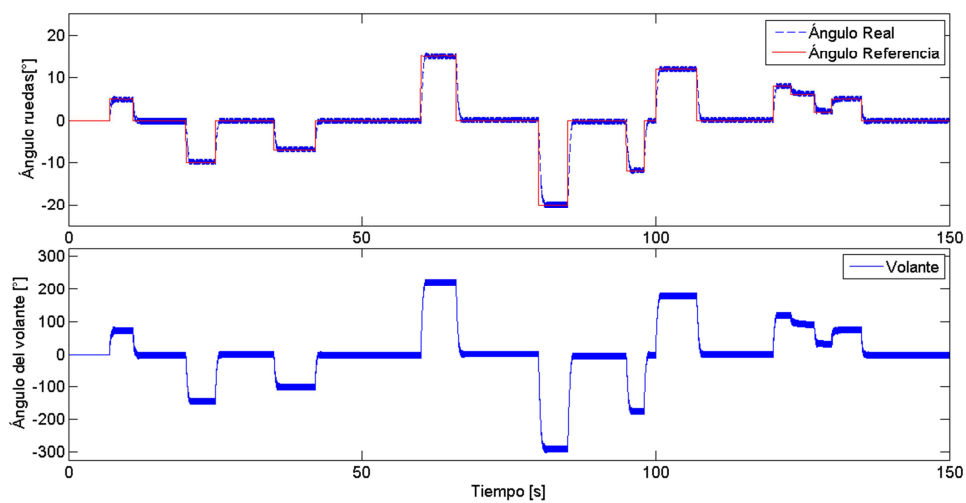


Figura 5.23 Respuesta del sistema al supervisar el ángulo de la ruedas proveyendo un perfil de ángulo del ruedas basado en escalones como referencia. En el gráfico superior se observa la variable controlada (línea discontinua azul) y la referencia de ángulo (línea continua roja). En el gráfico inferior se ve la variable manipulada que genera las variaciones en la variable controlada.

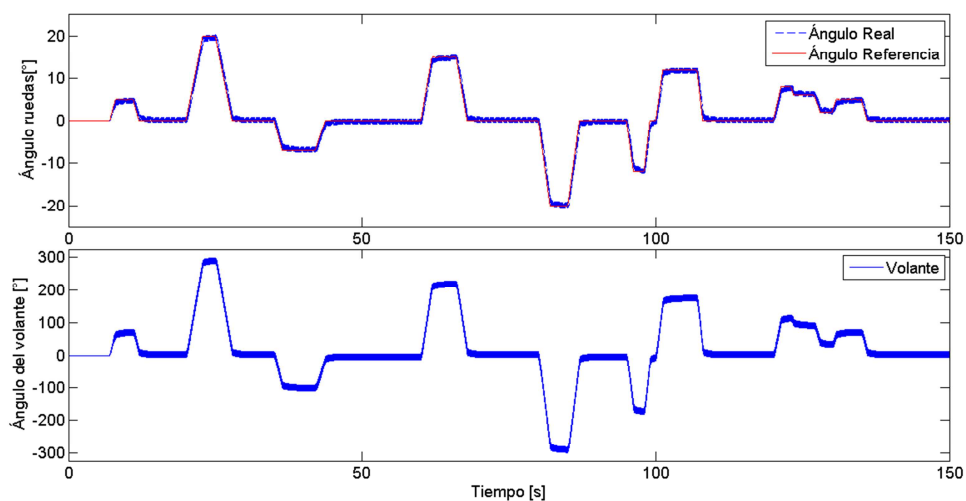


Figura 5.24 Respuesta del sistema al supervisar el ángulo de la ruedas proveyendo un perfil de ángulo del ruedas basado en rampas como referencia.

En este sentido, es importante notar que la definición de los requerimientos del controlador difuso de dirección se realizó considerando los resultados de pruebas empíricas realizadas en el vehículo. Para el sobrenivel máximo se determinó que, dado que un ángulo de las ruedas de 1° causa una variación significativa en la trayectoria del vehículo, si se toman en cuenta las referencias de ángulo comúnmente utilizadas un sobrenivel máximo de 10% permite evitar situaciones de inestabilidad del vehículo en el rango de ángulo que pueden alcanzar las ruedas. Por otra parte, tal como sucede con el controlador difuso de velocidad, el tiempo de estabilización deseado no puede definirse directamente, ya que depende directamente de la magnitud de la variación del ángulo de las ruedas. Por ello es necesario definir un tiempo de estabilización normalizado que considere la magnitud del cambio de ángulo para poder valorar correctamente el desempeño del vehículo. Teniendo presente el tiempo promedio que demora un conductor humano en girar completamente las ruedas en una dirección e incorporando la información del retardo que tiene el modelo de la dirección con el cual se está trabajando se puede establecer que un tiempo de estabilización normalizado adecuado para el controlador difuso de dirección en todo el rango de ángulo de las ruedas posibles es $0.15 \left[\frac{s}{\circ} \right]$. Teniendo claros cuales son los requisitos impuestos al controlador difuso de dirección, al observar los resultados se visualiza en ellos que, aunque técnicamente para todas las referencias inferiores a 12° el sistema nunca logra entrar en la banda del 5% de la referencia y en ningún caso logra la convergencia al error permanente nulo, si se desprecian las oscilaciones se aprecia que en todos los casos el “tiempo de estabilización” normalizado es inferior a los $0.15 \left[\frac{s}{\circ} \right]$. De igual manera se ve que para todas las referencias el sobrenivel no supera los 0.7° . Este valor, aunque pequeño, no es depreciable, ya que corresponde a más de los 10% de la referencia para todas aquellas referencias de ángulo inferiores a 7° . Por lo tanto, no obstante se cumple el requisito de sobrenivel máximo para la mayoría de las referencias, esta situación no es global y afecta principalmente a las referencias de ángulo de menor magnitud. A pesar de lo anterior, se puede ver que el controlador se aproxima a cumplir con los requisitos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo, por lo que en una primera instancia, realizando varias simplificaciones, se puede decir que el controlador difuso de dirección cumpliría los requisitos de sobrenivel máximo y tiempo de estabilización, algo que debe ser refrendado por los resultados que se obtenga al realizar las modificaciones necesarias para eliminar la estabilidad crítica que se aprecia en la respuesta del sistema.

Es importante notar que, dada la magnitud de las oscilaciones que se perciben en los resultados obtenidos, pruebas empíricas muestran que el sistema es capaz de mantener y seguir una trayectoria pese a que se presenten las oscilaciones vistas en los resultados. Como se pudo ver en los resultados las oscilaciones no superan los 0.7° de amplitud en el ángulo de las ruedas, lo equivale a 10.3° de amplitud de las oscilaciones en el ángulo del volante. Considerando la magnitud de la oscilación, el período de las oscilaciones y el hecho de que el sistema de actuación actúa como un filtro natural para las perturbaciones de alta frecuencia el diseño propuesto podría realizar teóricamente un control adecuado sobre el ángulo de las ruedas, pese a estabilidad crítica que se ve en la respuesta. Sin embargo, pese a que es probable que la implementación de este diseño pudiera tener resultados positivos, el desgaste de los actuadores, consumo de corriente y calentamiento de los motores, junto con la robustez disminuida frente a perturbaciones que implica un control críticamente estable hacen poco deseable esta implementación y necesario a la vez realizar modificaciones que apunten a estabilizar la supervisión del ángulo de las ruedas del vehículo.

Si se toma en cuenta la trayectoria de control sobre el mapa de reglas del sistema, expuesto en la Tabla 5.8,⁷ se puede visualizar que la trayectoria de control alterna entre dos reglas, la regla 23 y la regla 27, cuya acción de control genera que el sistema no logre converger al valor deseado y oscile en torno a la referencia provista para el ángulo de las ruedas. De estos resultados se aprecia que la oscilación que se ve en la variable controlada se produce debido al desfase que existe entre la recepción de la acción de control en los actuadores y la actualización del valor actual del ángulo de las ruedas. Este desfase genera que, debido a que el valor actual del ángulo de las ruedas no se actualiza hasta tres tiempos de muestreo después de modificado el ángulo del volante, la variación del error de ángulo de las ruedas crece y provoca que la modificación de la variable manipulada sea desproporcionada respecto al valor real de la variable controlada, traduciendo esto en que el sistema sea críticamente estable.

El análisis de la evolución de la variable manipulada no sugiere que el problema pueda ser solucionado modificando la base de reglas, ya que las acciones de control propuestas son congruentes con las entradas y se observa la convergencia de la trayectoria de control al centro

⁷ La Tabla 5.8 toma en consideración una referencia positiva de 5° . Las trayectorias de control para otros valores son muy similares. Para valores de referencia negativos las trayectorias son simétricas a las generadas con referencias positivas tomando como eje de simetría el conjunto de reglas asociadas al conjunto difuso “Cero” de la variable error de ángulo de las ruedas.

del mapa de reglas por una ruta que se encuentra en su vecindad. De hecho si se modifican las reglas #23 y #27, cambiando el consecuente de las reglas de PM a PP, cuyo resultado se expone en la Figura 5.25, se ve que aunque disminuye la oscilación el sistema sigue siendo críticamente estable. Al observar la trayectoria de control se puede notar que la oscilación en torno a la referencia está asociada a los conjuntos difusos definidos para la variable lingüística variación del error de ángulo de las ruedas más bien que a la variable error de ángulo de las ruedas (esto por supuesto sin considerar los conjuntos difusos ligados a la variable de salida del controlador) ya que, como se ve en el caso del error de ángulo de las ruedas, este rápidamente converge a la vecindad del conjunto difuso “Cero” en la parte central del mapa de reglas. A fin de evaluar la sensibilidad de la respuesta a las modificaciones en la cota del recorrido universal y el factor de normalización, en la Figura 5.26 se muestran los resultados de las modificaciones realizadas.

Δu		$\Delta \alpha_e$						
		NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
α_e	NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	CE
	NM	NG	NG	NG	NM	NP	CE	PP
	NP	NG	NG	NM	NP	CE	PP	PM
	CE	NG	NM	NP	CE	PP	PM	PG
	PP	NM	NP	CE	PP	PM	PG	PG
	PM	NP	CE	PP	PM	PG	PG	PG
	PG	CE	PP	PM	PG	PG	PG	PG

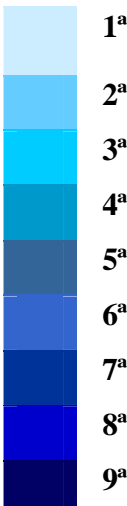


Tabla 5.8 Evolución de la variable manipulada sobre el mapa de reglas para el controlador difuso de dirección. . Las reglas gatilladas se muestran en colores y el orden de activación se muestra en orden ascendente desde el color más claro al más oscuro. Las reglas se numeran por filas de arriba abajo y de izquierda a derecha, por lo que las reglas gatilladas que generan la trayectoria serían: 39-40-30-33-32-25-34-22-27-22-27, quedando oscilando entre las reglas 22-27 de forma permanente al alcanzar las vecindades de la referencia.

De los resultados obtenidos se puede visualizar que el modificar el recorrido universal del error de ángulo no logra modificar los resultados obtenidos previamente de forma significativa, tal como se desprendía de la trayectoria de control expuesta en la Tabla 5.8, modificándose únicamente de forma leve el tiempo de estabilización, aunque como se mencionaba previamente no se puede hablar de que el sistema se estabilice. De hecho la disminución del recorrido universal provoca un aumento en la amplitud de las oscilaciones de la respuesta. Esto es congruente con lo que se expone en la trayectoria de control, ya que, al acotarse el recorrido universal, los valores que ahora poseen un grado de pertenencia significativo a los conjuntos

difusos “Pequeño” y “Medio” disminuirían su pertenencia a estos conjuntos y aumentarían su grado de pertenencia en los conjuntos difusos “Medio” y “Grande”, lo cual de acuerdo al mapa de reglas, desplazaría la trayectoria de control hacia abajo en este caso particular lo que se traduce en un aumento en la inestabilidad del sistema.

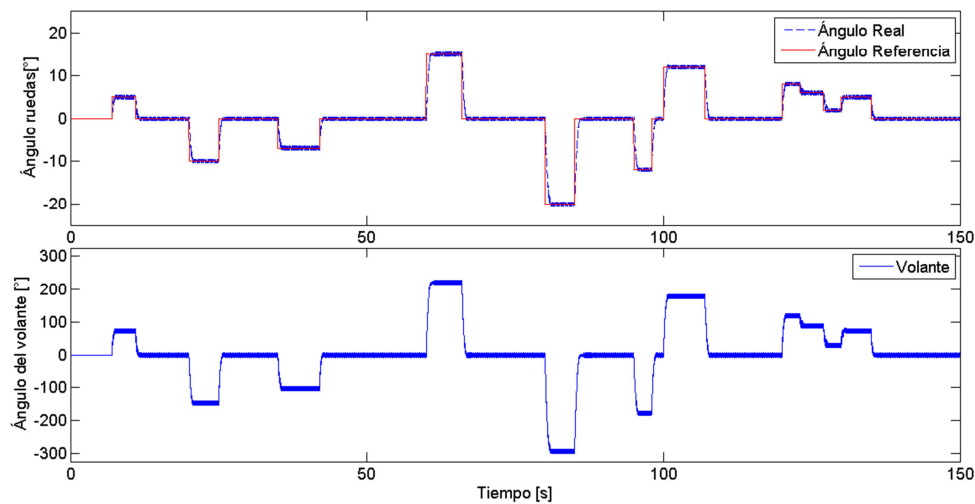


Figura 5.25 Respuesta del sistema al supervisar el ángulo de la ruedas provyendo un perfil de ángulo del ruedas basado en escalones como referencia y modificando los consecuentes de las reglas 23 y 27.

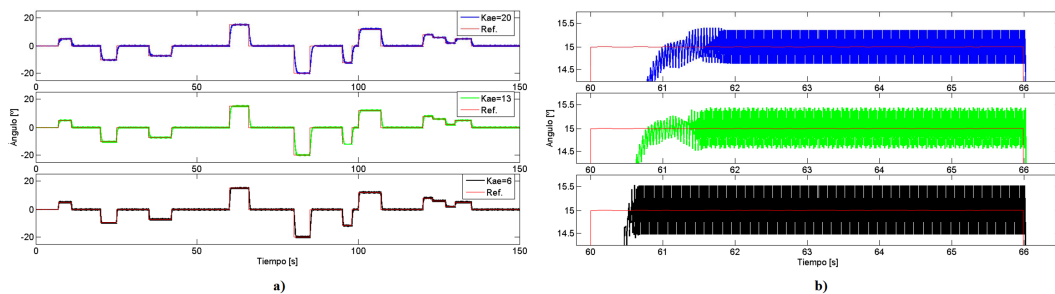


Figura 5.26 Respuesta del sistema frente a una referencia de ángulo de las ruedas utilizando diferentes factores de normalización para la variable lingüística *error de ángulo*. Los gráficos de arriba abajo muestran los resultados conseguidos usando como factor de normalización $K_{ae}=20^\circ$, $K_{ae}=13^\circ$ y $K_{ae}=6^\circ$ respectivamente. En a) se muestra el seguimiento que la variable controlada realiza de la referencia en todo el intervalo de duración de la prueba. En b) se visualiza una ampliación de los resultados expuestos en a) entre los tiempos [60,66] [s].

De manera similar, al estudiar la evolución de la variable manipulada y el mapa de reglas propiamente tal, se puede ver que la modificación del recorrido universal de la variación del error de ángulo tampoco representa una opción factible para estabilizar la respuesta del sistema, ya que como se ve en la Tabla 5.8, las oscilaciones se producen cuando la variable controlada se encuentra en las vecindades de la referencia, lo cual se evidencia en el hecho del que el error de ángulo pertenezca con un grado de pertenencia 0.88 al conjunto difuso “Cero”; por lo que serían causadas, sin considerar la variable de salida en este análisis, por la alternación de los conjuntos

difusos asociados a la variación del error de ángulo. Si el recorrido universal de esta variable se acota esto incrementaría la inestabilidad del sistema aumentando la amplitud de las oscilaciones, ya que la trayectoria de control se desplazaría hacia los extremos, desde la perspectiva del plano horizontal, del mapa de reglas. Por otra parte si se extiende el recorrido universal, de la trayectoria de control se desprende que esta variación en el diseño del controlador difuso de dirección permitiría que el sistema tendiera a la estabilidad. Esto es congruente con el planteamiento que propone la teoría de control clásica, ya que extender el recorrido universal de la variación del error de ángulo de las ruedas, modificando en igual medida el factor de normalización, corresponde a disminuir el aporte de la parte proporcional del controlador difuso de dirección; lo que permite que el sistema críticamente estable tienda a la estabilidad, tal como se puede apreciar en la Figura 5.27.

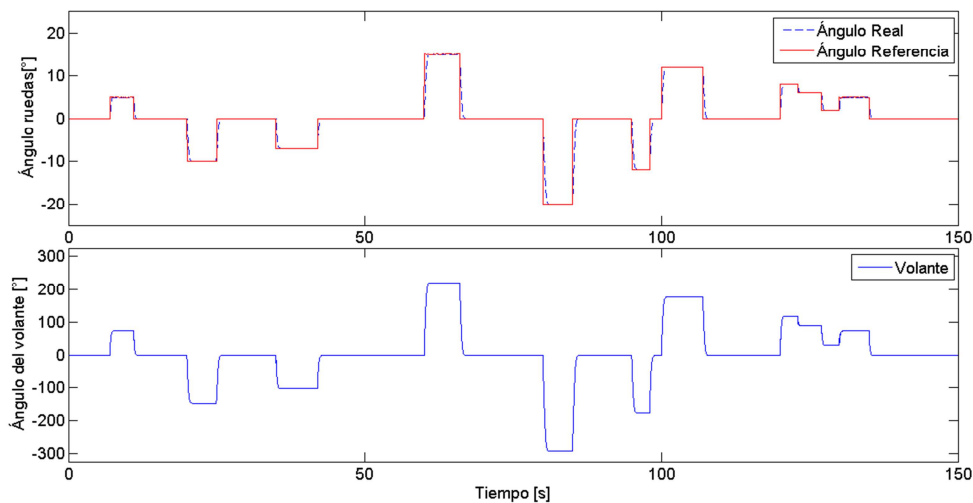


Figura 5.27 Respuesta del sistema frente a una referencia de ángulo de las ruedas basada en escalones, usando como factor de normalización $K_{aed}=3^\circ$. En el gráfico superior se ve la variable controlada (línea discontinua azul) siguiendo a la referencia de ángulo (línea continua roja). En el gráfico inferior se observa la variable manipulada.

Pese a los resultados obtenidos, que concuerdan con la teoría esta modificación de diseño presenta el problema que, además de aumentar el tiempo de estabilización del sistema al disminuir el aporte de la parte proporcional del controlador difuso, si se tiene presente la ligazón que hay entre la ángulo de las ruedas y el ángulo del volante, se puede ver que de la forma como está definido el controlador difuso de dirección, y las consideraciones empíricas que llevaron a la elección de los valores para las cotas de los recorridos universales de las variables; para cada instante de muestreo el controlador no generará un acción de control que provoque un cambio en el error de ángulo de las ruedas superior a los 1.5° . Por lo tanto, al tener presente lo anterior el

extender el recorrido universal implica que existirán conjuntos difusos que en muy pocas situaciones presentaran un grado de pertenencia no nulo, equivaliendo esta modificación a truncar el mapa de reglas y realizar la mayoría del ajuste de ángulo de las ruedas a través del error de ángulo. Ahora bien, considerando nuevamente la teoría de control clásico se puede ver que en el caso de sistemas supervisados por controladores PI que presentan un respuesta críticamente estable, la solución pasa por disminuir la ganancia proporcional, la ganancia integral o ambas. Teniendo en cuenta esto, desde el punto de vista del controlador difuso de dirección, lo anterior se puede llevar a cabo cambiando el factor de denormalización de la variable de salida del controlador. En particular si se disminuye esta ganancia eso es equivalente a disminuir el aporte de la parte integral y la parte proporcional del controlador difuso, lo que teóricamente se traduciría en eliminar las oscilaciones visualizadas en los resultados previos, haciendo el sistema más estable. Además, desde la perspectiva del diseñador resulta más sencillo visualizar los efectos de modificar este parámetro de diseño que cambiar aquellos asociados a la variación el error de ángulo de las ruedas.

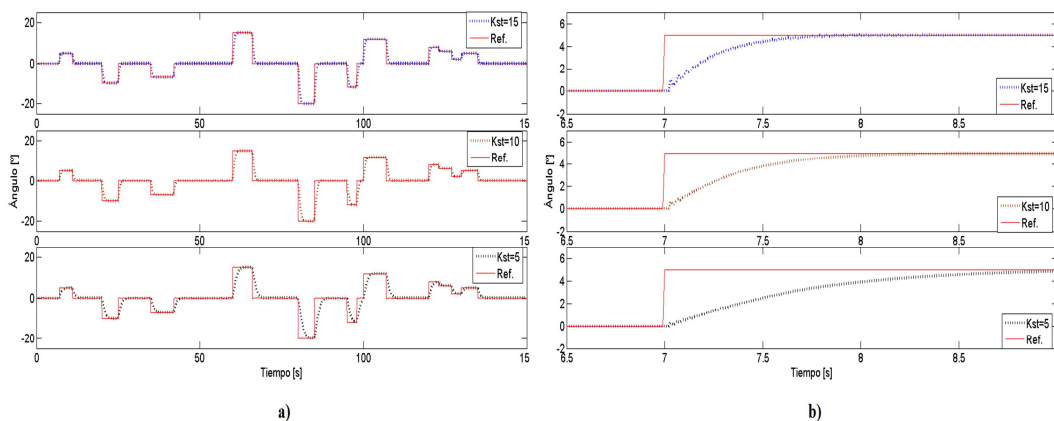


Figura 5.28 Respuesta del sistema al seguir una referencia de ángulo basado en escalones, considerando diferentes factores de denormalización para la variable de salida del controlador difuso de dirección. De arriba abajo los gráficos muestran los resultados obtenidos al utilizar como factor de denormalización $K_{st}=15^\circ$, $K_{st}=10^\circ$ y $K_{st}=5^\circ$ respectivamente. En a) se muestra el seguimiento que la variable controlada realiza de la referencia en todo el intervalo de duración de la prueba. En b) se visualiza una ampliación de los resultados expuestos en a) entre los tiempos [6,5, 9] [s].

Los comentarios de los párrafos anteriores muestran que la mejora en el desempeño del controlador difuso de dirección pasa entonces por la variar el factor de denormalización de la variación del ángulo del volante. En la Figura 5.28 se muestran los resultados al evaluar distintas cotas para el recorrido universal de la variable de salida del controlador difuso con dos perfiles de ángulo diferentes como referencia. Como se puede notar la modificación de la cota del recorrido universal, y consecuentemente del factor de denormalización de la variable de salida, permite

mejorar el desempeño del controlador disminuyendo las oscilaciones en la variable controlada. Sin embargo, de los resultados se ve que la disminución de la cota superior provoca un aumento en el tiempo de estabilización del sistema. Considerando los requisitos impuestos para el tiempo de estabilización para el controlador de dirección, se determinó que el factor de denormalización de 15° , es decir una cota superior para el recorrido universal de 21° , permite obtener los mejores resultados que cumplen con los requisitos para el tiempo de estabilización que se desea tenga la variable controlada.

Es importante notar que la disminución del recorrido universal de la variación del ángulo del volante lleva implícita una alteración al rango de valores que barrerá la variación del error de ángulo de las ruedas debido a la relación lineal que hay entre el ángulo de las ruedas y el ángulo del volante. Sin embargo, esta alteración es menor que la producida al modificar el recorrido universal de la variación del error de ángulo de las ruedas.

Los resultados obtenidos y el análisis de ellos expuesto previamente inducen las modificaciones de diseño expuestas en el Capítulo 3, particularmente las que se pueden visualizar en la Figura 3.16.

Analizando la variable manipulada del sistema, se puede observar de los resultados obtenidos que las acciones de control son congruentes con las modificaciones que sufren la referencia y el ángulo de las ruedas, tal como se esperaría de un correcto diseño del sistema de control. En particular se puede ver que, en las pruebas llevadas a cabo, que frente a modificaciones abruptas en la referencia, el volante se mueve rápidamente a fin de poder alcanzar la referencia de ángulo de las ruedas. Este estilo de conducción no es deseable, pero si es apropiado para situaciones de emergencia en que se requiere que las ruedas cambien de dirección de forma veloz, como cuando se necesita esquivar un obstáculo. Tal como sucede en el diseño del controlador difuso de velocidad, el controlador difuso de dirección no tiene limitada su salida a fin de poder brindar siempre la máxima respuesta, lo que permite poder responder adecuadamente a cambios bruscos de referencia de ángulo de las ruedas. Por lo tanto, la forma que tenga el perfil de ángulo que se provea como referencia es el que determinará el estilo de conducción en lo referido a la dirección. En la Figura 5.29 se muestran los resultados utilizando como referencia un perfil de ángulo de las ruedas basado en rampas que representan cambios paulatinos en la referencia de ángulo. Como se ve de los resultados, al modificar la referencia el

controlador lleva a cabo un seguimiento suave de la referencia, que preserva los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo del controlador.

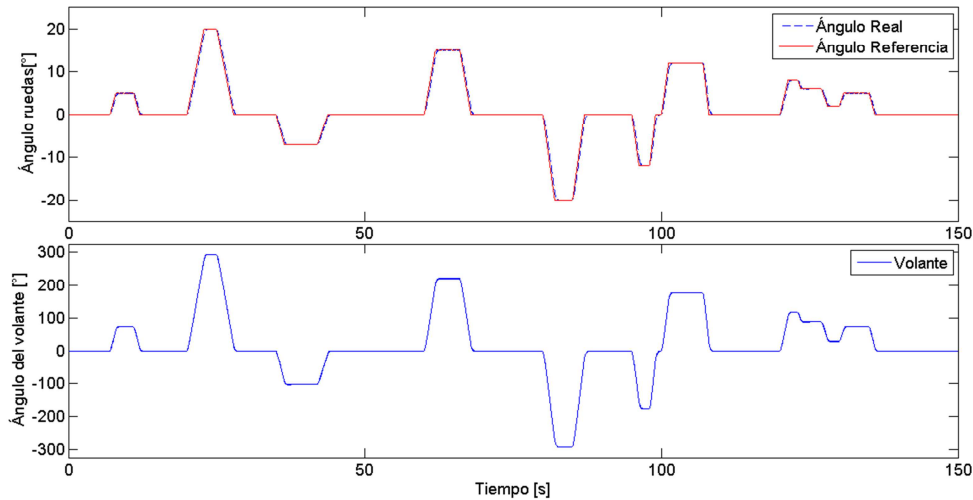


Figura 5.29 Respuesta del sistema al seguir una referencia de ángulo basada en rampas, incorporando las modificaciones realizadas al controlador difuso de dirección. En el gráfico superior se ve la variable controlada (línea discontinua azul) siguiendo a la referencia de ángulo (línea continua roja). En el gráfico inferior se observa la variable manipulada.

Los resultados obtenidos muestran que las acciones de control realizadas por el controlador difuso de dirección son adecuadas y acordes a la referencias de ángulo de las ruedas que se provee, no observándose ninguna situación anómala para la diferentes referencias utilizadas en las pruebas. Esto resulta ser relevante, especialmente si se considera que en una aplicación de escala real, los factores de acoplamiento hacen de vital importancia que las respuestas del controlador se ciñan a los tiempos de estabilización requeridos y sean capaces de generar un seguimiento adecuado de las referencias para no exponer a situaciones de riesgo al vehículo y su entorno.

Con el propósito de estudiar la robustez del controlador difuso de dirección se realizaron una serie de pruebas utilizando como referencia diferentes perfiles de ángulo de las ruedas y niveles de ruido. El ruido utilizado para generar las perturbaciones corresponde a ruido blanco de banda limitada. En la Figura 5.30a) y la Figura 5.31a) se pueden observar los resultados utilizando un perfil de ángulo de las ruedas basado en escalones y ruido blanco de banda limitada de intensidad 0.5 y 2 para el ruido en la referencia de ángulo. En las Figura 5.30b) y la Figura 5.31b) se puede visualizar la misma situación, pero usando como referencia un perfil de ángulo basado en rampas.

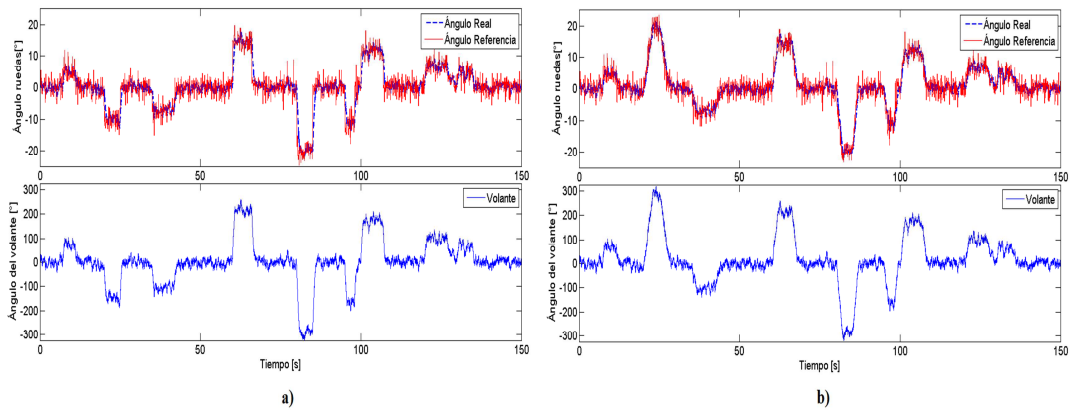


Figura 5.30 Respuesta del sistema frente a la presencia de perturbaciones en la referencia de ángulo de las ruedas. El ruido que contamina a la referencia es ruido blanco de banda limitada de intensidad 0.5. Los gráficos superiores corresponden a la variable controlada y los inferiores a la variable manipulada del sistema. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que b) se utiliza un perfil de velocidad basado en rampas.

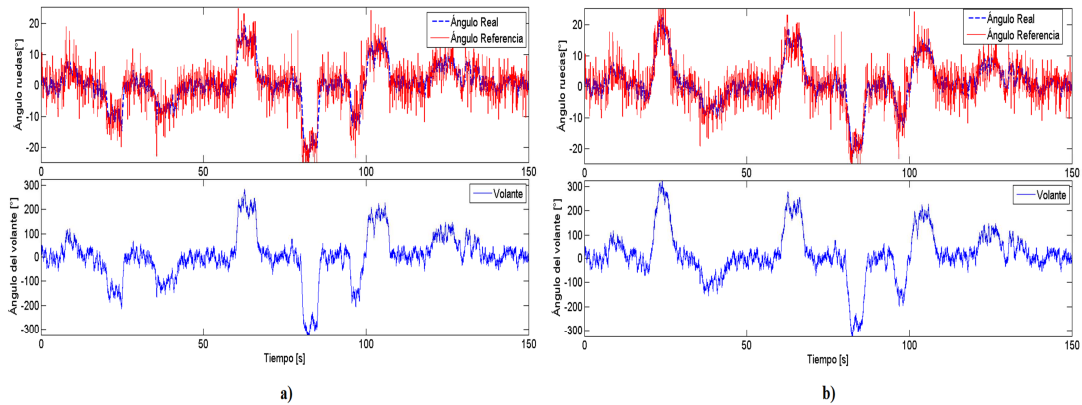


Figura 5.31 Respuesta del sistema frente a la presencia de perturbaciones en la referencia de ángulo de las ruedas. El ruido que contamina a la referencia es ruido blanco de banda limitada de intensidad 2. Los gráficos superiores corresponden a la variable controlada y los inferiores a la variable manipulada del sistema. En a) se usa un perfil de velocidad basado en escalones como referencia mientras que b) se utiliza un perfil de velocidad basado en rampas.

Los resultados obtenidos de estas pruebas muestran que, desde un punto de vista cualitativo, aún en la presencia de un referencia ruidosa el controlador la variable controlada sigue la tendencia de la referencia lo cual da cuenta que pese a la presencia de la perturbación el controlador es capaz de ejercer una acción de control adecuada que apunta a alcanzar la referencia de ángulo de las ruedas en todos los casos estudiados. Esta apreciación es apoyada al estudiar el cumplimiento de los requerimientos fijados para el controlador en lo referido a sobrenivel máximo y tiempo de estabilización. De los resultados se puede ver para los cambios de referencia producto del ruido, en ningún caso el sobrenivel supera los 0.2° lo cual se enmarca en el requerimiento de tener un sobrenivel máximo de 10%. De igual manera, si se analiza el tiempo de estabilización de la variable controlada, dado que el ruido tiene un tiempo de muestreo

de 100 [ms], resulta imposible que la variable controlada sea capaz de seguir exactamente a la referencia ruidosa, pero si se considera el valor medio de las referencias que componen el perfil de ángulo de las ruedas se puede notar que el tiempo de estabilización normalizado en todos los casos cumple con el requisito de que sea inferior a los $0.15 \left[\frac{s}{\circ} \right]$.

Intensidad de ruido	Perfil de velocidad	RMSE
Sin perturbaciones	Escalones	1.83
	Rampas	0.56
0.5	Escalones	2.70
	Rampas	2.23
2	Escalones	4.60
	Rampas	4.42

Tabla 5.9 RMSE calculado para los diferentes perfiles de ángulo de las ruedas usados como referencia e intensidades de ruido que perturban a la referencia. La variable manipulada y controlada no se someten a ninguna perturbación.

El análisis RMSE de los resultados corrobora las apreciaciones cualitativas realizadas en el párrafo previo. En la Tabla 5.9 se puede visualizar que, tal como se esperaría desde el punto de vista teórico, a medida que aumenta el ruido en la referencia el RMSE aumenta congruentemente. De los resultados se observa que en el caso de las referencias contaminadas con ruidos de mayor intensidad, el error respecto a la situación no perturbada aumenta más del doble independiente del perfil de ángulo que se utilice para llevar a cabo la prueba. Aunque este aumento es significativo, se encuentra dentro de los rangos esperados considerando la magnitud del ruido que contamina la señal de referencia y tiempo de muestreo del mismo, que en este caso es de 100 [ms]. Como se ve en la Figura 5.30 y la Figura 5.31, una intensidad de ruido 2, implica tener variaciones en la referencia de hasta 14° , lo cual dado el tiempo de muestreo utilizado, el cual si se normaliza se puede ver que es dos órdenes de magnitud inferior al tiempo de estabilización normalizado impuesto como requerimiento para el controlador. Esto explica por qué el controlador es incapaz de seguir completamente la referencia ruidosa y el error, coherentemente con el nivel de ruido presente, aumenta tan significativamente. Pese a lo anterior y a los RMSE calculados, los resultados revelan que el controlador sigue adecuadamente la tendencia de la referencia de ángulo de las ruedas no obstante el ruido presente en la referencia. El estudio de la señal de ruido filtrada ayuda a verificar la afirmación anterior, ya que utilizando la DWT para filtrar la señal de ruido haciendo uso de la wavelet de Haar con un nivel de aproximación 8, se obtienen los resultados que se exponen en la Figura 5.32. Gráficamente, se aprecia que la variable controlada del sistema

sigue la referencia filtrada, lo que muestra que pese a la presencia de ruido el controlador busca seguir la tendencia principal de la referencia no desestabilizándose y preservando los requerimientos del controlador; que es precisamente lo que se desea en una situación en que el sistema se enfrenta a perturbaciones. Al calcular el RMSE, utilizando ahora la referencia filtrada, se puede ver que se obtiene un RMSE de 2.18, en el caso de la referencia de ángulo basada en escalones, y 1.95 cuando la referencia utilizada es basada en rampas. Como se aprecia estos valores son similares a los obtenidos al calcular el RMSE cuando el sistema estaba libre de perturbaciones lo que refrenda el análisis y da cuenta de la robustez del sistema frente a este tipo de perturbaciones.

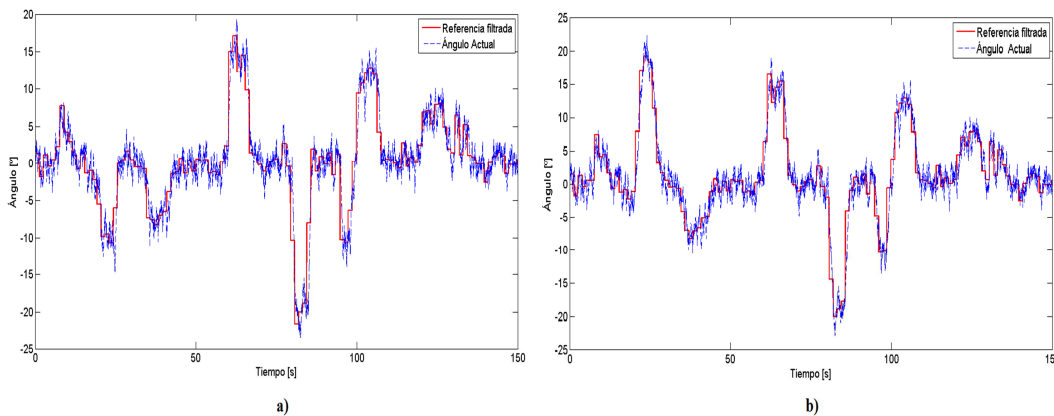


Figura 5.32 Comparación entre el ángulo actual de las ruedas del vehículo y la referencia de ángulo perturbada filtrada mediante DWT con un nivel de aproximación 8. La referencia filtrada se ve en línea continua roja y el ángulo actual de las ruedas en línea discontinua azul. En a) se observa el perfil de ángulo basado en escalones filtrado y en b) se ve el perfil de ángulo basado en rampas filtrado.

Es importante notar que, pese a los buenos resultados ante las perturbaciones estudiadas, pruebas adicionales llevadas a cabo con niveles de ruido más elevados muestran que para perturbaciones que inducen cambios superiores a 5° en la referencia, el controlador muestra una degeneración significativa en su rendimiento y robustez. Además hay que considerar que en el ambiente simulado en el que se realizaron las pruebas no se consideran los factores de acoplamiento entre la velocidad y la dirección, siendo patente que un ruido de 2° en la referencia de ángulo de las ruedas a 20 [km/h] puede que sea manejable por el controlador difuso de dirección, ese mismo ruido a 100 [km/h] causar que el controlador se muestre totalmente poco robusto frente a esa perturbación y se desestabilice el sistema, provocando una situación de peligro con consecuencias trágicas en un ambiente no simulado. Por lo tanto, aunque a nivel de simulación se ha podido constatar la estabilidad y robustez del controlador difuso de dirección, en

una implementación de escala real es fundamental volver a realizar pruebas para asegurar la robustez del controlador frente a las perturbaciones estudiadas.

Además de realizar pruebas con perturbaciones en la referencia de ángulo de las ruedas, se llevaron a cabo pruebas con perturbaciones similares en el ángulo actual de las ruedas usado en la realimentación del controlador. Debido a la simplicidad del modelo que relaciona la variable controlada con la variable manipulada, que relaciona estas variables a través de una ganancia y un retardo, no se realizaron pruebas con la variable manipulada, ya que básicamente el efecto observado sería el mismo que al estudiar perturbaciones en la variable controlada. En la Figura 5.33 se muestran los resultados para las perturbaciones en el ángulo actual de las ruedas. En la Tabla 5.10 se muestran los cálculos del RMSE para los resultados expuestos en las figuras indicadas previamente. El análisis de los resultados obtenidos en estas pruebas es similar al realizado para pruebas con perturbaciones en la referencia de ángulo, verificándose también en este caso la robustez del controlador difuso de dirección, a nivel de simulación, frente a las perturbaciones descritas.

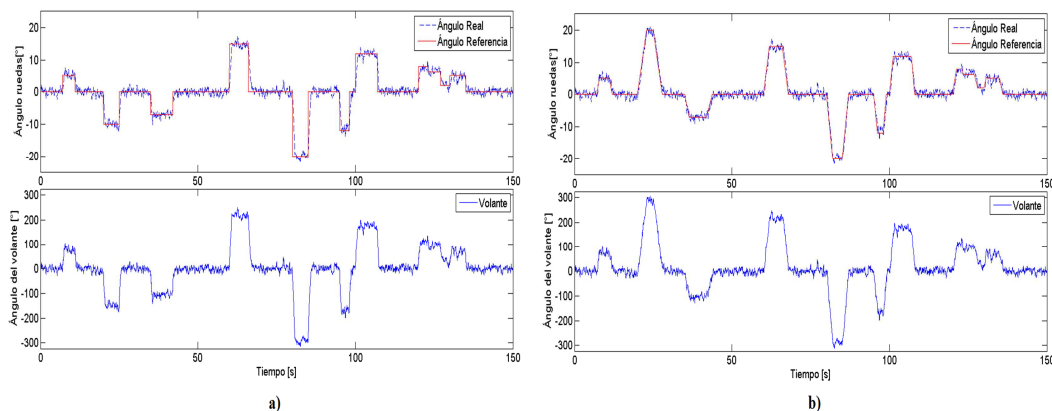


Figura 5.33 Respuesta del sistema al perturbar la retroalimentación de la variable controlada por el controlador difuso de dirección con un ruido blanco de banda limitada de intensidad 2. En los gráficos superiores se muestra la variable controlada y en los inferiores la variable manipulada. En a) se usa un perfil de ángulo basado en escalones como referencia mientras que en b) se utiliza uno basado en rampas.

Adicionalmente a las pruebas realizadas con ruido en las variables que inciden en las entradas y las salidas del controlador, se hicieron pruebas modificando el retardo que introducen los actuadores. Esta puede ser una perturbación relevante, ya que a priori no se sabe cuánto es el retardo que hay entre que se indica un ángulo en el volante y que se realice la modificación en el ángulo de las ruedas acorde al ángulo de volante señalado. Por lo tanto, es necesario estudiar cómo afecta el retardo a la estabilidad y los requisitos del controlador difuso de dirección. Para

todas las pruebas realizadas se consideró un retardo de 3 tiempos de muestreo, es decir, 30 [ms] entre el envío de la acción de control al volante y la actualización del ángulo de las ruedas. En la Figura 5.34 y la Figura 5.35 se muestran los resultados obtenidos al considerar diferentes retardos entre las señales antes mencionadas.

Lugar Perturbación	Perfil de velocidad	RMSE
Sin perturbaciones	Escalones	1.83
	Rampas	0.56
Variable controlada	Escalones	2.02
	Rampas	0.974

Tabla 5.10 RMSE calculados para las pruebas realizadas con perturbaciones en la variable controlada por el controlador difuso de dirección.

Los resultados obtenidos muestran que ante cambios en el tiempo de retardo, el controlador es capaz de ejercer una acción de control adecuado, buscando seguir correctamente la referencia de ángulo de la ruedas y convergiendo a un error permanente nulo en todos los casos analizados. Sin embargo, como se aprecia en los resultados y en la Tabla 5.11, el tiempo de estabilización aumenta considerablemente a medida que aumenta el retardo, llegando a ser un 400% superior en el caso más extremo estudiado. Estos resultados conseguidos muestran que para retardos superiores a los 50 [ms], pese a que el sistema es capaz de controlar adecuadamente el ángulo de las ruedas, desde el punto de vista de seguimiento de referencias y convergencia al error permanente nulo, los tiempos de estabilización normalizados medidos son inaceptables para la estrategia de control y la aplicación de escala real en la que se desea implementar el controlador difuso de dirección, ya que una situación de emergencia en que se requiriera llevar a cabo una acción de control rápida, como esquivar un obstáculo o doblar un curva pronunciada, el sistema sería capaz de realizarla en un tiempo que no implicara un colisión u otra situación de peligro para el vehículo de escala real o el entorno. Por lo tanto, los resultados muestran que, tomando en consideración todos los factores analizados, el sistema no es lo suficientemente robusto en lo que se refiere a las modificaciones en el retardo entre la acción de control y la actualización del error de ángulo de las ruedas.

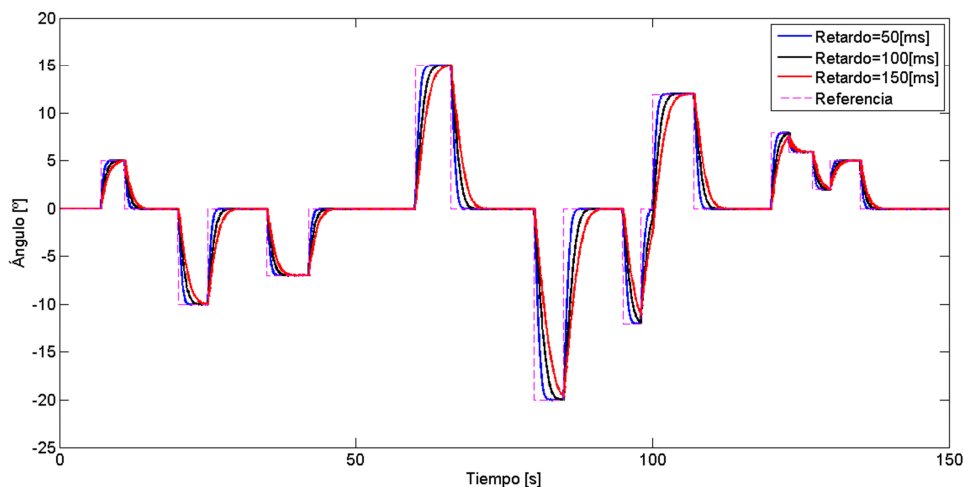


Figura 5.34 Respuesta del sistema de dirección frente a una referencia de ángulo basada en escalones, considerando diferentes retardos para la retroalimentación de la variable controlada por el controlador difuso de dirección. Los retardos considerados en esta prueba son 50 [ms] (línea continua azul), 100 [ms] (línea continua negra) y 150 [ms] (línea continua roja).

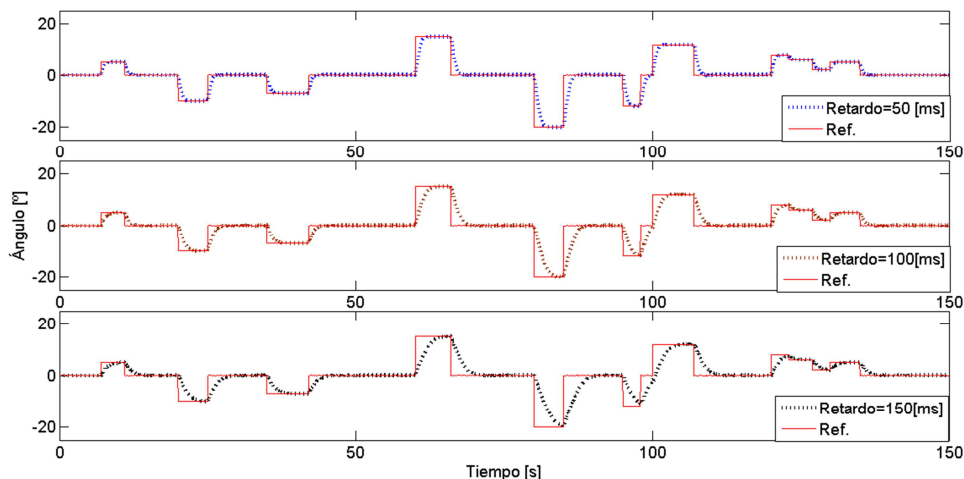


Figura 5.35 Desglose de los resultados expuestos en la Figura 5.34 para los distintos retardos. De arriba abajo se muestran los resultados conseguidos considerando un retardo de 50 [ms], 100[ms] y 150 [ms] respectivamente.

Los resultados de las pruebas ante perturbaciones y su análisis revelan que el controlador difuso de dirección, a nivel de simulación, es robusto frente a perturbaciones de ruido en las señales de entradas, observándose que frente a perturbaciones sigue adecuadamente las referencias de ángulo de las ruedas y cumple con los requisitos de sobrenivel máximo y tiempo de estabilización impuestos; aunque para las perturbaciones asociadas al retardo en la realimentación no se mostró lo suficientemente robusto como para garantizar una supervisión

adecuada de la variable controlada lo que sugiere que en este caso se requieren tomar medidas adicionales para incrementar la estabilidad del sistema.

Var.de ángulo [°]	Retardo 30 [ms]	Retardo 50[ms]	Retardo 100 [ms]	Retardo 150 [ms]
3	0.47[s] – 0.16[s/°]	0.76[s] – 0.25[s/°]	1.51[s] – 0.5[s/°]	2.2[s] – 0.73[s/°]
5	0.76[s] – 0.15[s/°]	0.95 [s] - 0.19 [s/°]	1.8[s] – 0.36 [s/°]	2.85 [s] – 0.57 [s/°]
7	0.73[s] -0.1 [s/°]	1.1 [s] – 0.16[s/°]	2.06[s] – 0.29 [s/°]	3[s] – 0.43[s/°]
10	0.8[s] – 0.08[s/°]	1.2[s] – 0.12 [s/°]	2.26[s] – 0.23 [s/°]	3.33 [s] – 0.33 [s/°]
15	0.91[s] – 0.06[s/°]	1.4 [s] – 0.09[s/°]	2.59[s] – 0.17[s/°]	3.8[s] – 0.25[s/°]
20	1.03[s] – 0.05[s/°]	1.6 [s] – 0.08 [s/°]	2.93[s] – 0.15[s/°]	4.3 [s] – 0.22[s/°]

Tabla 5.11 Tiempo de estabilización y tiempo de estabilización normalizado para los diferentes cambios de ángulo de las ruedas, considerando distintos retardos en la retroalimentación de la variable controlada por el controlador de dirección.

Los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas con el controlador difuso de dirección, expuestos en esta sección, dejan ver que el diseño y las modificaciones propuestas a partir de los resultados obtenidos, exhibidos en el Capítulo 3, son adecuados y que permiten supervisar correctamente el ángulo de las ruedas, generando acciones de control ajustadas a las referencias que se buscan seguir. La evidencia del correcto diseño se visualiza al notar que el controlador difuso de dirección en todos los resultados generados minimiza el error permanente y cumple con los requisitos de sobrenivel máximo y tiempo de estabilización, mostrándose a su vez robusto frente a la mayoría de las perturbaciones estudiadas.

6. Conclusiones

En la presente Memoria de Título se exhibe el diseño y la implementación a nivel de simulación de dos controladores difusos desacoplados para la velocidad y dirección de un vehículo de escala real. Los resultados conseguidos permiten establecer que se pudo dar un cumplimiento cabal a los objetivos que se plantearon al comienzo de este trabajo, tanto para el controlador difuso de velocidad como para el controlador difuso dirección, ya que como se visualiza a través de este trabajo, se logró diseñar correctamente los controladores difusos de velocidad y dirección, implementarlos adecuadamente a nivel de simulación utilizando el software MATLAB® – Simulink, validarlos a través de simulaciones y finalmente sintetizar este trabajo en un programa funcional que permita implementar en el futuro ambos controladores en un vehículo de escala real.

Respecto al controlador difuso de velocidad se puede concluir que el diseño propuesto permite efectuar un control adecuado de la velocidad a nivel de simulación, logrando realizar un correcto seguimiento de la referencias de velocidad, tanto aquellas que involucran cambios abruptos de velocidad como aquellas que representan un estilo de conducción más suave; y cumpliendo con los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo, aspectos que resultan fundamentales si se contempla la implementación del controlador difuso de velocidad en un ambiente no simulado, donde existen situaciones en que hay límites de velocidad establecidos y/o se requiere que el sistema responda adecuadamente en un cierto tiempo máximo, como ocurre frente a un suceso imprevisto o un contexto de emergencia, lo que demanda que el controlador se ciña a estos requerimientos en todo el rango de velocidades. Es posible establecer además que la definición de las entradas y salidas del controlador difuso de velocidad siguiendo una configuración similar a un controlador PI clásica, fue de gran importancia para brindar robustez a la sistema y asegurar la convergencia de la variable controlada a la referencia, obteniéndose un error permanente nulo, o como sucedió en muchos casos, lo suficientemente pequeño para no ser percibido por un conductor humano (inferior a los 3 [km/h]).

Entre las consideraciones realizadas en el diseño del controlador de velocidad destaca el realizar el control de velocidad en un marco unificado, es decir, que el controlador fuera capaz de ejercer acciones de control en un amplio rango de velocidades, que incluyera velocidades urbanas

(inferiores a los 40[km/h]) como aquellas propias de un ambiente de carretera; y que la mayoría de las acciones de control fueran realizadas utilizando el acelerador, a fin de evitar la alternación constante entre el pedal de aceleración y el freno. Todos los resultados obtenidos y analizados en este trabajo permiten concluir que ambas consideraciones fueron eficazmente implementadas en el controlador difuso de velocidad diseñado. Las pruebas realizadas consideraron un amplio rango de velocidades, así como diferentes estilo de conducción que afectaban las transiciones entre una referencia de velocidad y otra, y en todas ellas se pudo observar que el controlador efectivamente era capaz de seguir las referencias de forma apropiada, minimizando el error permanente y cumpliendo con los requisitos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo en todos los casos y referencias de velocidad estudiadas, incluso cuando se efectuaban transiciones abruptas entre una referencia de velocidad perteneciente a las velocidades denominadas “de carretera” a una velocidad perteneciente al rango de las velocidad urbanas. Este punto es importante, ya que aunque es natural esperar que frente a una transición paulatina de las referencias de velocidad, como por ejemplo ir de 20 a 100 [km/h], aumentando la referencia de 10[km/h]; el controlador pueda ejercer acciones de control que permitan alcanzar y seguir adecuadamente las referencias, el hecho que frente a cambios drásticos de la referencia de velocidad el controlador supervise y siga correctamente estos cambios permite concluir positivamente que el controlador difuso de velocidad diseñado es robusto frente a los cambios de punto de operación y que puede controlar la velocidad del vehículo en un amplio rango de velocidades.

Por otra parte, en lo que se refiere a la variable manipulada, todos los resultados muestran que, incluso frente a perturbaciones, sobre el 70% de las acciones de control son realizadas por el acelerador. Es importante notar que esos resultados consideran las acciones de control sobre todas las referencias de velocidad estudiadas. Si se consideran sólo las referencias que involucran cambios de velocidad no superiores a los 20 [km/h] se puede ver que ese porcentaje aumenta a un 85%, considerando el caso más perturbado. Incluso, si no se toma en cuenta cuando ningún pedal está presionado para efectuar la estadística, el porcentaje de veces en que solo el acelerador participa de las acciones de control supera el 70%. Todo esto permite decir que ciertamente este aspecto de diseño se logró instaurar plenamente en el controlador de velocidad expuesto en este trabajo.

Todas las modificaciones realizadas al diseño original del controlador difuso de velocidad, que dieron forma al diseño final que se expone en la Sección 3.1, fueron realizadas apuntando a mejorar el desempeño y el rendimiento del controlador en función de los resultados obtenidos a partir de las simulaciones, lo cual se logró completamente tal como se concluye en los párrafos anteriores. Sin embargo, es importante destacar que, pese al buen desempeño logrado por el controlador a nivel de simulación gracias a las modificaciones realizadas al diseño, en una aplicación de escala real no necesariamente estos cambios debieron haberse realizado, o no en la misma magnitud. La razón de esto es que, la mayoría de las variaciones que se incorporaron al diseño original fueron hechas producto de los problemas que generaba la variable “integral del error de velocidad”, cuyo incremento provocaba un aumento en el sobrenivel máximo y el tiempo de estabilización de la velocidad del vehículo. En particular de los resultados obtenidos se puede observar que una vez alcanzada la referencia o sobrepasada la velocidad, tendía a mantenerse incluso si se dejaba de presionar el acelerador. Esto se explica debido a que el modelo utilizado para llevar a cabo las pruebas no incorporaba plenamente varios factores y perturbaciones que inciden en la velocidad actual del vehículo. En un ambiente no simulado, se observa que para velocidades superiores a los 40 [km/h] si se deja presionar el acelerador el vehículo rápidamente desacelera, no obstante ese fenómeno producido por la fricción del aire y el roce con el pavimento entre otros, no está plenamente implementado en el simulador utilizado para validar el controlador difuso de velocidad.

Teniendo presente la explicación anterior, se puede concluir que una aplicación de escala real es muy probable que el incremento y la invariabilidad temporal del valor de la integral del error de velocidad que se observa en las simulaciones, no sea tan pronunciado, por lo que parte de las modificaciones realizadas al diseño original del controlador difuso de velocidad pudieran ser innecesarias o derechamente disminuir el rendimiento del controlador. En ese sentido, forma parte del trabajo futuro el poder valorar en un ambiente no simulado el desempeño del diseño final del controlador difuso de velocidad y, independiente de los resultados obtenidos, evaluar el desempeño del diseño original del controlador de velocidad y, en base a esa evaluación, ver la factibilidad de implementarlo en una aplicación de escala real.

En este punto es relevante también hacer mención de otro factor que no ha sido tomado en cuenta en el diseño del controlador y las pruebas realizadas, que resulta importante para la correcta supervisión de la velocidad: las marchas del vehículo. El controlador difuso de velocidad

diseñado para acelerar o frenar el vehículo según cuán lejos se encuentre la velocidad actual de la referencia de velocidad. En ese sentido la apertura de los pedales para un cambio de referencia es la misma independiente de la velocidad actual que lleve el vehículo, asumiendo que el efecto que produce el presionar algún pedal es el mismo. En un ambiente no simulado, esto no es cierto, ya que dependiendo de la marcha en que se encuentre el vehículo, lo que a su vez depende de la velocidad actual del vehículo, la magnitud de la apertura del pedal producirá un efecto diferente en la aceleración del vehículo. Si un vehículo va a 20 [km/h] y se presiona a fondo el acelerador, la aceleración, y a su vez la potencia y torque del motor, no serán los mismos que si se presiona a fondo cuando se va a 100[km/h]. De hecho el presionar a fondo el acelerador cuando se va a bajas velocidades puede provocar situaciones peligrosas, además del consumo innecesario de combustible que genera esta acción. Los resultados expuestos en el Capítulo 5 muestran que esta situación puede ser mitigada por el control supervisor, o el control remoto, encargado de proveer las referencias de velocidad al controlador difuso de velocidad de una manera adecuada que evite las transiciones abruptas de velocidad en la referencia, por ejemplo utilizando rampas en el perfil de velocidad que se provee como referencia. Esto permite tener transiciones suaves, una apertura más acotada de los pedales y, a la vez, implica un mayor tiempo de subida para alcanzar las referencias de velocidad.

Sin embargo, es posible establecer que el uso de referencias con transiciones más suaves, o el escalonamiento de referencias, no da solución al problema de fondo, porque en una aplicación de escala real existen situaciones que requieren un cambio abrupto y rápido de velocidad y esto se debe llevar a cabo sin dañar los actuadores del vehículo o poner en riesgo la seguridad del mismo y su entorno. Por ello, es posible concluir que una aplicación de escala reales es necesario incorporar estrategias de control o estructuras auxiliares adicionales al controlador difuso de velocidad que aseguren un control adecuado de la velocidad. Entre las opciones que se pueden considerar para una implementación futura está el utilizar un esquema de programación de ganancias a la salida del controlador difuso de velocidad de tal manera, dependiendo de la marcha en la que se encuentre el vehículo, la ganancia de denormalización del acelerador y el freno se ajuste, a fin de limitar la apertura de los pedales para las velocidades más bajas (inferiores a 40[km/h]). De esta forma, incluso para cambios de velocidad en un amplio rango se garantiza que el control de la velocidad se lleve a cabo manipulando los actuadores tal como lo haría un conductor humano experimentado. Otra posibilidad sería tener varios controladores difusos, como el diseñado en este trabajo, funcionando en paralelo cada uno con su

ganancia de denormalización de la salida del controlador ajustada para un rango de velocidades, e incluso se podrían modificar la base de reglas y los conjuntos difuso de ser necesario; de tal forma que dependiendo de cuál es la velocidad actual se seleccionara cual controlador lleva a cabo el control de la velocidad. La evaluación de estas opciones y otras que pudieran existir al momento de realizar la implementación en escala real del controlador de velocidad, junto con la selección de la estrategia más apropiada, es parte fundamental de la implementación final del sistema de control de la velocidad y forma parte del trabajo posterior a esta Memoria de Título.

Las pruebas realizadas permiten establecer plenamente que el controlador difuso de velocidad diseñado es robusto frente a las perturbaciones estudiadas, generando acciones de control congruentes con las referencias de velocidad provistas y ejerciendo un correcto seguimiento de las referencias, o su tendencia, incluso cuando el nivel de ruido que afectaba al sistema era no despreciable (pertenencia cercana a cero, en el conjunto difuso “Cero” asociado al error de velocidad). Aunque esta conclusión es válida a nivel de simulación, dado que las perturbaciones estudiadas emulan contaminación de la señales de referencia, retroalimentación de la variable controlada y variable manipulada con niveles de ruido significativos, y el controlador fue capaz de llevar la variable controlada a las vecindades de la referencias en todos los casos, es lógico concluir que frente a los mismos niveles de ruido en una implementación de escala real, ya sea por interferencia magnética, problemas en la conexión de los cables, sensibilidad de los sensores de los actuadores a perturbaciones externas u algún otro motivo, el controlador difuso diseñado presentará una respuesta similar a la observada en las simulaciones, con algunas variaciones en el rendimiento producto de otros factores que pudieran afectar los actuadores y, por ende, la respuesta del sistema. Además hay que tener en cuenta, que todos los actuadores y sensores incorporan filtros que permiten eliminar gran parte del ruido que puede contaminar las señales, por lo que los niveles de ruidos esperados en aplicación de escala real se espera que sean menores que los estudiados en las situaciones de contaminación más extrema.

Debido a la complejidad del sistema dinámico que se intenta controlar, existen muchas otras perturbaciones que afectan el sistema, y en particular, a la velocidad del vehículo. La incorporación de todas las perturbaciones en el modelo utilizado para las simulaciones es una tarea difícil, por no decir imposible, y que pudiera hacer innecesariamente más complejo el simulador. Gran parte de estas perturbaciones adicionales no estudiadas pueden se mitigadas a través de proveer convenientemente las referencias de velocidad, especialmente aquellas que

tienen que ver con el factores ambientales. Por ejemplo, si el vehículo transita bajo lluvia o en un camino no asfaltado, estas situaciones alteran y perturban el sistema original, pero su efecto puede ser disminuido si, verbigracia, los cambios de velocidad, ya sea para frenar o acelerar, se hacen en tiempos más largos (disminuyendo la pendiente de la rampa). Naturalmente, existen alteraciones que no pueden ser atenuadas mediante el control supervisor, y su efecto y alcance deben ser estudiado exhaustivamente pudiendo generar modificaciones adicionales en la base de reglas y conjuntos difusos que forman parte del controlador a fin de robustecer la respuesta del sistema a dichas perturbaciones. Teniendo esto presente se puede decir que el estudio y análisis de las perturbaciones no consideradas en la implementación del controlador difuso a nivel de simulación, así como la elección de los parámetros de diseño del controlador de velocidad que deben ser modificados para anular o atenuar los efectos de dichas perturbaciones, forma parte significativa del trabajo futuro, que permitirá la implementación plena del controlador difuso en una aplicación de escala real.

Haciendo referencia al controlador difuso de dirección se establece que, en vista de los resultados obtenidos, el diseño del controlador difuso de dirección permite realizar un control efectivo sobre el ángulo de las ruedas a nivel de simulación, minimizando el error de seguimiento y el error permanente, y cumpliendo plenamente con los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo impuestos al controlador diseñado en todo el rango de ángulo de las ruedas que es capaz de barrer el vehículo. Las respuestas obtenidas para los diferentes perfiles de ángulo de las ruedas estudiados dan muestra de que el controlador puede responder adecuadamente tanto a cambios bruscos de referencia como a modificaciones paulatinas de ella, en todos los casos satisfaciendo los requerimientos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo. Lo anterior es una característica de vital importancia en una implementación de escala real, ya que se espera que el controlador sea capaz de seguir adecuadamente referencias que reflejen una conducción normal y suave, y al mismo tiempo logre responder efectivamente frente a referencias expresen un estilo de manejo más brusco, consecuencia de perturbaciones, como por ejemplo el esquivar un obstáculo. Especialmente en estas últimas situaciones es donde se valora el hecho de que el controlador lleve la variable controlada a la referencia en el tiempo y con el sobrenivel impuestos, ya que de otra forma en una aplicación de escala real se pudieran producir situaciones que pusieran en riesgo la integridad del vehículo.

Sin embargo, es digno de destacar que, pese a la efectividad y correcto desempeño del controlador difuso de dirección diseñado, todos los resultados obtenidos así como su análisis y las conclusiones previas son válidas en el ambiente simulado en el que se evaluó el controlador difuso de dirección. El movimiento lateral de un sistema dinámico como un vehículo es altamente complejo, además de que son muchas las perturbaciones y factores externos que influyen en la dinámica del mismo. El modelo simplificado utilizado para la evaluación del controlador difuso de dirección no considera muchos de los aspectos significativos de la dinámica del vehículo como la alineación de los neumáticos, el desgaste de los mismos, ángulo de inclinación del pivote de las ruedas, diferencia coaxial de los ejes del vehículo, entre otros. Todos estos factores en una aplicación real alteran la dirección del vehículo e inciden en el ángulo de las ruedas que se desea controlar. A lo anterior hay que sumarle los factores de acople entre la velocidad y la dirección, junto con todas las perturbaciones no consideradas producto del entorno y las condiciones ambientales. Si se toman en cuenta todos estos factores se puede concluir que en una aplicación de escala real se espera que, pese a que la estructura general del diseño del controlador difuso de dirección sigue siendo válida, exista una reducción en el rendimiento y desempeño del controlador difuso de dirección diseñado, siendo altamente probable necesario incorporar modificaciones adicionales al controlador de dirección a fin de poder ejercer un control adecuado sobre el ángulo de la rueda al ser afectado por los factores y perturbaciones antes mencionadas. La magnitud y alcance de los cambios que deban realizarse dependerá de los factores que más afecten al sistema dinámico, lo cual deberá ser evaluado con pruebas empíricas. En vista de esto, forma parte del trabajo futuro el evaluar el desempeño del controlador diseñado en un ambiente no simulado y determinar las variaciones que deban introducirse al diseño para lograr obtener un rendimiento apropiado según el criterio de los evaluadores.

En particular, respecto a los factores de acople entre la velocidad y la dirección, dado que el diseño de los controladores es totalmente desacoplado, este factor no está considerado en el diseño del controlador difuso de dirección. Parte importante de los efectos de acople entre velocidad y dirección puede ser manejados por el control supervisor, o el operador humano maneje el control remoto, emulando lo que realiza un conductor humano, es decir, básicamente disminuir la velocidad cuando se va a realizar un cambio de dirección significativo (cambio del ángulo de las ruedas superior a 3°) y evitar realizar maniobras bruscas cuando se desplaza a velocidades superiores a 40 [km/h]. No obstante, en caso de que el control supervisor no sea capaz de manejar o mitigar completamente los efectos de acoplamiento, la flexibilidad del diseño

del controlador difuso de dirección permite agregar reglas adicionales que permitan incorporar esos efectos. La determinación de si es necesario realizar modificaciones adicionales para tratar con los factores de acople, requiere de pruebas en un ambiente no simulado, por lo que forma parte de las labores futuras que se desprenden de este trabajo. Por lo tanto, aunque los factores de acoplamiento entre la velocidad y la dirección son un factor importante a considerar para el control del ángulo de las ruedas, se puede establecer que son enteramente manejables tanto a nivel de estrategias de control de alto nivel como mediante modificaciones específicas al diseño del controlador difuso.

La robustez del controlador difuso de dirección diseñado frente a perturbaciones fue evaluada principalmente estudiando la contaminación con ruido de las referencias de ángulo de las ruedas y de la retroalimentación de la variable controlada del sistema. Los resultados obtenidos permiten concluir que el controlador es robusto frente a estas perturbaciones, incluso en situaciones donde la magnitud del ruido era comparable a las referencias de ángulo de las ruedas, observándose que el controlador sigue adecuadamente la referencia, o su tendencia dependiendo del nivel de ruido, y cumple con los requisitos de tiempo de estabilización y sobrenivel máximo. Aunque estos resultados son a nivel de simulación, resulta coherente establecer que en una aplicación de escala real los resultados conseguidos frente a este tipo de perturbaciones debieran ser similares, aunque con desempeño inferior, producto de los factores adicionales que perturban y afectan al sistema.

Además de las perturbaciones que involucran ruido en las señales, se realizaron pruebas considerando variaciones en el retardo entre que se ejerce la acción de control y la actualización de la variable controlada. Los resultados obtenidos permiten establecer que el controlador diseñado no es robusto frente a estas perturbaciones, ya que aunque la variable controlada lograba converger a la referencia, obteniéndose un error permanente nulo, el tiempo de estabilización aumentaba considerablemente, escapando a los requerimientos impuestos al controlador. Esto es muy relevante, ya que en una aplicación de escala real, existen situaciones que requieren una respuesta rápida de parte del controlador, respuesta que frente a una perturbación que modifique el retardo el controlador de dirección no es capaz de brindar. En ese sentido, es posible concluir que para incrementar la robustez del controlador frente a este tipo de perturbaciones resulta necesario incorporar estructuras adicionales al diseño, como predictores, que permitan contar con la información adecuada para llevar a cabo una supervisión adecuada de la variable controlada.

Sin embargo, el diseño de predictores de estado requiere un conocimiento del sistema dinámico preciso, además del elevado coste computacional, lo cual incorpora una dificultad adicional al sistema de control, más aún al considerar que fue la complejidad del sistema dinámico y el evitar el desarrollo de modelos complicados lo que llevo a utilizar un controlador difuso para ejercer el control de la dirección. Por ello, la evaluación de la incorporación de esta técnica u de otras que permitan mejorar la robustez del sistema, deberá realizarse en función de la magnitud de la perturbación, determinada a partir de pruebas en un ambiente no simulado, lo que forma parte del trabajo futuro propuesto en este trabajo.

Como se ha comentado previamente, además de las perturbaciones indicadas, existen otras que no han sido estudiadas en este trabajo debido a que no están consideradas en el modelo utilizado para simular el sistema dinámico. La complejidad de muchas de ellas, la dificultad para ser modeladas y carencia de información hacen que sea difícil incorporar todas las perturbaciones al modelo utilizado, por lo que el estudio de estas perturbaciones debe realizarse empíricamente a fin de establecer las modificaciones que debe sufrir el diseño del controlador difuso de dirección para mantener su desempeño frente a ellas. El estudio de las perturbaciones que afectan al sistema, así como la implementación de medidas o modificaciones al diseño del controlador difuso de dirección, forma parte del trabajo futuro a realizar para mejorar el diseño presentado en esta memoria.

En ambos controladores diseñados un punto importante a verificar es la sensibilidad y resolución de los actuadores a las referencias provistas por los controladores difusos de velocidad y dirección. Dado el modelo utilizado para simular el vehículo, así como los supuestos y simplificaciones que este modelo contiene, pequeñas modificaciones en los valores de las referencias que generan los controladores pueden causar cambios significativos en el sistema. Sin embargo, en una implementación de escala real los actuadores tienen una cierta resolución mínima, por lo que aunque a nivel de simulación la convergencia a la referencia de velocidad se logre presionando un 70.5% el acelerador, si la resolución del actuador es de un 1%, el sistema quedará oscilando entre 70 y 71%, o elegirá uno de los dos valores con el consecuente error asociado. De igual manera, a nivel de simulación un cambio de 45° a 55° en el volante pudiera provocar una modificación significativa en la trayectoria, pero en la aplicación de escala real el cambio sea poco perceptible. Estas consideraciones asociadas a la resolución y sensibilidad de los actuadores, pudieran generar errores que en algún punto pudieran, especialmente si son

reiterativos, afectar el desempeño y la supervisión de las variables controladas del sistema. Por lo tanto, se puede establecer que tanto la resolución como la sensibilidad de los actuadores son factores que en una implementación de escala real deben ser analizados, a fin de identificar su real efecto sobre el sistema controlador y evaluar la posibilidad de realizar variaciones puntuales al diseño de los controladores difuso de velocidad y dirección.

Finalmente, se puede concluir, en base a los resultados obtenidos, que el control difuso es una estrategia efectiva para supervisar la velocidad y dirección de un vehículo, mostrando ser una herramienta sencilla de implementar, flexible y que permite incorporar eficazmente el amplio conocimiento heurístico disponible sobre el vehículo. La efectividad y robustez de los controladores difusos diseñados fue ampliamente estudiada en un ambiente simulado, siendo posible establecer que en una aplicación de escala real es de esperar que, dada la robustez propia de los sistemas difusos, el sistema de control lleve las variables controladas a las vecindades de las referencias, pero con una disminución del desempeño y rendimiento de los controladores respecto a los resultados conseguidos mediante simulación, producto de los factores y perturbaciones presentes en un ambiente no simulado. Sin embargo, las características de los sistema difusos que dan forma a los controladores, permite que mediante modificaciones adicionales al diseño de los controladores se pueda asegurar el correcto seguimiento de la referencias y que los requerimientos deseados para el sistema se cumplan.

Referencias

- [1] Haskara, I.; Hatipoglu, C.; Ozguner, U.; , "Combined decentralized longitudinal and lateral controller design for truck convoys," *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on* , vol., no., pp.123-128, 9-12 Nov 1997.
- [2] Rajamani, R.; Han-Shue Tan; Boon Kait Law; Wei-Bin Zhang; , "Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* , vol.8, no.4, pp.695-708, Jul 2000.
- [3] Mammarr, S.; Netto, M.; , "Integrated longitudinal and lateral control for vehicle low speed automation," *Control Applications, 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on* , vol.1, no., pp. 350- 355 Vol.1, 2-4 Sept. 2004.
- [4] Wei Li; Jianmin Duan; , "Lateral and longitudinal dynamic coupling control for vehicles lane changing," *Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on* , vol., no., pp.4628-4632, 7-9 July 2010
- [5] Li, Guo; Liu, Huawei; Wang, Xu; , "The integrated controller of the steering /braking stability for the vehicles," *Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), 2010 International Conference on* , vol.3, no., pp.288-291, 24-26 Aug. 2010
- [6] Furagaki, S., Kuroda, H., Minowa, T., Kayano, M., Yoshikawa, T., Takenaga, H., Nakamura, K., Takano, K.: "An adaptive cruise control using wheel torque management technique". *SAE Technical Paper. no. 980606* (1998).
- [7] Prestl, W., Sauer T., Steinle, J., Tshchernoster, O.: The BMW Active Cruise Rajamani, R. and Zhu, C. (2002).: Semi-Autonomous Adaptive Cruise Control Systems. *IEEE. 51(5), 1186-1192* (2000)
- [8] Widmann, G.R., Daniels, M.K., Hamilton, L., Humm, L., Riley, B., Schiffmann J.K., Schnelker, D.E., Wishshon, W.H.: Comparison of lidar- based and radar-based adaptive cruise control systems. *SAE Technical Paper, no. 2000-01-0345* (2000).

- [9] Ward, D., Bertram, T., Hiller, M.: Vehicle dynamics simulation for the development of an extended adaptive cruise control. *IEEE Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*. 730–735(1999)
- [10] Person, M., Botling, F., Hesslow, E., Johnsson, R.: Stop&Go controller for adaptive cruise control. *Proc. of IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1692–1697. Kohala Coast -Island of Hawaii, Hawaii, USA (1999).
- [11] Yi, K., Hong, J., Kwon, Y.D.: A vehicle control algorithm for Stop-and-Go Cruise control. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D-J. Automob. Eng.* 215(10), 1099–1115 (2001).
- [12] Sommerville, M.; Hatipoglu, C.; Ozguner, U.; , "On the variable structure control of a throttle actuator for speed control applications," *Variable Structure Systems, 1996. VSS '96. Proceedings., 1996 IEEE International Workshop on* , vol., no., pp.187-192, 5-6 Dec 1996.
- [13] Qing Wu; Zhiwei He; Xiumin Chu; Dan Lu; , "An Application of the Adaptive Fuzzy Control in the Longitudinal Control of the Platoon," *Computational Intelligence and Industrial Application, 2008. PACIIA '08. Pacific-Asia Workshop on* , vol.2, no., pp.344-348, 19-20 Dec. 2008
- [14] Lin Cai; Rad, A.B.; Wai-Lok Chan; , "An Intelligent Longitudinal Controller for Application in Semiautonomous Vehicles," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.57, no.4, pp.1487-1497, April 2010
- [15] Pérez, J.; Gajate, A.; Milanés, V.; Onieva, E.; Santos, M.; , "Design and implementation of a neuro-fuzzy system for longitudinal control of autonomous vehicles," *Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.1-6, 18-23 July 2010
- [16] Kodagoda, K.R.S.; Wijesoma, W.S.; Teoh, E.K.; , "Fuzzy speed and steering control of an AGV", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on* , vol.10, no.1, pp.112-120, Jan 2002.
- [17] Wijesoma, W.S.; Kodagoda, K.R.S.; Teoh, E.K.; , "Uncoupled fuzzy controller for longitudinal and lateral control of a golf car-like AGV," *Intelligent Transportation*

- Systems, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on* , vol., no., pp.142-147, 1999
- [18] Avdagic, Z.; Cernica, E.; Konjicija, S.; , "Longitudinal Vehicle Guidance Using Fuzzy Logic," *Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on* , vol., no., pp.893-898, 15-17 Dec. 2006
- [19] Kodagoda, K.R.S.; Wijesoma, W.S.; Teoh, E.K.; , "Stable fuzzy state space controllers for an AGV," *Neural Networks for Signal Processing X, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE Signal Processing Society Workshop* , vol.2, no., pp.672-681 vol.2, 2000
- [20] Hsin-Han Chiang; Li-Shan Ma; Jau-Woei Perng; Bing-Fei Wu; Tsu-Tian Lee; , "Longitudinal and Lateral Fuzzy Control Systems Design for Intelligent Vehicles," *Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC '06. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on* , vol., no., pp.544-549, 2006
- [21] Ching-Chih,T.; Shih-Min, H.; Chien-Tzu, C.; "Fuzzy Longitudinal Controller Design and Experimentation for Adaptive Cruise Control and Stop&Go", *JOURNAL OF INTELLIGENT & ROBOTIC SYSTEMS*,Volume 59, Number 2, 167-189, Enero 2010.
- [22] Naranjo, J.E.; Gonzalez, C.; Garcia, R.; de Pedro, T.; , "ACC+Stop&go maneuvers with throttle and brake fuzzy control," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* , vol.7, no.2, pp. 213- 225, June 2006
- [23] Naranjo, J.E.; Gonzalez, C.; Garcia, R.; de Pedro, T.; , "Cooperative Throttle and Brake Fuzzy Control for ACC+Stop&Go Maneuvers," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.56, no.4, pp.1623-1630, July 2007
- [24] Dickmans, E.D; Zapp A.;, "A curvature-based scheme for improving road vehicle guidance by computer vision", *SPIE ~01.727, mobile robots (1986)*, pp. 161-168.
- [25] Tomizuka, M.; Peng, H.;, "Preview control for vehicle lateral guidance in highway automation", *Journal of ASME*, Dec 1993, vol.] 15, pp. 679-684.
- [26] Lee, A.Y.;, "A preview steering autopilot control algorithm for four-wheel-steering passenger vehicles", *Journal of ASME*, Sept. 1992, ~01.114, pp.401-408.

- [27] Hunt, K.J.; Kalkkuhl, J.; Fritz, H.; Johansen, T.A.; Gottsche, T.; , "Experimental comparison of nonlinear control strategies for vehicle speed control," *Control Applications, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on* , vol.2, no., pp.1006-1010 vol.2, 1-4 Sep 1998.
- [28] Kodagoda, K.R.S.; Wijesoma, W.S.; Teoh, E.K.;; " Robust Un-coupled Fuzzy Controller for Longitudinal and Lateral Control of an AGV ", *Computacional Intelligence, Lectures Notes in Computer Science, Volume 1625*, pp. 370-381, 1999.
- [29] Leith, D.J.; Leithead, W.E.; Vilaplana, M.; , "Robust lateral controller for 4-wheel steer cars with actuator constraints," *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on* , vol., no., pp. 5101- 5106, 12-15 Dec. 2005.
- [30] Min Wan Choi; Jae Heon Ryu; Hyun Seok Lee; Kil Soo Lee; Man Hyung Lee; , "Robust lateral controller design for an unmanned vehicle using a system identification method," *Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on* , vol., no., pp.1177-1182, June 30 2008-July 2 2008.
- [31] Hongming Shen; Wanjun Wang;; "A T-S fuzzy logic design to lateral control of autonomous vehicle," *Mechanic Automation and Control Engineering (MACE), 2010 International Conference on* , vol., no., pp.311-314, 26-28 June 2010.
- [32] El Messoussi, W.; Pages, O.; El Hajjaji, A.; , "Four-Wheel Steering Vehicle Control using Takagi-Sugeno Fuzzy Models," *Fuzzy Systems Conference, 2007. FUZZ-IEEE 2007. IEEE International* , vol., no., pp.1-6, 23-26 July 2007.
- [33] Cai, L.; Rad, A.B.; Wai-Lok Chan; , "A Genetic Fuzzy Controller for Vehicle Automatic Steering Control," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.56, no.2, pp.529-543, March 2007.
- [34] Hodge, N.E.; Trabia, M.B.; , "Steering fuzzy logic controller for an autonomous vehicle," *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on* , vol.3, no., pp.2482-2488 vol.3, 1999.

- [35] Hakima, A.; Ameli, S.; , "Designing a fuzzy logic controller to adjust the angle of tires in four wheel steering vehicles," *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 2010 11th International Conference on* , vol., no., pp.2208-2213, 7-10 Dec. 2010.
- [36] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 86-90.
- [37] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, pp. 6-7.
- [38] Klir,G; Yuan, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995, pp. 11-13.
- [39] Deschrijver, G.; Cornelis, C.; Kerre, E.E.; , "On the representation of intuitionistic fuzzy t-norms and t-conorms," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* , vol.12, no.1, pp. 45- 61, Feb. 2004.
- [40] Godo, L.; Sandri, S.; , "A note on the duality between continuous t-norm and t-conorm operators," *Fuzzy Systems, 2003. FUZZ '03. The 12th IEEE International Conference on* , vol.1, no., pp. 49- 54 vol.1, 25-28 May 2003.
- [41] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 90-95.
- [42] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, pp. 13-15.
- [43] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 95-98.
- [44] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, p. 16
- [45] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 98-100.
- [46] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 108-109.

- [47] Mendel, J.M.; , "Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial," *Proceedings of the IEEE* , vol.83, no.3, pp.345-377, Mar 1995.
- [48] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 108-109.
- [49] Mingsheng Ying; , "Implication operators in fuzzy logic," *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on* , vol.10, no.1, pp.88-91, Feb 2002.
- [50] Wei-Zhi Wu; Peirong Lin; , "Topological Spaces for Fuzzy Rough Sets Determined by Fuzzy Implication Operators," *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2009. FSKD '09. Sixth International Conference on* , vol.6, no., pp.479-483, 14-16 Aug. 2009.
- [51] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 137-139.
- [52] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, pp. 235-243
- [53] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 140-144.
- [54] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, p. 246
- [55] Mann, G.K.I.; Bao-Gang Hu; Gosine, R.G.; , "Analysis of direct action fuzzy PID controller structures," *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on* , vol.29, no.3, pp.371-388, Jun 1999.
- [56] Tanaka, K.; Wang, H.O. *Fuzzy Control System Design and Analysis: a Linear Matrix Inequality*. New York: Wiley, 2001.
- [57] Michels, K.; Klawonn, F.; Kruse, R.; Nürnberger. A. *Fuzzy Control. Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*. New York: Springer-Verlag, 2006, pp. 257-304.
- [58] Nguyen, H. T.; Prasad, N. R.; Walker, C. L.; & Walker, E. A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. New York: Chapman and Hall/CRC, 2003, pp. 120-123.

- [59] Klir,G; Yuan, B. *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic. Theory and Applications*. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1995, pp. 336-338.
- [60] Bohn, C.; Atherton, D.P.; , "An analysis package comparing PID anti-windup strategies," *Control Systems, IEEE* , vol.15, no.2, pp.34-40, Apr 1995
- [61] Mascaró, M.; Cabello, F.; Parra S.I.; Vallejos, P.; Guerrero, P.; Ehrenfeld, A.; Acuña, A.; Ruiz del Solar, J.; Orchard, M., "Instrumentación, Actuación e Implementación de Control Difuso de Bajo Nivel en Vehículo Terrestre Autónomo de Escala Real", *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile* , vol.123, no.2, pp.53-61, Agosto 2011.

Anexos

Anexo A

```
%% Longitudinal Fuzzy Controller
close all;
clc;
%% Fuzzy structure
A=newfis('LOFC'); %In this structure (A) will be saved fuzzy controller parameters

%% Adding variables to fuzzy structure
A=addvar(A, 'input', 'Speed Error', [-1 1]); %This function allows to add a variable as I/O, give
a linguistic name and set the universe of discourse
A=addvar(A, 'input', 'Integral of Speed Error', [-1 1]);
A=addvar(A, 'output', 'Throttle-Brake Opening', [-1.5 1.5]);

%% Defining membership functions

%%% Upper bound (normalization factor) definition %%%

SG=10; % Speed Gain
ISG=30; % Integral of speed Gain
OG=100; % Output Gain

%%% Definition of fuzzy sets limits %%%

%The number of limits defined for each fuzzy set depends of the membership
%function chosen. In this case, trapezoidal shaped membership
%functions were chosen, so four limits are needed. For other membership
%functions see the Help to establish the number of parameters needed.

%%% Speed Error %%%
NL=[-SG -SG -10 -5];
NM=[-10 -5 -5 0];
ZE=[-5 0 0 5];
PM=[0 5 5 10];
PL=[5 10 GS GS];

%%% Integral of Speed Error %%%
NLI=[-ISG -ISG -30 -20];
NMI=[-30 -20 -20 -10];
NSI=[-20 -10 -10 0];
ZEI=[-10 0 0 10];
PSI=[0 10 10 20];
PMI=[10 20 20 30];
PLI=[20 30 ISG ISG];

%%% Output signal (Throttle or Brake) %%%
NLO=[-100 -67 -67 -33];
NMO=[-67 -33 -33 0];
ZEO=[-67 0 0 67];
PMO=[0 33 33 67];
PLO=[33 67 67 100];

%%% Normalizing fuzzy sets and defining linguistic values %%%
Y1=(1/SG)*[NL; NM; ZE; PM; PL]; %Speed error
YN=['NL ' ; 'NM ' ; 'ZE ' ; 'PM ' ; 'PL ' ]; %Speed error linguistic values

Y2=(1/ISG)*[NLI;NMI;NSI;ZEI; PSI;PMI; PLI]; %Integral of speed error (ISE)
YN2=['NL ' ; 'NM ' ; 'NS ' ; 'ZE ' ; 'PS ' ; 'PM ' ; 'PL ' ]; %ISE linguistic values

Y3=(1/OG)*[NLO; NMO; ZEO; PMO; PLO]; %Throttle - brake opening

%For the output of the fuzzy controller is not defined explicitly the linguistic values
%because they are the same that associated to the Speed error.

[N M]=size(Y1);
[N1 M1]=size(Y2);
```

```

%% Associating membership functions and linguistic values to fuzzy sets %%

for i=1:N
A=addmf(A,'input',1,YN(i,:),'trapmf',Y1(i,:)); % This function associates a membership function
and ling. value to a fuzzy set, and associates the fuzzy set to a I/O variable
A=addmf(A,'output',1,YN(i,:),'trapmf',Y3(i,:));
end

for i=1:N1
A=addmf(A,'input',2,YN2(i,:),'trapmf',Y2(i,:));
end

%% Inference
%Implication and aggregation methods for fuzzy sets used, are the default of
%Matlab: min and max respectively. For change these for other fuzzification
%methods use: setfis("fis structure",'impMethod',"method") for change the
%implication method and setfis("fis structure",'aggMethod',"method")for
%change the aggregation method.

%Default fuzzy system type is "Mamdani fuzzy system". For change
%it use: setfis("fis structure",'type',"fuzzy system type")

%% Rules

% For create the rule base, rules are added using matrix of RxN, where R
% are the total rules number and N depends of the inputs and outputs of the
% system. Every row represents a rule. If M is the number of outputs, the first N-(2+M) columns
% correspond to the inputs and the next M columns to the outputs. The N-1
% column is a number between 0 and 1 and represents the weight of the rule.
% N column indicates the operator to combine the antecedents of the rule (1
% for AND operator and 2 for OR operator).

rulematrix=[1 1 1 1 1
1 2 1 1 1
1 3 1 1 1
1 4 1 1 1
1 5 1 1 1
1 6 2 1 1
1 7 3 1 1
2 1 1 1 1
2 2 1 1 1
2 3 2 1 1
2 4 2 1 1
2 5 2 1 1
2 6 3 1 1
2 7 4 1 1
3 1 2 1 1
3 2 2 1 1
3 3 3 1 1
3 4 3 1 1
3 5 3 1 1
3 6 4 1 1
3 7 4 1 1
4 1 2 1 1
4 2 3 1 1
4 3 4 1 1
4 4 4 1 1
4 5 4 1 1
4 6 5 1 1
4 7 5 1 1
5 1 3 1 1
5 2 4 1 1
5 3 5 1 1
5 4 5 1 1
5 5 5 1 1
5 6 5 1 1
5 7 5 1 1];

A=addrule(A,rulematrix); %This function allows to create de rule base.

%% Setting defuzzification method
A=setfis(A,'defuzzmethod','centroid'); %This function allows to set many properties of the
fuzzy system, particularly the defuzzification method

```


`%% Lateral Fuzzy Controller`

```
close all;

%% Fuzzy structure
B=newfis('L AFC'); %In this structure (A) will be saved fuzzy controller parameters

%% Adding variables to fuzzy structure
B=addvar(B,'input','Wheel Angle Error',[-1 1]); %This function allows to add a variable as
I/O, give a linguistic name and set the universe of discourse
B=addvar(B,'input','Variation of Wheel Angle Error',[-1 1]);
B=addvar(B,'output','Variation of Steer Angle',[-1.5 1.5]);

%% Defining membership functions

%%% Upper bound (normalization factor) definition %%%

AG=20; % Angle error Gain
VAG=1.5; % Variation of angle error Gain
SAG=20; % Variation of steering angle Gain

%%% Definition of fuzzy sets limits %%%

%The number of limits defined for each fuzzy set depends of the membership
%function chosen. In this case, trapezoidal shaped membership
%functions were chosen, so four limits are needed. For other membership
%functions see the Help to establish the number of parameters needed.

%%% Angle Error %%%
NL=[-AG -AG -AG -9];
NM=[-AG -9 -9 -3];
NS=[-9 -3 -3 0];
ZE=[-3 0 0 3];
PS=[0 3 3 9];
PM=[3 9 9 AG];
PL=[9 AG AG AG];

%%% Variation of angle error %%%
NLD=[-VAG -VAG -VAG -1];
NMD=[-VAG -1 -1 -0.5];
NSD=[-1 -0.5 -0.5 0];
ZED=[-0.5 0 0 0.5];
PSD=[0 0.5 0.5 1];
PMD=[0.5 1 1 VAG];
PLD=[1 VAG VAG VAG];

%%% Variation Steering angle %%%
NLO=[-SAG -15 -15 -10];
NMO=[-15 -10 -10 -5];
NSO=[-10 -5 -5 0];
ZEO=[-5 0 0 5];
PSO=[0 5 5 10];
PMO=[5 10 10 15];
PLO=[10 15 15 SAG];

%%% Normalizing fuzzy sets and defining linguistic values %%%
Y1A=(1/AG)*[NL; NM; NS; ZE; PS; PM; PL]; %Wheels angle error
Y2A=(1/VAG)*[NLD; NMD; NSD; ZED; PSD; PMD; PLD]; %Variation of wheels angle error
Y3A=(1/SAG)*[NLO; NMO; NSO; ZEO; PSO; PMO; PLO]; %Variation of steering angle

YN=['NL ' ; 'NM ' ; 'NS ' ; 'ZE ' ; 'PS ' ; 'PM ' ; 'PL ']; %Linguistic values for angle error,
variation of angle error and variation of steering angle

[N M]=size(Y1A);

%%% Associating membership functions and linguistic values to fuzzy sets %%
for i=1:N
B=addmf(B,'input',1,YN(i,:), 'trapmf',Y1A(i,:)); % This function associates a membership function
and ling. value to a fuzzy set, and associates the fuzzy set to a I/O variable
B=addmf(B,'input',2,YN(i,:), 'trapmf',Y2A(i,:));
B=addmf(B,'output',1,YN(i,:), 'trapmf',Y3A(i,:));
end
```

```

%% Inference
%Implication and aggregation methods for fuzzy sets used, are the default of
%Matlab: min and max respectively. For change these for other fuzzification
%methods use: setfis("fis structure",'impMethod',"method") for change the
%implication method and setfis("fis structure",'aggMethod',"method")for
%change the aggregation method.

%Default fuzzy system type is "Mamdani fuzzy system". For change
%it use: setfis("fis structure",'type',"fuzzy system type")

%% Rules

% For create the rule base, rules are added using matrix of RxN, where R
% are the total rules number and N depends of the inputs and outputs of the
% system. Every row represents a rule. If M is the number of outputs, the first N-(2+M) columns
% correspond to the inputs and the next M columns to the outputs. The N-1
% column is a number between 0 and 1 and represents the weight of the rule.
% N column indicates the operator to combine the antecedents of the rule (1
% for AND operator and 2 for OR operator).

rulematrix=[1 1 1 1 1
            1 2 1 1 1
            1 3 1 1 1
            1 4 1 1 1
            1 5 2 1 1
            1 6 3 1 1
            1 7 4 1 1
            2 1 1 1 1
            2 2 1 1 1
            2 3 1 1 1
            2 4 2 1 1
            2 5 3 1 1
            2 6 4 1 1
            2 7 5 1 1
            3 1 1 1 1
            3 2 1 1 1
            3 3 2 1 1
            3 4 3 1 1
            3 5 4 1 1
            3 6 5 1 1
            3 7 6 1 1
            4 1 1 1 1
            4 2 2 1 1
            4 3 3 1 1
            4 4 4 1 1
            4 5 5 1 1
            4 6 6 1 1
            4 7 7 1 1
            5 1 2 1 1
            5 2 3 1 1
            5 3 4 1 1
            5 4 5 1 1
            5 5 6 1 1
            5 6 7 1 1
            5 7 7 1 1
            6 1 4 1 1
            6 2 4 1 1
            6 3 5 1 1
            6 4 6 1 1
            6 5 7 1 1
            6 6 7 1 1
            6 7 7 1 1
            7 1 4 1 1
            7 2 5 1 1
            7 3 6 1 1
            7 4 7 1 1
            7 5 7 1 1
            7 6 7 1 1
            7 7 7 1 1];
B=addrule(B,rulematrix); %This function allows to create de rule base.

%% Setting defuzzification method
B=setfis(b,'defuzzmethod','centroid');

```

Anexo B

```
* Real-Time Workshop code generated for Simulink model Fuzzy_controller_WPP_26052011.
*
* Model version                : 1.10
* Real-Time Workshop file version : 7.5 (R2010a) 25-Jan-2010
* Real-Time Workshop file generated on : Mon Jun 13 16:11:01 2011
* TLC version                  : 7.5 (Jan 19 2010)
* C/C++ source code generated on   : Mon Jun 13 16:11:01 2011
*
* Target selection: ert.tlc
* Embedded hardware selection: 32-bit Generic
* Code generation objectives: Unspecified
* Validation result: Not run
*/

#include "fuzzy_protocol.h"
/*
* Associating rt_OneStep with a real-time clock or interrupt service routine
* is what makes the generated code "real-time". The function rt_OneStep is
* always associated with the base rate of the model. Subrates are managed
* by the base rate from inside the generated code. Enabling/disabling
* interrupts and floating point context switches are target specific. This
* example code indicates where these should take place relative to executing
* the generated code step function. Overrun behavior should be tailored to
* your application needs. This example simply sets an error status in the
* real-time model and returns from rt_OneStep.
*/
void rt_OneStep()
{
    static boolean_T OverrunFlag = 0;

    /* Disable interrupts here */
    ualarm(0,0);
    /* Check for overrun */
    if (OverrunFlag) {
        rtmSetErrorStatus(Fuzzy_controller_WPP_2605201_M, "Overrun");
        return;
    }

    OverrunFlag = TRUE;

    datasend[0]=datasend[1]=datasend[2]=0;
    flag=0;

    /* Save FPU context here (if necessary) */
    /* Re-enable timer or interrupt here */
    /* Set model inputs here */

    fds[0].fd=0;
    fds[0].events=POLLIN;
    write(1,&flag,sizeof(char));
    if((status=poll(fds,2,timeout))>0){
        read(0,data,5*sizeof(float));
    }
    else{
        if(status==0){
            fprintf(stderr,"Timeout. Fuzzy Controller Program will be terminated\n");
            flag=1;
            write(1,&flag,sizeof(char)); /*If no data are received a error signal is sent*/
            err=1;
            return;
        }
        else{
            fprintf(stderr,"An error has ocurred. Program will be terminated\n");
            err=1;
            return;
        }
    }
}
Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.ve=data[0];          /*speed error*/
Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.vei=data[1];        /*integral of speed error*/
Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.ae=data[2];         /*angle error*/
```

```

Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.dae=data[3];      /*angle error difference*/

/* Step the model */
Fuzzy_controller_WPP_26052011_step();

/* Get model outputs here */
datasend[0]=Fuzzy_controller_WPP_26052011_Y.Acc;
datasend[1]=Fuzzy_controller_WPP_26052011_Y.Brk;
datasend[2]=Fuzzy_controller_WPP_26052011_Y.Steer+data[4]; /*Delta angle + actual angle value*/

write(fdin,datasend,3*sizeof(float)); /*Send outputs to WRITE module*/

/* Indicate task complete */
OverrunFlag = FALSE;

/* Disable interrupts here */
/* Restore FPU context here (if necessary) */
/* Enable interrupts here */
}

/*
 * The example "main" function illustrates what is required by your
 * application code to initialize, execute, and terminate the generated code.
 * Attaching rt_OneStep to a real-time clock is target specific. This example
 * illustrates how you do this relative to initializing the model.
 */
int_T main(int_T argc, const char_T *argv[]);
int_T main(int_T argc, const char_T *argv[])
{
    /* Initialize model */
    Fuzzy_controller_WPP_26052011_initialize();

    /* Structure for interruption*/
    struct sigaction sig,osig;

    /*Fuzzy inputs initialization*/
    Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.ve=0;
    Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.vei=0;
    Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.ae=0;
    Fuzzy_controller_WPP_26052011_U.dae=0;

    /*Writing pipe definition*/
    fdin=atoi(argv[2]);

    /*Buffers initialization*/
    datasend=(float *)malloc(3*sizeof(float));
    data=(float *)malloc(5*sizeof(float));

    timeout=atoi(argv[1]);          /*Limit time to stop execution*/
    err=0;                            /*Error flag initialization*/

    /*Handler initialization*/
    sig.sa_handler=rt_OneStep;
    sig.sa_flags=SA_NODEFER;
    sigaction(SIGALRM,&sig,&osig);

    /* Attach rt_OneStep to a timer or interrupt service routine with
     * period 0.001 seconds (the model's base sample time) here. The
     * call syntax for rt_OneStep is
     *
     *   rt_OneStep();
     */
    while(1)
    {
        if(err==1) /* if Error flag is set: abort*/
        {
            exit(-1);
        }
        ualarm(1000,0); /*1 ms interrupt. This value can be changed according to the base sample time
        selected in Matlab*/
        pause();
    }
    printf("Warning: The simulation will run forever. "
    "Generated ERT main won't simulate model step behavior. "

```

```

    "To change this behavior select the 'MAT-file logging' option.\n");
    fflush((NULL));
    while (rtmGetErrorStatus(Fuzzy_controller_WPP_2605201_M) == (NULL)) {
        /* Perform other application tasks here */
    }

    /* Disable rt_OneStep() here */

    /* Terminate model */
    Fuzzy_controller_WPP_2605201_terminate();
    return(0);
}

/*
 * File trailer for Real-Time Workshop generated code.
 *
 * [EOF]
 */

```

Anexo C

```

#include "receive_data_main_protocol.h"

/*Last update 06/07/2011*/

/* Main program requires 4 parameters:
 * argv[1]: Serial port 1
 * argv[2]: Serial port 2
 * argv[3]: Output pipe FD to writing module
 * argv[4]: Output pipe FD to alive module*/

/***** Start of main program *****/

int main(int argc, char *argv[])
{
    /**** Variables Initialization *****/

    /*Opening serial ports*/
    tty_fd1=atoi(argv[1]);
    tty_fd2=atoi(argv[2]);

    /*Defining writing pipes*/

    fdin=atoi(argv[3]);      /* To writing module */
    aliveout=atoi(argv[4]);  /* To alive module */

    /*Global variables*/

    datarcv=(unsigned char *)malloc(254*sizeof(unsigned char));
    datarcv2=(unsigned char *)malloc(254*sizeof(unsigned char));

    message.data=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));
    lastmessage.data=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));

    message2.data=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));
    lastmessage2.data=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));

    buffer=(float *)malloc(4*sizeof(float));
    bufferr=(float *)malloc(5*sizeof(float));

    adaver=(float *)malloc(sizeof(float));
    intsperr=(float *)malloc(sizeof(float));

    diffcounter=(int *)malloc(sizeof(int));

    timeint=(struct timeval *)malloc(sizeof(struct timeval));
    timedif=(struct timeval *)malloc(sizeof(struct timeval));
    starttime=(struct timeval *)malloc(sizeof(struct timeval));

    buffer[0]= buffer[1]= buffer[2]= buffer[3]=0;

```

```

bufferr[0]= bufferr[1]= bufferr[2]= bufferr[3]=bufferr[4]=0; /*Bufferr[4] stores actual real
angle value*/

*adaver=0;
*intsperr=0;
*diffcounter=0;

mflag=mflag2=0;
drcvflag=drcvflag2=0;
sendsta=sendsta2=0;

hcounter=hcounter2=0;
pcounter=pcounter2=0;
datacounter=datacounter2=1;
totdata=totdata2=0;

checksum=checksum2=0;
ping_alive=ping_alive2=0;

counterdata1=counterdata2=counterfail=0;

device=DEV;

alivelflag=1;

/*Starting timer*/
gettimeofday(&start,NULL);
*starttime=*timedif=*timeint=start;

/**** Receiving data process *****/

for(;;){

    FD_ZERO(&rfd);
    FD_SET(tty_fd1,&rfd);
    FD_SET(tty_fd2,&rfd);
    FD_SET(0,&rfd);

    if((sel_ok=select(max(tty_fd1,tty_fd2)+1,&rfd,NULL,NULL,NULL))<0){
        fprintf(stderr,"Error en select\n");
        break;
    }
    if(FD_ISSET(tty_fd1,&rfd)){
        /*Check is data to read in serial port 1.
Receives real speed value and real angle value*/
        read(tty_fd1,&data,sizeof(unsigned char));
        if(mflag==0) /*If is data available... read it!*/
            /*if header hasn't been received looks for it
else starts to read the message*/
            {
                drcvflag=0;
                if(data==255)
                    ++hcounter;
                else
                    hcounter=0;
                if(hcounter==2) /*Two headers have to being received
to mean that a new message is arriving*/
                    mflag=1;
            }
        else
            {
                ++pcounter;
                switch(pcounter)
                {
                    case 1:
                        message.id=data;
                        if(message.id!=DEV && message.id!=254) /*Only accept messages addressed to it or to
everyone*/
                            {
                                mflag=0;
                                hcounter=0;
                                pcounter=0;
                            }
                        break;
                    case 2:

```

```

    message.len=data;
    totdata=message.len-1;
    break;

case 3:
    message.cmd=data;
    break;

case 4:
    message.par=data;
    datarcv[0]=message.par;
    break;
default:
    if(pcounter==(4+totdata))          /*Last part of message is checksum*/
    {
        message.checksum=data;
        checksum=do_checksum(message.id,message.len,message.cmd,datarcv); /*Calculate
checksum. Last seven bit of the sum of data,command,id and length*/
        if(checksum==message.checksum)                                     /*If checksum is
correct,data received flag is raised and actions are taken*/
            drcvflag=1;
        else                                                               /*If checksum isn't
correct, the message is discarded*/
        {
            drcvflag=0;
            fprintf(stderr,"Checksum error.Message discarded\n");
        }
        if(drcvflag==1)
        {
            lastmessage=message;
            switch(lastmessage.cmd) /*Commands sets which action is carried out*/
            {
                case WR:          /*Write register implies storing and preprocessing data
received*/
                    ++counterdata;
                    if(lastmessage.par==SPVAL)
                    {
buffer[(int)lastmessage.par]=(float)(compose_int(lastmessage.data,lastmessage.len-2,7,0)/SCALE);
/*Compose data*/
                        bufferr[SPERR]=buffer[SPVAL]-buffer[SPREF];
/*Speed error*/
                        bufferr[SPIERR]=int_error(bufferr[SPERR],GAIN,BOUND,SYS,intsperr,timeint);
/*Integral of speed error*/
                    }
                    else          /*If isn't a speed value it'll be a angle value. Must be
modified if there're other references*/
                    {
buffer[(int)lastmessage.par]=(float)(compose_int(lastmessage.data,lastmessage.len-2,7,0)/SCALE);
/*Compose data*/

bufferr[ANDERR]=(gettime(*starttime,*timedif,'s'))*diff_err_ave((buffer[ANVAL]-buffer[ANREF])-
bufferr[ANERR],timedif,starttime,adaver,diffcounter);
                        bufferr[ANERR]=buffer[ANVAL]-buffer[ANREF];
/* Angle error*/
                        bufferr[4]=buffer[ANVAL];
/*Actual angle value*/
                    }
                    break;

                case RR:
/*Read register sends a signal to write program with the requested parameter*/
                        write(fdin,&lastmessage.par,sizeof(char));
                        break;

                case PG:
/*When the ping command is received a alive flag is sent*/
                        aliveflag=2;
                        write(aliveout,&aliveflag,sizeof(char));
                        aliveflag=1;
                        break;
            }
        }
    }
}

```

```

    }

    /*If a message is received correctly, restore counters to default values*/
    hcounter=0;
    pcounter=0;
    datacounter=1;
    mflag=0;
    drcvflag=0;
}
else
{
    message.data[datacounter-1]=datarcv[datacounter]=data; /*Collecting data pieces*/
    ++datacounter;
}
}
}

if(FD_ISSET(tty_fd2,&rfd2)){ /*Check is data to read in serial port 2. Receives reference
speed value and reference angle value*/
    read(tty_fd2,&data2,sizeof(unsigned char));
/*If is data available... read it!*/

    if(mflag2==0) /*
*if header hasn't been received looks for it else starts to read the message*/
    {
        drcvflag2=0;
        if(data2==255)
            ++hcounter2;
        else
            hcounter2=0;
        if(hcounter2==2)
/*Two headers have to being received to a new message is incoming*/
            mflag2=1;
    }
else
{
    ++pcounter2;
    switch(pcounter2){
        case 1:
            message2.id=data2;
            if(message.id!=DEV && message.id!=254)
            {
                mflag2=0;
                hcounter2=0;
                pcounter2=0;
            }
            break;
        case 2:
            message2.len=data2;
            totdata2=message2.len-1;
            break;

        case 3:
            message2.cmd=data2;
            break;

        case 4:
            message2.par=data2;
            datarcv2[0]=message2.par;
            break;
        default:
            if(pcounter2==(4+totdata2)) /*Last part of message is checksum*/
            {
                message2.checksum=data2;
                checksum2=do_checksum(message2.id,message2.len,message2.cmd,datarcv2); /*Calculate
checksum. Last seven bit of the sum of data,command,id and length*/
                if(checksum2==message2.checksum)
/*If checksum is correct,data received flag is raised and actions are taken*/
                    drcvflag2=1;
                else
/*If checksum isn't correct, the message is discarded*/
            {

```



```

        drcvflag2=0;
        fprintf(stderr,"Checksum error.Message discarded\n");
    }
    if(drcvflag2==1)
    {
        lastmessage2=message2;

        switch(lastmessage2.cmd) /*Commands sets which action is carried out*/
        {
            case WR:                /*Write register implies storing and preprocessing data
received*/
                ++counterdata2;
                if(lastmessage2.par==SPREF)
                {
                    buffer[(int)lastmessage2.par]=(float)(compose_int(lastmessage2.data,lastmessage2.len-
2,7,0)/SCALE);
                    bufferr[SPERR]=buffer[SPVAL]-buffer[SPREF];
                    bufferr[SPIERR]=int_error(bufferr[SPERR],GAIN,BOUND,SYS,intsperr,timeint);
                }
                else /*If isn't a speed reference it'll be a angle reference. Must be
modified if there're other references*/
                {
                    buffer[(int)lastmessage2.par]=(float)(compose_int(lastmessage2.data,lastmessage2.len-
2,7,0)/SCALE);

                    bufferr[ANDERR]=(gettime(*starttime,*timedif,'s')*diff_err_ave((buffer[ANVAL]-buffer[ANREF])-
bufferr[ANERR],
                    timedif,starttime,adaver,diffcounter);
                    bufferr[ANERR]=buffer[ANVAL]-buffer[ANREF];
                }
            }
        }
        /*If a message is received correctly, restore counters to default values*/
        hcounter2=0;
        pcounter2=0;
        datacounter2=1;
        mflag2=0;
        drcvflag2=0;
    }
    else
    {
        message2.data[datacounter2-1]=datarcv2[datacounter2]=data2; /*Collecting data
pieces*/
        ++datacounter2;
    }
    break;
}
}
}
if(FD_ISSET(0,&rfds)){                /*Internal comm with fuzzy controller*/

    read(0,&datasnd,sizeof(char));

    if(counterdata1==0 || counterdata2==0) /*If no data is received*/
    {
        ++counterfail;
        if(counterfail==50) /*After 50 failures to read data, report the transmitter is dead*/
            aliveflag=0;
    }
    else
    {
        counterfail=0;
        counterdata1=0;
        counterdata2=0;
    }
    write(aliveout,&aliveflag,sizeof(char)); /*Report alive or dead status*/

    if(datasnd==0 && aliveflag==1)      /*If flag is received and devices are alive, then
send data to fuzzy controller*/
    {

```

```

        /*Update controller input data*/
        bufferr[SPERR]=buffer[SPVAL]-buffer[SPREF];
        bufferr[ANERR]=buffer[ANVAL]-buffer[ANREF];
        bufferr[SPIERR]=int_error(bufferr[SPERR],GAIN,BOUND,SYS,intsperr,timeint);
        bufferr[ANDERR]=(gettime(*starttime,*timedif,'s')*diff_err_ave((buffer[ANVAL]-
buffer[ANREF])-bufferr[ANERR],timedif,starttime,adaver,diffcounter);
        bufferr[4]=buffer[ANVAL];

        *adaver>(*adaver)/(*diffcounter);
        *diffcounter=1;

        write(1,bufferr,5*sizeof(float));
    }
    else
    {
        fprintf(stderr,"No data received. Program will be terminated\n");
        break;
    }
}
}

close(tty_fd1);
close(tty_fd2);
return(0);
}

/**** End of main program ****/

int compose_int(unsigned char *data,int bytes_len,int bits,int flag) /*Extract the integer stored
in messages*/
{
    int res;
    res=0;
    while(bytes_len>flag) /*flag parameter indicates if the first byte must be
counted*/
    {
        res+=data[bytes_len-1]<<(bits*(bytes_len-(flag+1)));
        --bytes_len;
    }
    return(res);
}

int do_checksum(unsigned char id,unsigned char len,unsigned char cmd,unsigned char *data)
/*Calculates checksum*/
{
    int i,res;
    res=0;
    for(i=0;i<len-1;++i)
        res+=data[i];
    res+=id+len+cmd;
    return(res&127);
}

```

Anexo D

```
#include "send_data_main_protocol.h"

/*Updated 24/06/2011 20:00*/
/* Main program must be called with 4 parameters:
 * argv[1]: Serial port 1
 * argv[2]: FD from reading module
 * argv[3]: FD from fuzzy controller
 * argv[4]: FD from alive module
 * */

int main(int argc, char *argv[])
{
    /**** Global Variables initialization ***/
    tty_fd=atoi(argv[1]);
    fdin1=atoi(argv[2]);
    fdin2=atoi(argv[3]);
    alivein=atoi(argv[4]);

    message.data=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));

    datasnd=(float *)malloc(3*sizeof(float));
    ping=100*ALIVE;

    acc=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));
    brake=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));
    steer=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));
    alivedata=(unsigned char *)malloc(253*sizeof(unsigned char));

    device=1;
    datasnd[0]=datasnd[1]=datasnd[2]=0;

    aliveflag=1;
    rdreq=1;

    /**** Reading pipes and writing processes ***/

    for(;;)
    {
        FD_ZERO(&rfd);
        FD_SET(fdin1,&rfd);
        FD_SET(fdin2,&rfd);
        FD_SET(alivein,&rfd);

        if((sel_ok=select(max(max(fdin1,fdin2),alivein)+1,&rfd,NULL,NULL,NULL))<0){
            fprintf(stderr,"Select Error WRITE\n");
            break;
        }
        if(FD_ISSET(fdin1,&rfd)) /*From reading program*/
        {
            read(fdin1,&rdreq,sizeof(char));

            switch(rdreq)
            {
                case THR:
                    acc[0]=THR;

sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(acc,datasnd[0],7,1,1),WR,acc,DELAY);
                    break;
                case BRK:
                    brake[0]=BRK;

sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(brake,datasnd[1],7,1,1),WR,brake,DELAY);
                    break;
                case STR:
                    steer[0]=STR;

sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(steer,datasnd[2],7,1,1),WR,steer,DELAY);
                    break;
            }
        }
        if(FD_ISSET(fdin2,&rfd)) /*From controller*/
```

```

    {
        read(fdin2,datasnd,3*sizeof(float)); /*Read data from controller*/

        acc[0]=THR; /*Initialize parameters values*/
        brake[0]=BRK;
        steer[0]=STR;

        sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(acc,datasnd[0],7,1,1),WR,acc,DELAY);
        /*Send split data*/

sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(brake,datasnd[1],7,1,1),WR,brake,DELAY);
sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(steer,datasnd[2],7,1,1),WR,steer,DELAY);

    }

    if(FD_ISSET(alivein,&rfd)) /*From alive*/
    {
        rdsta=read(alivein,&aliveflag,sizeof(char)); /*Read data from alive*/
        if(aliveflag==1 && rdsta>0)
        {
            sendsta=send_message(tty_fd,HEADER,device,1+divide_int(alivedata,ping,7,1,0),AP,alivedata,
DELAY);
        }
        else
        {
            fprintf(stderr,"Alive is dead\n");
            break;
        }
    }

}
/***** End of writing process *****/

close(tty_fd); /*Close serial port*/
return(0);
}

int send_message(int port_fd,unsigned char header,unsigned char id, unsigned char len,unsigned
char cmd, unsigned char *data,int delay)
{
    /* port_fd: Serial Port File Descriptor
    * header: Message header
    * id: Device id
    * len: Message length(sum of bytes from command and data)
    * cmd: Command
    * data: Data to send. First byte indicates what parameter it's modified
    * delay: Delay among each part of message*/

    int i,chksum;

    write(port_fd,&header,sizeof(header));
    usleep(delay);
    write(port_fd,&header,sizeof(header));
    usleep(delay);
    write(port_fd,&id,sizeof(id));
    usleep(delay);
    write(port_fd,&len,sizeof(len));
    usleep(delay);
    write(port_fd,&cmd,sizeof(cmd));
    usleep(delay);
    for(i=0;i<len-1;++i)
    {
        write(port_fd,&data[i],sizeof(data[i]));
        usleep(delay);
    }
    chksum=do_checksum(id,len,cmd,data);
    write(port_fd,&chksum,sizeof(unsigned char));

    return(0);
}

int divide_int(unsigned char *bytes,float data,int bits,int orig_bytes,int flag)
{

```

```

int ftoi;
int i;
int num_bytes;
ftoi=(int)(data*SCALE);
num_bytes=((8*orig_bytes%bits)==0) ? (8*orig_bytes/bits):(8*orig_bytes/bits +1);
for(i=flag;i<(num_bytes+flag);++i)
    bytes[i]=(ftoi>>(bits*(i-flag)))&((1<<(bits))-1);

return(num_bytes);
}

int compose_int(unsigned char *data,int bytes_len,int bits,int flag)
{
int res;
res=0;
while(bytes_len>flag)
{
res+=data[bytes_len-1]<<(bits*(bytes_len-(flag+1)));
--bytes_len;
}

return(res);
}

int do_checksum(unsigned char id,unsigned char len,unsigned char cmd,unsigned char *data)
{
int i,res;
res=0;
for(i=0;i<len-1;++i)
res+=data[i];
res+=id+len+cmd;

return(res&127);
}

```

Anexo E

```

#include "alive.h"

int main(int argc,char *argv[])
{

fdin=atoi(argv[1]);          /*Reading pipe input*/
fdout=atoi(argv[2]);        /*Writing pipe output*/

/* Signal handler initialization*/
sig.sa_handler=handler;
sig.sa_flags=SA_NODEFER;
sigaction(SIGALRM,&sig,&osig);

/*Variables initialization*/
alivestatus=1;
aliveflag=1;

/*Starting the timer*/
ualarm((int)(100*ALIVE*1000*K),0);

for(;;)
{
read(fdin,&aliveflag,sizeof(char));
if(aliveflag==0)
{
ualarm(0,0);
alivestatus=0;
write(fdout,&alivestatus,sizeof(char));
break;
}
if(aliveflag==2)
alive signal*/
{
ualarm(0,0);
ualarm((int)(100*ALIVE*1000*K),0);
alivestatus=1;
}
}
}

```

```

        write(fdout,&alivestatus,sizeof(char));
        alivestatus=0;
    }
}
return(0);
}

void handler()
{
    if(aliveflag!=0)
    {
        alivestatus=1;
        ualarm((int)(100*ALIVE*1000*K),0);
    }

    write(fdout,&alivestatus,sizeof(char));
    alivestatus=0;
}

```

Anexo F

```

#include "fuzzy_main_protocol.h"

/* Main program must be called with 3 parameters:
 * argv[1]: Serial port 1
 * argv[2]: Serial port 2
 * argv[3]: Fuzzy controller timeout in milliseconds
 */

int main (int argc,char*argv[])
{
    if(argc<4)
    {
        fprintf(stderr,"USE: FUZZYCONTROLLER [SERIAL PORT 1] [SERIAL PORT 2] [FC TIMEOUT (ms)]\n");
        exit(-1);
    }
    /***** Variables initialization *****/

    /* Serial ports configuration settings*/
    tio.c_iflag=0;
    tio.c_oflag=0;
    tio.c_cflag=CS8|CREAD|CLOCAL;
    tio.c_lflag=0;
    tio.c_cc[VMIN]=sizeof(char);
    tio.c_cc[VTIME]=0;

    tio2.c_iflag=0;
    tio2.c_oflag=0;
    tio2.c_cflag=CS8|CREAD|CLOCAL;
    tio2.c_lflag=0;
    tio2.c_cc[VMIN]=sizeof(char);
    tio2.c_cc[VTIME]=0;

    /*Opening serial ports*/
    tty_fd1=open(argv[1], O_RDWR|O_NOCTTY); /*Options are read and write file descriptor (O_RDWR)
and not controlling terminal (O_NOCTTY)*/
    tty_fd2=open(argv[2], O_RDWR|O_NOCTTY);

    /*Setting serial ports baudrate*/
    cfsetospeed(&tio,B115200);
    cfsetispeed(&tio,B115200);
    cfsetospeed(&tio2,B115200);
    cfsetispeed(&tio2,B115200);

    /*Cleaning lines*/
    tcsetattr(tty_fd1,TCSANOW,&tio);
    tcflush(tty_fd1,TCIOFLUSH);
    tcsetattr(tty_fd2,TCSANOW,&tio2);
    tcflush(tty_fd2,TCIOFLUSH);

    /*Storing Serial Ports FDs as parameters*/

```

```

for(i=0;i<2;++i)
    tty_fd[i]=(char *)malloc(256*sizeof(char));

sprintf(tty_fd[0],"%d",tty_fd1);
sprintf(tty_fd[1],"%d",tty_fd2);

/* Making READ-CONTROLLER pipes*/
for(i=0;i<2;++i){
    if(pipe(fds[i])<0){
        fprintf(stderr,"Pipe Error. Program will exit\n");
        exit(-1);
    }
}

/* Making READ - WRITE pipe*/
if(pipe(fdrw)<0){
    fprintf(stderr,"Pipe Error. Program will exit\n");
    exit(-1);
}

/* Making CONTROLLER - WRITE pipe */
if(pipe(fdcw)<0){
    fprintf(stderr,"Pipe Error. Program will exit\n");
    exit(-1);
}

/* Making READ - ALIVE pipe*/
if(pipe(fdra)<0){
    fprintf(stderr,"Pipe Error. Program will exit\n");
    exit(-1);
}

/* Making ALIVE - WRITE pipe */
if(pipe(fdaw)<0){
    fprintf(stderr,"Pipe Error. Program will exit\n");
    exit(-1);
}

/* Pipe I/O FD as parameters initialization */
for(i=0;i<2;++i)
{
    cw[i]=(char *)malloc(256*sizeof(char));
    rw[i]=(char *)malloc(256*sizeof(char));
    aw[i]=(char *)malloc(256*sizeof(char));
    ra[i]=(char *)malloc(256*sizeof(char));
}

/***** End of variables initialization *****/

/***** Creation and execution of Child Processes *****/

/*Processes creation*/
for(i=0;i<4;++i){
    if((pids[i]=fork())<0){
        fprintf(stderr,"Process Creation Error. Program will exit\n");
        exit(-1);
    }

    /*** Serial Receiver Process ***/

    if (pids[i]==0 && i==0){

        /*Pipes output FD as paramenters*/
        sprintf(rw[1],"%d",fdrw[1]);
        sprintf(ra[1],"%d",fdra[1]);

        /*close unused pipes*/
        for(j=0;j<2;++j)
        {
            close(fdcw[j]);
            close(fdaw[j]);
        }
        close(fdrw[0]);
        close(fdra[0]);
    }
}

```

```

/* pipe read-write*/
close(fds[0][0]);
close(1);
dup(fds[0][1]);
close(fds[0][1]);
/*pipe write-read*/
close(fds[1][1]);
close(0);
dup(fds[1][0]);
close(fds[1][0]);

execl("./datarcv","datarcv",tty_fd[0],tty_fd[1],rw[1],ra[1],NULL);

fprintf(stderr,"Serial Receiver Error\n");
exit(-1);
}

/* Fuzzy Controller Process */
if(pids[i]==0 && i==1){

    sprintf(cw[1],"%d",fdcw[1]);

    /*close unused pipes*/
    for(j=0;j<2;++j)
    {
        close(fdra[j]);
        close(fdaw[j]);
        close(fdrw[j]);
    }
    close(fdcw[0]);
    close(tty_fd1);
    close(tty_fd2);

    /*pipe write-read*/
    close(fds[0][1]);
    close(0);
    dup(fds[0][0]);
    close(fds[0][0]);

    /*pipe read-write*/
    close(fds[1][0]);
    close(1);
    dup(fds[1][1]);
    close(fds[1][1]);

    execl("./fuzzy","fuzzy",argv[3],cw[1],NULL);

    fprintf(stderr,"Fuzzy Controller Error\n");
    exit(-1);
}

/** Serial transmitter process ***/

if(pids[i]==0 && i==2)
{
    /*Pipes input FD as paramenters*/
    sprintf(rw[0],"%d",fdrw[0]);
    sprintf(cw[0],"%d",fdcw[0]);
    sprintf(aw[0],"%d",fdaw[0]);

    /*close unused process*/
    for(j=0;j<2;++j)
    {
        close(fdra[j]);
        close(fds[j][j]);
    }
    close(fds[0][1]);
    close(fds[1][0]);
    close(fdaw[1]);
    close(fdrw[1]);
    close(fdcw[1]);
    close(tty_fd2);
}

```



```

    execl("./datasnd", "datasnd", tty_fd[0], rw[0], cw[0], aw[0], NULL);

    fprintf(stderr, "Serial Transmitter Error\n");
    exit(-1);
}

/** Alive check process */
if(pids[i]==0 && i==3)
{
    /*Pipes FD as parameters*/
    sprintf(aw[1], "%d", fdaw[1]);
    sprintf(ra[0], "%d", fdra[0]);

    /*close unused pipes*/
    for(j=0; j<2; ++j)
    {
        close(fdcw[j]);
        close(fdrw[j]);
        close(fds[j][j]);
    }
    close(fds[0][1]);
    close(fds[1][0]);
    close(fdaw[0]);
    close(fdra[1]);
    close(tty_fd1);
    close(tty_fd2);

    execl("./alive", "alive", ra[0], aw[1], NULL);

    fprintf(stderr, "Alive Error\n");
    exit(-1);
}

}

/** End of Child processes Creation */

/*Close all open pipes*/
for(j=0; j<2; ++j)
{
    close(fdrw[j]);
    close(fdcw[j]);
    close(fdaw[j]);
    close(fdra[j]);
    close(fds[j][j]);
}
close(fds[0][1]);
close(fds[1][0]);
close(tty_fd1);
close(tty_fd2);

/*Wait for all Child processes end*/
while((pid=wait(&status))!=-1)
{
    if(WIFEXITED(status))
    {
        for(j=0; j<4; ++j)
        {
            if(pid==pids[j])
                fprintf(stderr, "Process %d finish normally\n", j);
        }
    }
    else
    {
        for(j=0; j<4; ++j)
        {
            if(pid==pids[j])
                fprintf(stderr, "Process %d finish abnormally\n", j);
        }
    }
}
return(0);
}

```