

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSTGRADO



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

**DISEÑO DE UN CONTROLADOR NEURODIFUSO
PARA LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE UN CAMIÓN
MINERO DE DOS CUERPOS**

TESIS PRESENTADA PARA OPTAR EL GRADO DE MAGÍSTER
EN INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Autor:

Ing. Richard Jesús Navarro Villena

Asesor:

Dr. Antonio Morán Cárdenas

Jurado:

Dr. Javier Sotomayor Moriano
Dr. Roberto Tantaleán Carrasco

JUNIO 2013

LIMA - PERÚ RESUMEN

La elevada producción de minerales que está generando actualmente la minera Gabriela Mistral al sur de Chile, se debe a la eficiencia en su transporte de material por medio de camiones mineros Komatsu con desplazamiento autónomo, permitiendo interactuar con las distintas áreas de la mina por medio de un sistema GPS y sensores de ultrasonido ubicados alrededor del camión, para evitar obstáculos y vehículos alrededor de la mina. Por este motivo es que se busca en la presente tesis, el diseño de un controlador para la conducción autónoma de un camión articulado o de dos cuerpos, donde el sistema de control es más complejo debido al tipo de sistema a controlar y por la mayor cantidad de material a transportar.

Por este motivo se obtiene y se presenta el modelo del camión minero articulado, el cual es utilizado para diseñar un controlador difuso y un controlador neurodifuso, permitiendo comparar ambos resultados mediante la simulación de la velocidad y dirección que otorga el camión articulado en las áreas más comunes de la minera Cerro Verde.

La maniobrabilidad del sistema es obtenida a través de una base de reglas adquirida de los operadores de camiones Caterpillar 740, la cual es afinada posteriormente para conseguir un comportamiento deseado del camión a través de la variación de la velocidad ante eventos reales presentados en ruta, como es la evasión de obstáculos. La simulación se realiza en el software Matlab, y el área de los lugares que interactúa el camión articulado se obtiene a través de fotografías satelitales.

La comparación de los resultados obtenidos por medio de las simulaciones gráficas y numéricas, nos permitirán indicar que el controlador neurodifuso es el adecuado para la conducción autónoma del camión minero articulado. Por este motivo es que se presenta de manera adicional, algunos alcances de la aplicación del controlador neurodifuso diseñado en el camión articulado Caterpillar 740.

DEDICATORIA

La bendición frecuente de Dios, la confianza y apoyo depositado por mis padres: Julio, Gladis, y mi hermano: Larry; son reflejo del presente trabajo de investigación; a quienes se los dedico con gran cariño.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	8
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE VEHÍCULOS	
1.1. Introducción.....	10
1.2. Estado del arte de la conducción autónoma.....	11
1.2.1. Conducción autónoma de Audi TTS.....	11
1.2.2. Conducción autónoma de Volvo con Sistema Sartre.....	12
1.2.3. Excavadora autónoma para carga de material.....	13
1.2.4. Camiones mineros autónomos.....	16
1.2.4.1. Tipos de camiones mineros.....	16
1.2.4.1.1. Camiones de transmisión eléctrica Komatsu.....	16
1.2.4.1.2. Camiones de transmisión mecánica Caterpillar.....	17
1.2.4.2. Camiones autónomos Komatsu 930SE.....	18
1.3. Objetivos de la tesis.....	21
CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS CAMIONES MINEROS DE DOS CUERPOS	
2.1. Funciones de la maquinaria pesada en la minería.....	23
2.1.1. Introducción.....	23

2.1.2. Arranque.....	23
2.1.3. Carga.....	24
2.1.4. Transporte.....	24
2.2. Características mecánicas del camión minero articulado Caterpillar 740.....	25
2.2.1. Introducción.....	25
2.2.2. Controlador de administración avanzada del motor diesel – ADEM A4.....	25
2.2.3. Suministro de combustible.....	26
2.2.4. Tecnologías de reducción de ruido.....	26
2.2.5. Transmisión electrónica.....	26
2.2.6. Cambios de marcha con aceleración controlada – CTS.....	26
2.2.7. Suspensión delantera.....	27
2.2.8. Frenos herméticos enfriados por aceite.....	27
2.2.9. Suspensión trasera.....	27
2.2.10. Control de tracción.....	28
2.2.11. Traba de diferencial interaxial.....	28
2.2.12. Trabas del diferencial transversal.....	28
2.3. Características electrónicas del control del camión minero articulado Caterpillar 740.....	29
2.3.1. Introducción.....	29
2.3.2. Control del motor.....	30
2.3.3. Control de la transmisión.....	32
2.4. Modelamiento del camión minero de dos cuerpos.....	34

CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA CONDUCCIÓN AUTONOMA DE UN CAMION MINERO DE DOS CUERPOS

3.1. Introducción.....	39
------------------------	----

3.2.	Fundamentos del sistema de control avanzado a utilizar.....	39
3.2.1.	Lógica Difusa.....	39
3.2.1.1.	Introducción.....	39
3.2.1.2.	Funciones de inclusión o pertenencia de conjuntos borrosos.....	41
3.2.1.3.	Borrosificador.....	41
3.2.1.4.	Reglas borrosas.....	42
3.2.1.5.	Desborrosificador.....	42
3.2.2.	Redes Neuronales.....	44
3.2.2.1.	Introducción.....	44
3.2.2.2.	Vector de entrada.....	44
3.2.2.3.	Pesos sinápticos.....	45
3.2.2.4.	El umbral.....	45
3.2.2.5.	Operador de suma.....	45
3.2.2.6.	La función de activación.....	45
3.2.2.7.	Topología de la red neuronal.....	46
3.2.3.	Control Neurodifuso.....	46
3.2.3.1.	Introducción.....	46
3.2.3.2.	Taxonomía de los sistemas neurodifusos.....	47
3.2.3.3.	Agrupamiento de los sistemas neurodifusos.....	50
3.3.	Diseño del sistema de control.....	51
3.3.1.	Estructura del sistema de control neurodifuso.....	51
3.3.2.	Estructura del controlador neurodifuso para el control de conducción autónoma del camión minero de dos cuerpos.....	52
3.3.3.	Identificación del entorno de interacción del sistema de control para el camión minero de dos cuerpos.....	53
3.3.4.	Diseño del sistema de control difuso y neurodifuso.....	57
3.3.4.1.	Introducción.....	57

3.3.4.2.	Control difuso sin obstáculos en ruta.....	58
3.3.4.3.	Control difuso con obstáculos en ruta.....	
3.3.4.4.	Control neurodifuso sin obstáculos en ruta.....	68
3.3.4.5.	Control neurodifuso con obstáculos en ruta.....	73
3.3.5.	Dispositivos para la aplicación del sistema de control neurodifuso para la conducción autónoma del camión minero de dos cuerpos.....	79

CAPITULO IV: RESULTADOS DEL DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DIFUSO Y NEURODIFUSO

4.1.	Resultados del diseño del controlador difuso.....	86
4.1.1.	Controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.....	86
4.1.2.	Controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.....	95
4.2.	Resultados del diseño del controlador neurodifuso.....	103
4.2.1.	Controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.....	103
4.2.2.	Controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.....	112
4.2.3.	Controlador neurodifuso para trayectoria.....	120
4.3.	Comparación de resultados entre el controlador difuso y neurodifuso.....	129
4.3.1.	Comparación de resultados entre los controladores difuso y neurodifuso para el estacionamiento del camión minero articulado sin obstáculos.....	129
4.3.2.	Comparación de resultados entre los controladores difuso y neurodifuso para el estacionamiento del camión minero articulado con obstáculos.....	131
4.4.	Aplicación del controlador neurodifuso diseñado.....	133
4.5.	Análisis de resultados.....	139

CONCLUSIONES		141
---------------------	--	------------

RECOMENDACIONES		142
------------------------	--	------------

INTRODUCCIÓN

Uno de los sectores tecnológicos que, junto con la computación y los celulares, ha tenido los mayores avances durante los últimos años es sin duda el automotriz. Empresas de tanto prestigio como BWM, VW, Audi y Ferrari, luchan por estar a la vanguardia de un mercado que crece cada año, y para ello, crean enormes ferias automotrices donde exponen sus distintos prototipos de ideas innovadoras que prometen grandes avances, tanto en eficiencia, seguridad, ahorro, velocidad, aceleración y convivencia con el medio ambiente.

Por este motivo, los automóviles comienzan a anticipar el problema social que encuentra el conductor en la carretera añadiendo nuevas mejoras que permitan una mejor movilidad en la carretera. Algunas de las mejoras a destacar serían las siguientes: contra los deslumbramientos, aparcar sin conductor, sistemas de frenado automáticos, ocultar roces, evitar atascos, adaptabilidad al asfalto, vehículos a baterías, etc.

Así como la tecnología crece a nivel automotriz, de la misma manera se ofrece sistemas de control automático para el sector minero, en especial para los camiones mineros, los cuales han evolucionado continuamente desde su concepción. Los requisitos de los clientes y los avances tecnológicos han impulsado este desarrollo.

El objetivo principal de la tecnología aplicada a camiones mineros es para proporcionar comodidad al operador, capacidades de control superior y alta productividad. Estos equipos se caracterizan por el gran movimiento de material que realizan de manera continua, con la finalidad de obtener bajos costos por tonelada transportada y para ello las principales empresas como Caterpillar y Komatsu, se preocupan por el rendimiento óptimo y robusto de sus sistemas de transmisión mecánico y eléctrico.

Teniendo en consideración la implementación de sistemas de control en los vehículos mineros para evitar accidentes y otorgar mayor seguridad a los operadores, es que se ha decidido diseñar un sistema de control neurodifuso para la conducción autónoma de un camión minero de dos cuerpos, permitiendo un mayor transporte de material, brindar seguridad a los pilotos y demás tripulantes alrededor de la mina, y obtener una producción de manera continua.

Sabemos que mientras mayor es el tiempo que el chofer u operador está manejando un camión minero, es propenso al cansancio, a cometer errores con los dispositivos eléctricos y mecánicos del equipo, y adjunto a ello, las probabilidades de un accidente se incrementan.

Se desarrolla el diseño de un sistema de control avanzado mediante técnicas neurodifusas, el cual permitirá desplazarse entre las áreas de la mina, como es el área de Chancado, zona de carga del Tajo Abierto, Mantenimiento – Mina y Botaderos; de la misma manera permitirá estacionar el camión minero articulado en las zonas o áreas de carga y descarga de material. Para tal propósito se considera las rutas de la mina Cerro Verde para obtener una interacción real del comportamiento del sistema de control diseñado

Es por ello que en el primer capítulo, presentamos el estado del arte de la conducción autónoma de automóviles, en la cual se manifiesta la tecnología desarrollada y proyectada por las grandes marcas de vehículos mineros y no mineros. Se plasma la diferencia en los tipos de camiones mineros presentes en la actualidad, evidenciando el sector y sistema al cual nos acoplaremos para el diseño. La presentación de los sistemas de control actuales permiten un gran desafío para las diferentes marcas de vehículos, motivo por el cual se asume el reto de diseñar un sistema de control avanzado para brindar un ámbito seguro, confiable y de mayor rendimiento para el sector minero, mediante la conducción autónoma de un vehículo articulado o de dos cuerpos.

En el segundo capítulo se muestra y se describe las características dinámicas de los camiones mineros de dos cuerpos, por ello se manifiesta de manera general las funciones de la maquinaria pesada en la minería. Se elige como modelo de simulación al camión minero Caterpillar de dos cuerpos 740, motivo por el cual se describe su sistema de transmisión mecánica y de potencia para el desplazamiento del vehículo; de la misma manera se describe los sistemas de control actuales que están en contacto directo con el operador de la máquina. Luego se desarrolla el modelamiento del camión minero de dos cuerpos, que será de gran utilidad para el diseño del sistema de control neurodifuso que se presenta en el siguiente capítulo.

En el tercer capítulo se diseña el sistema de control para la conducción autónoma de un camión minero Caterpillar 740 de dos cuerpos. Aquí se realiza un diseño de un control difuso y un control neurodifuso, con la intención de comparar posteriormente, ambos resultados y elegir el mejor controlador para el camión articulado. Cada controlador diseñado estará conectado en cascada con otro controlador de la misma característica, pero con la diferencia de que el primer controlador se encargara del control en trayectoria, y el segundo controlador se encargará del control el vehículo cuando se estacione en un punto de carga o descarga de material.

En el cuarto capítulo se ponen en evidencia los resultados de los controladores diseñados, los cuales nos permiten elegir al controlador neurodifuso como el más adecuado para el control del camión articulado o de dos cuerpos, luego de la comparación de los resultados del sistema difuso y neurodifuso ante las mismas características de simulación. Aquí se muestra una simulación tanto para la trayectoria del vehículo y para el estacionamiento que tendrá que realizar ante los puntos de carga y descarga de material. Teniendo en cuenta que la interacción más complicada del camión es en retroceso cuando desea estacionarse en un punto, se ha considerado obstáculos antes de su objetivo, permitiendo un comportamiento correcto del controlador neurodifuso que fue elegido para el camión articulado.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE VEHÍCULOS

1.1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día muchas de las acciones que emprende el conductor no obtienen una respuesta directa de los elementos físicos de los vehículos o camiones (Fig. 1.1), sino que recaen sobre elementos electrónicos que han sido diseñados para obtener de los sistemas del vehículo la mejor respuesta adaptada a cada situación. Así, por ejemplo, cuando el conductor suelta el pedal del acelerador la centralita que regula la inyección de carburante ordena a sus actuadores que dejen de introducir hidrocarburos en el motor, con lo que se consigue un buen ahorro energético.

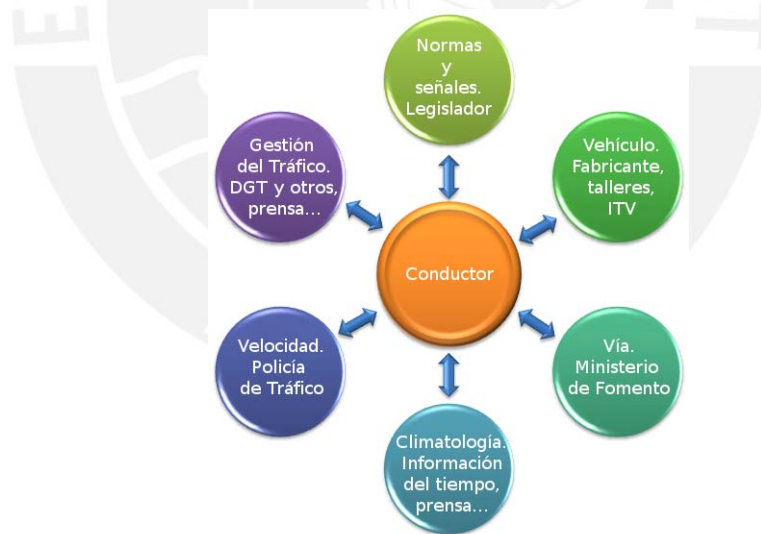


Figura 1.1. Interacción de procesos del conductor de un vehículo.

Con este ejemplo se pone en evidencia que en un futuro muy próximo los vehículos se conducirán automáticamente, sin más que una ligera supervisión por parte del conductor. Se entiende que el factor humano está presente en la mayoría de siniestralidad de camiones mineros, no hay que hacer muchos cálculos para deducir que en un futuro cuando las máquinas gobiernen la conducción, se aumentará la seguridad.

Así también, si se dispone de vehículos programados con parámetros orientados hacia la seguridad y la eficacia de la circulación, veremos que el tráfico pierde complejidad cuando los conductores ya no deciden tanto sino que dejan esa tarea en manos del sistema.

Por esta importancia que han adquirido los sistemas automatizados con respecto a seguridad, ahorro energético y mayor producción, es que muchos procesos en la minería actual disponen de la aplicación de sistemas autónomos o robóticos; sobre todo en acciones repetitivas, en las cuales solo es necesario una supervisión por software e interacción con el proceso en casos de urgencia o mantenimiento.

1.2. ESTADO DEL ARTE DE LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

1.2.1. CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE AUDI TTS

La imagen de las marcas de los vehículos tiene mayor impacto hacia el cliente en exposiciones, y sobre todo en competencias de autos; motivo por el cual en Stanford se ha desarrollado un nuevo sistema de conducción autónomo implementado en un *Audi TTS* apodado "*Shelly*". A través de su avanzada inteligencia artificial, está preparado para afrontar competencias de carreras a velocidades elevadas en cualquier entorno, mostrando una gran fiabilidad y seguridad en las maniobras.

El equipamiento principal de *Shelly* está basado en una serie de unidades informáticas y sistemas GPS valorados en más de 100.000 dólares. Con la excepción de un par de antenas en el techo exterior del vehículo, *Shelly* parece y actúa como un *Audi TTS* normal, funciona a gasolina utilizando los controles estándar de frenado y dirección (Fig. 1.2). Pero a diferencia del promedio de los coches deportivos el software diseñado por *Dynamic Design Lab* en Stanford, ejecutará maniobras de conducción reales, los cuales están diseñados para imitar a las de un piloto de vehículos de la vida real.



Figura 1.2. Audi TTS autónomo en ediciones de la Pikes Peak.

En pasadas ediciones de la *Pikes Peak* fueron puestos a prueba otros modelos de conducción autónoma, sin embargo, estos vehículos no eran capaces de sobrepasar los 40 kilómetros por hora, mientras que *Shelly* puede alcanzar los 210 kilómetros por hora, comprobados recientemente con efectividad en el desierto. Los ingenieros esperan que *Shelley* sea el primer paso hacia la creación de sistemas autónomos de conducción que un día serán integrados en todos los vehículos como medida de seguridad.

Financiado parcialmente por *Volkswagen*, *Shelley* será uno de los nuevos desarrollos en ser puestos a prueba a principios del 2013 ante conductores reales al volante, de modo que puedan mejorar los sistemas de monitorización en las reacciones humanas durante el transcurso de la conducción, afinando la actuación del software.

1.2.2. CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE VOLVO CON SISTEMA SARTRE

Gran cantidad de vehículos circulan por las carreteras de todo el mundo a diario, la mayoría haciendo pequeños recorridos para ir a sus puestos de trabajo y otros haciendo trayectos de grandes distancias. Para estos, hace tiempo que se está trabajando en un sistema llamado *Sartre*, el cual tiene como objetivo mejorar la circulación por las autovías en diferentes aspectos, evitar los atascos en las carreteras, la reducción de accidentes y de emisiones, así como mejorar el tráfico y de permitir un descanso al conductor.

Se le ha llamado coloquialmente como el *tren de carretera* (Fig. 1.3) porque su funcionamiento es similar al de un tren. Estaría formado por un convoy en el que en primer lugar habría un camión (o cualquier otro tipo de vehículo destinado a ello) que haría de guía al resto de vehículos. Los conductores que circulen por la carretera pueden entrar y salir de este convoy cuando quieran y mientras estén dentro el coche circulará sólo siguiendo gracias al sistema automatizado que forma parte de este *tren de coches*.

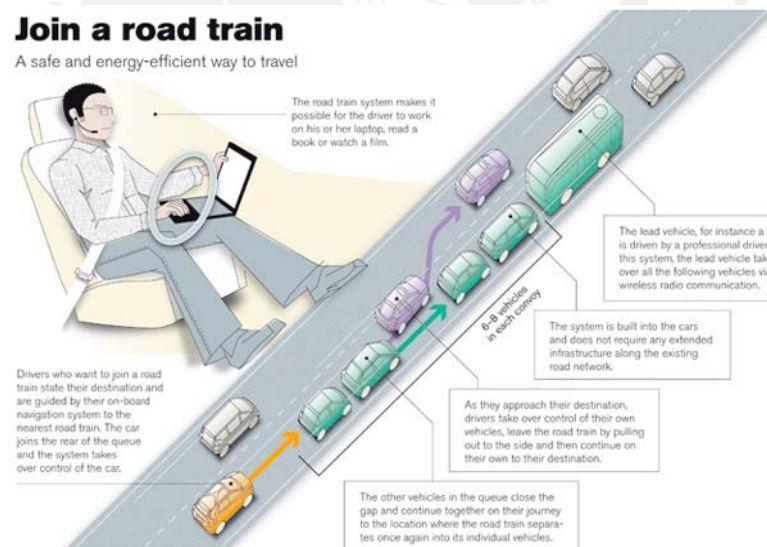


Figura 1.3. Funcionamiento del sistema de conducción autónoma Sastre de Volvo.

Este sistema está siendo impulsado por varias marcas, siendo la más conocida Volvo y después de casi un año de pruebas en laboratorio y simuladores, en diciembre del 2012, se comienzan a hacer las primeras pruebas sobre carretera. Hasta ahora se han realizado diferentes test en simuladores en España donde se ha podido ver las reacciones de los conductores en diferentes tipos de situaciones a la hora de hacer uso de este *tren de carretera*.

Una vez completada esta primera fase de un desarrollo, en diciembre se comenzarán a hacer pruebas con convoy's de dos coches y para el 2013 hacer pruebas de hasta cinco vehículos. La gran innovación que tiene esta tecnología es el sistema que hace posible que el coche circule sólo siguiendo las el ritmo del coche guía.

Los coches tendrían que estar preparados para poder incorporarse a este convoy, tanto a nivel de software como de hardware. El vehículo tiene que tener un dispositivo capaz de recibir las instrucciones que mande el coche guía y a su vez, tiene que poder replicar esa información al resto de coches que circulen detrás. Además también tiene que contar con los dispositivos necesarios que le permitan seguir el carril, manteniendo la distancia de seguridad sin provocar ningún tipo de incidente.

Así mismo, los conductores que quieran usar este sistema deberán de recibir algún tipo de formación, sobre cómo han de incorporarse y salir de este convoy para evitar que haya una desconexión en la transmisión de datos con los demás coches. Pero independientemente de todo esto, la idea es bastante buena ya que nos permitiría descansar en viajes largos sin necesidad de parar, ahorrándonos algo de tiempo durante el trayecto.

1.2.3. EXCAVADORA AUTÓNOMA PARA CARGA DE MATERIAL

El sistema de carga autónoma utiliza dos scanner láser de exploración que están montados en cada lado de la excavadora para detectar el terreno, camiones, y los obstáculos en el espacio de trabajo. Dos escáneres son necesarios para la cobertura total del espacio de trabajo y permitir la detección simultánea de las operaciones.

Cada lector puede desplazarse a una velocidad de hasta 120 grados por segundo, permitiendo un muestreo en forma circular. El escáner de posición en la cabina del operador se llama "scanner izquierda", y es responsable de la detección del espacio de trabajo al lado izquierdo de la excavadora. El "escáner derecho", que se encuentra en una posición simétrica en el lado derecho de la pluma, es responsable de la detección del espacio de trabajo en el lado derecho de la excavadora (Fig. 1.4).

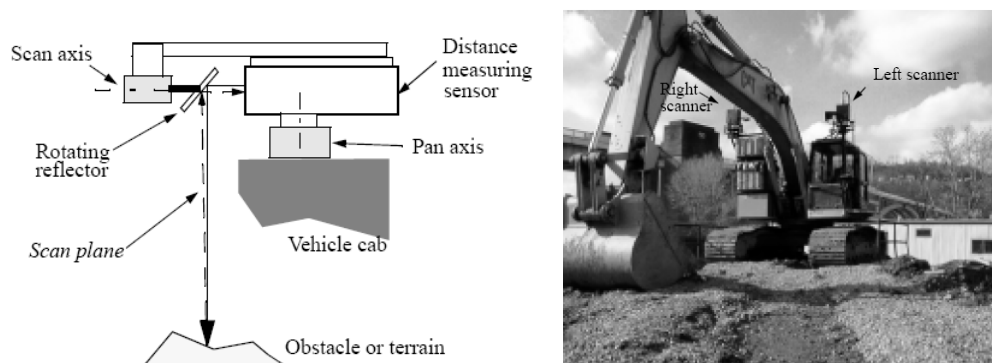


Figura 1.4. Posicionamiento de sensores scanner y formación de ejes imaginarios.

La excavadora utiliza su escáner cuando se carga material al camión. Mientras la excavadora cava su primer segmento, el escáner de la izquierda detecta los obstáculos y reconoce, localiza y mide las dimensiones del camión. Usa ésta información, para determinar la ubicación deseada de descarga de material en el camión, y en los cambios de descarga en el camión. Durante este movimiento “swing”, el escáner de la derecha mide su nueva superficie, y calcula la siguiente ubicación de excavación. El escáner derecho panea hacia el camión. Después de que el suelo es objeto de carga en el camión, el escáner derecho detecta obstáculos en el camino de los implementos para la siguiente excavación.

Durante este cambio o giro, el escáner de la izquierda calcula y mide panorámicamente la distribución en la plataforma del camión, y el volcado del lugar y lado deseado. Este proceso se repite para cada subsiguiente carga hasta que el camión está lleno, con la excepción que el reconocimiento de camiones sólo es necesario para el primer paso por cada camión nuevo.

La información de los escáneres se procesa mediante un bordo conjunto de cuatro procesadores MIPS. Las cajas son módulos de software que se puede ejecutar en uno de los procesadores del sistema. Los círculos son hardware, tales como sensores de los componentes. Las líneas representan canales de comunicación.

Las interfaces de sensor reciben datos de los dos escáneres y controlan el movimiento oscilatorio de recolección de datos de los dispositivos (Fig. 1.5). Los datos de los sensores de las interfaces se pasan a los procesadores de línea de exploración, donde se convierten de coordenadas esféricas a coordenadas cartesianas utilizando los datos correspondientes del sistema de posición. Estos puntos de la línea de tres dimensiones se ponen a disposición en percepción del requerimiento de los módulos del software.

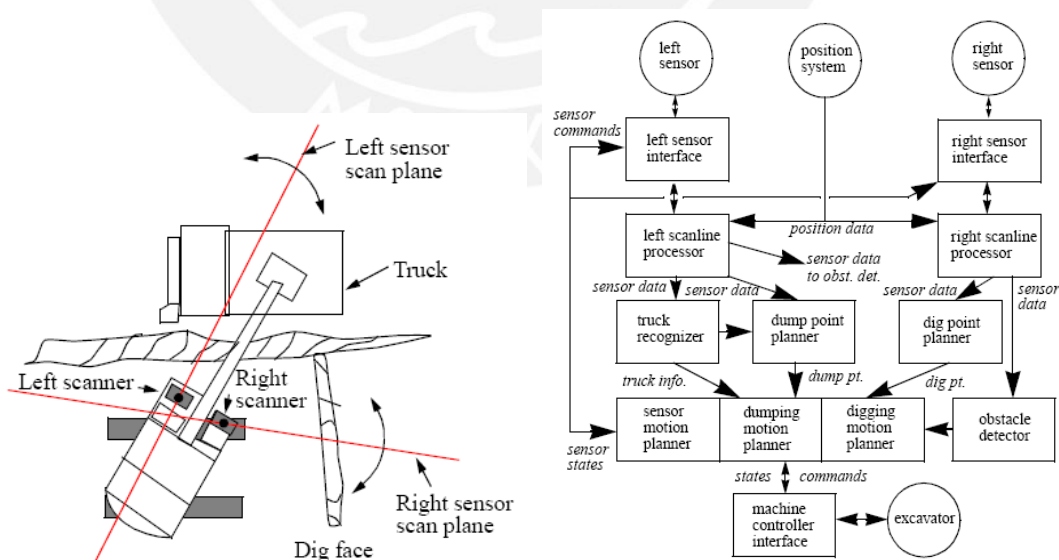


Figura 1.5. Arquitectura del sistema de control de la excavadora autónoma.

- **Reconocimiento de camiones:** el reconocedor de camiones utiliza los datos del sensor para reconocer su forma automática, localización, dimensión y

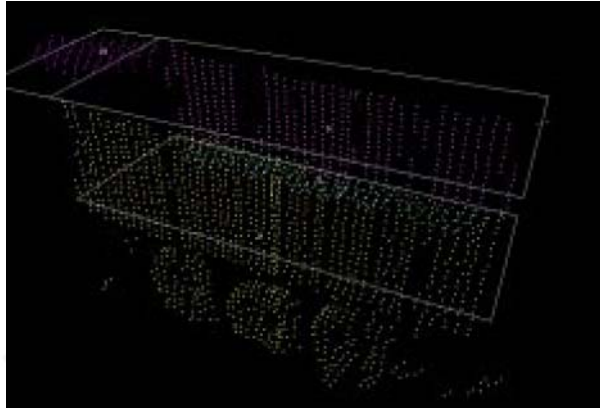


Figura 1.6. Reconocimiento del camión por medio de los sensores scanner.

- Planificación de excavación:** Automatizando las operaciones de movimiento de tierras tales como la nivelación de un montículo de tierra, se distinguen de la planificación típica problemas de dos maneras importantes. En primer lugar, el suelo es difuso (Fig. 1.7) y por lo tanto una descripción única del mundo requiere de un gran número de variables. En segundo lugar, la interacción entre el robot y el mundo es muy compleja y sólo modelos aproximados son computacionalmente tratables y disponibles.

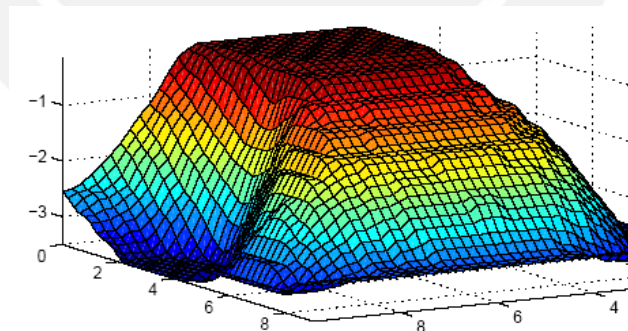


Figura 1.7. Modelo de terreno con el que interactuará la excavadora autónoma.

A su vez, cada región de excavación se busca como la mejor excavación que se puede ejecutar en la región. Por último, la excavación seleccionada es ejecutada por un control de lazo cerrado basado en la fuerza.

En el más bajo nivel se encuentra un esquema de control que es robusto a errores en la detección de la geometría del terreno.

El planificador toma como entrada y procesa los datos del sensor lo que lo sitúa en un mapa del terreno (una cuadrícula de 2-D de los valores de altura).

La Fig. 1.8 muestra una estrategia para la eliminación de material que fue recomendado por un operador experto en excavadoras.

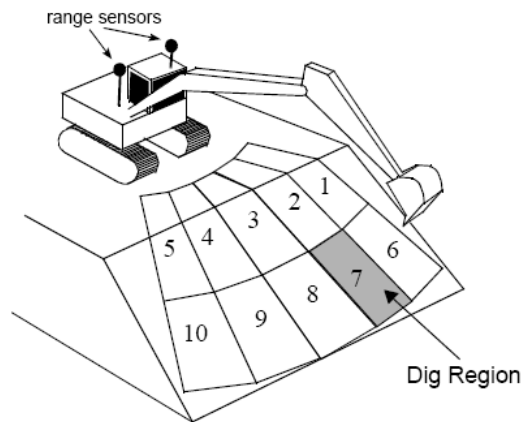


Figura 1.8. Región de excavación de la máquina.

Cada sección indica una región, y el número dentro del área, indica el orden que siempre conservará durante la remoción de material. En esta estrategia, el material es retirado de izquierda a derecha y desde la parte superior de la cara para la parte inferior. Hay varias razones para elegir esta estrategia. En la mayoría de los casos, el camión está estacionado en el lado lateral izquierdo del operador para que se disponga de una visión clara al respecto. Por la excavación de izquierda a derecha, los instrumentos no necesitan ser elevados al máximo para eliminar el material al camión. En la excavación de arriba a abajo, se requiere menos fuerza de los instrumentos, ya que no es necesario trabajar contra el peso del material superior.

1.2.4. CAMIONES MINEROS AUTÓNOMOS

1.2.4.1. TIPOS DE CAMIONES MINEROS

Primero haremos hincapié a la diferencia entre los tipos de transmisión que se disponen en los camiones mineros más grandes del mundo, en los cuales se ha utilizado ésta tecnología. Las características y diferencias principales entre los distintos tipos de camiones mineros, es por medio del accionamiento de sus componentes, sean:

1.2.4.1.1. CAMIONES DE TRANSMISIÓN ELÉCTRICA KOMATSU

Hoy en día este tipo de camiones (Fig. 1.9) son muy utilizados en el transporte de material dentro de una mina de tajo abierto, debido a que poseen motores eléctricos como mandos finales, los cuales permiten transmitir la potencia del motor a las ruedas, y por ende efectuarse el movimiento propio de la máquina.



Figura 1.9. Camión minero Komatsu.

Esta característica permite un desempeño más confiable del camión mientras se desplaza por las pendientes de la mina. A su vez se garantiza un costo de mantenimiento más económico por los componentes y control que posee el sistema de transmisión de potencia (Fig. 1.10).



Figura 1.10. Componentes y transmisión del camión minero Komatsu.

1.2.4.1.2. CAMIONES DE TRANSMISIÓN MECÁNICA CATERPILLAR

Estos camiones (Fig. 1.11) se caracterizan por no poseer un control electrónico (ECM o computadora) acoplado al motor y que permita la regulación de combustión, monitoreo de temperaturas, registro de eventos, etc. Su control o regulación de estos parámetros los efectúa de manera mecánica mediante varillajes propios del motor.



Figura 1.11. Camión minero Caterpillar 797.

Adicionalmente la transmisión de potencia a las ruedas se realiza mediante un mando final mecánico conformado por engranajes, rodamientos y un sistema de reducción que permiten proporcionar un correcto sistema de tracción posterior.

La ventaja de estos camiones es que cuando se presenta un suelo húmedo en la mina producto de precipitaciones fluviales, la tracción trasera (Fig. 1.12) de estas máquinas permite avanzar sin dificultad y derrapes, en cambio que en los camiones eléctricos podría presentarse el problema de corto circuito.

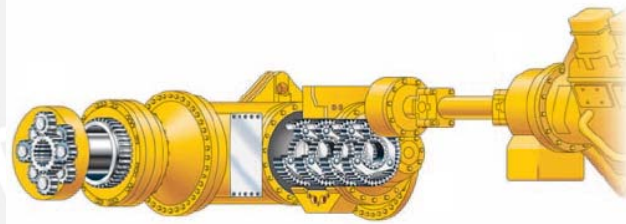


Figura 1.12. Transmisión de un camión minero Caterpillar.

1.2.4.2. CAMIONES AUTÓNOMOS KOMATSU 930SE

El proyecto de camión autónomo de Komatsu nace como respuesta a la necesidad de las empresas mineras de disponer de un medio tecnológico, que permita efectuar el transporte masivo de los materiales en las minas explotadas por método *open pit*, sin exponer a los operadores de los camiones a las condiciones de riesgo inherentes a esta operación y a las condiciones que pudieran ser desfavorable a la naturaleza humana, y nació como una respuesta a la necesidad de contar con un medio de transporte económico para aquellos proyectos mineros marginales (Fig. 1.13), en términos de su viabilidad económica.



Figura 1.13. Camiones mineros Komatsu 930SE.

La tecnología del camión autónomo fue desarrollada por Komatsu, probada en Australia y luego en Estados Unidos, en el centro de prueba Twin Buttes, en el cual se comprobó la operatividad del sistema en camiones 930E de 320 toneladas. En Chile, Komatsu realizó una prueba industrial del camión autónomo con Codelco Chile.

Este tipo de control funciona mediante un Sistema de Acarreo Autónomo (Autonomous Haulage System: AHS), es un sistema integral de administración de la flota para minas. Los camiones volquete, que están equipados con controladores de vehículos, un sistema de posicionamiento global (GPS) de alta precisión, un sistema de detección de obstáculos y un sistema de red inalámbrica desarrollados conjuntamente por Komatsu Ltd., Komatsu América Corp. y Modular Mining Systems, Inc., se operan y controlan vía una computadora supervisora, lo que permite que no tengan personal [4].

La información sobre el recorrido y la velocidad objetivos se transmite en forma inalámbrica desde la computadora supervisora al camión volquete sin conductor, al tiempo que se utiliza el GPS para verificar la posición del mismo. Cuando se cargan, los camiones volquete se guían automáticamente hasta el punto de carga después de calcular la posición del cucharón de la excavadora hidráulica o de la cargadora sobre ruedas equipada con el GPS. La computadora supervisora también transmite información sobre el recorrido específico hasta el punto de descarga. Desde el punto de vista de la seguridad, el sistema de control de la flota evita las colisiones con otros camiones volquete, con otros vehículos de servicio o con otros equipos en el sitio de la mina. En el caso de que un sistema de detección de obstáculos detecte a otro vehículo o a una persona en el interior del recorrido de acarreo bajo la operación del AHS, los vehículos reducirán la velocidad o se pararán inmediatamente, haciendo que el sistema sea sumamente seguro y confiable.

Además, el AHS (Fig. 1.14) permite una operación estable en condiciones duras como, por ejemplo, a grandes alturas o en áreas escasamente pobladas y desiertas. Al mismo tiempo, mediante la optimización de las operaciones, el sistema contribuye a reducir los costos de mantenimiento, a conservar la energía y a restringir las emisiones de CO₂.

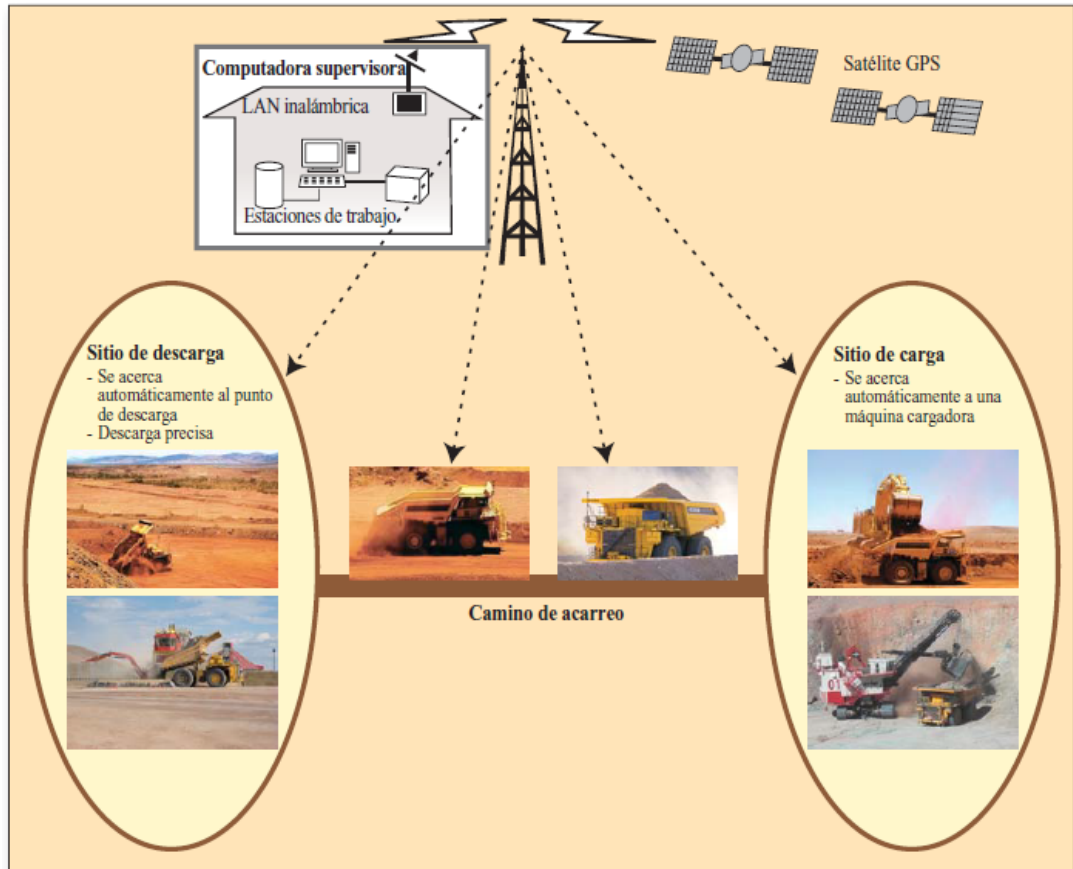


Figura 1.14. Funcionamiento del sistema AHS de Komatsu.

Estos camiones Komatsu 930SE de 30 toneladas de peso y del tamaño de una vivienda, son distribuidos en la actualidad en una mina en el norte de Chile con la finalidad de que se desplacen de manera autónoma en todo el terreno de la mina. Estos camiones se disponen de 17 unidades, las cuales están actualmente en uso en la Mina Gabriela Mistral, una de las más grandes productoras de cobre.

El sistema funciona también a cargo de un monitoreo constante por medio de ingenieros situados en una sala de mando, los cuales pueden interactuar en tiempo real con los camiones que se desplazan a lo largo de la mina, ante cualquier imprevisto, falla o perturbación inesperada que se pueda presentar en el desplazamiento autónomo de los camiones. La trayectoria por donde se desplazan los camiones, ya sea por entornos del tajo abierto, chancadora, botaderos y talleres, es adquirido por medio de una marcación por puntos a lo largo del terreno y supervisado por medio de un sistema de posicionamiento global (GPS). Estos puntos marcados en el entorno de trabajo de los camiones son actualizados frecuentemente debido al movimiento intencional o inesperado (movimientos sísmicos) a los que están expuestas las máquinas (Fig. 1.15).



Figura 1.15. Interacción del camión minero Komatsu con la minera Gabriela Mistral – Chile.

El camión minero dispone de sensores de ultrasonido en su parte frontal y posterior, con la finalidad de no impactar con los demás vehículos que circulan también por los distintos sectores de la mina, ya sean camionetas, motoniveladoras, cargadores frontales, etc. Estas lecturas de los sensores también permiten que el camión no impacte con la chancadora al momento de descargar el material, así como que se provoque un accidente al momento de eliminar el material en los botaderos (Fig. 1.16).

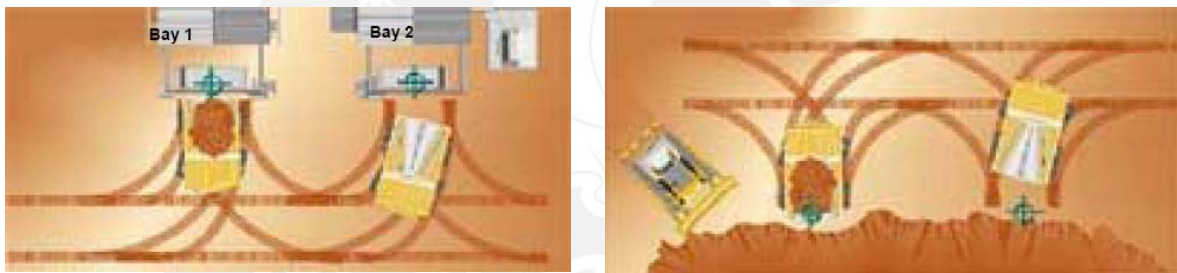


Figura 1.16. Estacionamiento del camión minero Komatsu en botaderos y chancadoras en la mina Gabriela Mistral – Chile.

Estos camiones disponen de una parada de emergencia por software y en hardware por motivos de seguridad. Como es evidente y se ha podido notar en la descripción de los antecedentes de esta aplicación, la información que se dispone sobre este tipo de tecnología que está siendo aplicada actualmente en diferentes marcas y empresas, es restringida, por ser información confidencial y lógicamente por prevalecer la innovación en el mercado actual.

1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS

Considerando que el objetivo principal de una compañía minera es la mayor producción de minerales con un rápido y eficiente transporte de materia prima, es que se presenta esta tesis con el siguiente objetivo general:

“Diseño de un controlador neurodifuso para la conducción autónoma de un camión minero de dos cuerpos mediante el control de la velocidad y dirección”.

Para cumplir con este objetivo es preciso alcanzar los siguientes objetivos específicos:

1. Presentar el modelo del camión minero e implementar su control mediante lógica difusa.
2. Diseñar un sistema de control neurodifuso para la conducción autónoma de un camión minero de dos cuerpos.
3. Comparar las ventajas y desventajas entre un sistema de control neurodifuso frente a un sistema de control con lógica difusa.
4. Brindar alcances de la aplicación de este controlador en el camión minero y entorno de trabajo.



CAPÍTULO II: CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LOS CAMIONES MINEROS DE DOS CUERPOS

2.1. FUNCIONES DE LA MAQUINARIA PESADA EN LA MINERÍA

2.1.1. INTRODUCCIÓN

La exploración de material en mayor proporción se realizan a minas en cielo abierto, o minas a tajo abierto, las cuales cuyo proceso extractivo se realiza en la superficie del terreno y con maquinarias mineras de gran tamaño. Como ejemplos de este tipo de minas se pueden citar a Chuquicamata, La Escondida y Pascua Lama en Chile, Ernest Henry en Australia, Corta Atalaya en España y el Cerrejón en Colombia (la más grande de este tipo en el mundo, con una extensión de 69.000 hectáreas y capacidad de producción de carbón para 2007, estimada en 31.1 millones de toneladas métricas).

Las operaciones básicas en cualquier tipo de mina son tres: arranque, carga y transporte.

2.1.2. ARRANQUE

Por arranque se entiende el conjunto de operaciones necesarias para separar la roca del macizo rocoso donde se encuentra. En la mayoría de las ocasiones es necesario, además, romper la roca en trozos suficientemente pequeños para facilitar los procesos posteriores (carga y transporte).

El arranque se realiza de tres maneras: con herramientas, con máquinas y con explosivos. Los dos primeros métodos sólo son rentables cuando las rocas a explotar son relativamente blandas, tales como el carbón o los fosfatos. Cuando las rocas son duras es necesario acudir al arranque mediante explosivos. En el caso de las rocas ornamentales (mármol, granitos, pizarras, etc.) empleadas en arquitectura y construcción se utilizan herramientas de corte de diamante y voladuras muy cuidadosas con muy pocas cantidad de explosivo.

El arranque con herramientas es el más antiguo y el menos rentable, económicamente hablando. En las minas de cobre de Texeo (en Riosa, Asturias, España), de hace aproximadamente 4.500 años, los mineros utilizaban como herramienta cuernos de cabra para arrancar el mineral, actualmente se emplea el martillo (hidráulico o neumático) como herramientas. Antes de la mecanización de

las minas el arranque se efectuaba con picos, mazas, barrenas, punterolas, cuñas y con martillos picadores.

Las máquinas que se utilizan actualmente para el arranque son:

En minería subterránea:

- Minador
- Rozadora
- Cepillo
- Scrappers

En minería a cielo abierto:

- Dragalina
- Pala excavadora
- Rotopala
- Mototrailla
- Bulldozer

En general, estas máquinas arrancan la roca utilizando elementos móviles cortantes: picas, rodets, cuchillas o discos.

El arranque mediante explosivos es el más utilizado. El arranque de la roca se realiza con voladuras.

2.1.3. CARGA

Por carga se entiende la recogida de la roca arrancada del suelo, y su traslado hasta un medio de transporte. En el arranque mediante maquinaria esta operación se realiza a la vez que el arranque. Así, por ejemplo, una pala excavadora se utiliza para arrancar y cargar. En las primeras minas la carga se realizaba a mano, con la ayuda de palas. Las máquinas más usadas para realizar la carga son las palas cargadoras, tanto en minas subterráneas como en exterior. Un caso especial de carga es cuando se dispone físicamente el medio de transporte debajo del mineral a arrancar. En este caso la carga se realiza con ayuda de la gravedad. Un método como este se aplica en minería subterránea cuando el nivel de explotación (de donde se extrae el mineral) está sobre el nivel de transporte.

2.1.4. TRANSPORTE

El transporte es la operación por la que se traslada el mineral arrancado hasta el exterior de la mina. El transporte dentro de una mina puede ser continuo, discontinuo o una mezcla de ambos. El transporte continuo utiliza medios que están continuamente en funcionamiento. Dentro de este tipo de transporte se utilizan cintas transportadoras, transportadores blindados y el transporte por gravedad. En el transporte discontinuo los medios realizan un movimiento alternativo entre el punto de carga y el de descarga. En este grupo se utiliza el ferrocarril y los camiones.

Por lo general en el Perú el transporte de material es desarrollado por medio de fajas transportadoras, cargadores frontales y/o camiones mineros, siendo estos

últimos los que poseen una mayor importancia para este tipo de transporte, ya que pueden llevar en sus compartimientos hasta 350 toneladas en pocos minutos.

Este tipo de transporte hoy en día es de vital importancia, ya que tiene consigo temas de innovación y tecnología, lo cual permiten que los camiones mineros se desenvuelvan de manera eficiente y reduciendo los costos de operación y mantenimiento. Existen diversos proveedores para estos tipos de máquinas a nivel internacional, por ejemplo: Caterpillar, Komatsu, Liebherr, Terex, etc.

2.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL CAMIÓN MINERO ARTICULADO CATERPILLAR 740

2.2.1. INTRODUCCIÓN

El modelo Caterpillar 740 (Fig. 2.1) es utilizado para el transporte de material en minas de tajo abierto, teniendo este modelo una variación en cuanto a sus medidas de perfil para ser utilizado en minería subterránea.

Su carga útil nominal es de 43,5 toneladas, ofrece cilindros de suspensión delantera de aceite/nitrógeno todo terreno que ofrece comodidad al operador durante toda la jornada.

Se dispone de trabas de diferencial realmente utilizables sobre la marcha, con funcionamiento sencillo para mejorar los tiempos de ciclo y la productividad, así como de un motor con tecnología Cat ACERT, transmisiones controladas electrónicamente que ofrecen un bajo consumo de combustible.

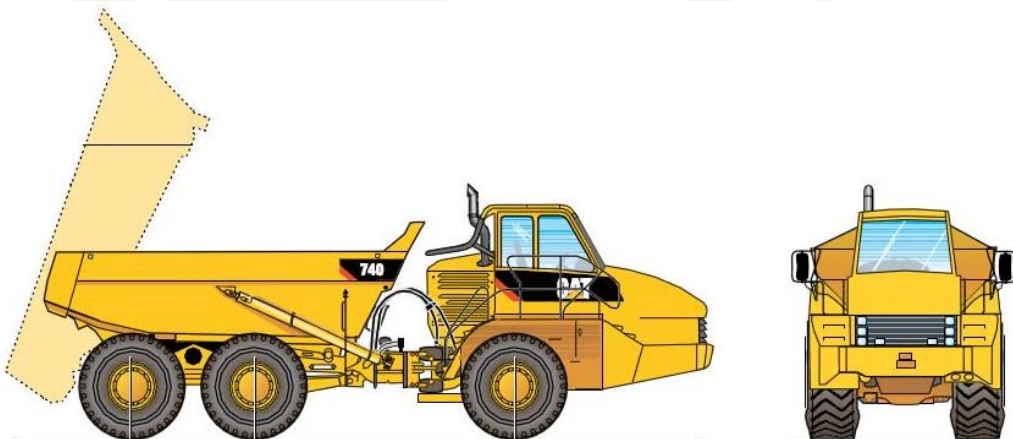


Figura 2.1. Vista frontal y de perfil del camión Caterpillar 740.

Las características más resaltantes respecto a este tipo de camiones mineros Caterpillar, son:

2.2.2. CONTROLADOR DE ADMINISTRACIÓN AVANZADA DEL MOTOR DIESEL – ADEM A4

El módulo de control electrónico ADEM A4 (Fig. 2.2) administra el suministro de combustible y facilita su distribución flexible, permitiendo que el motor responda rápidamente a las distintas necesidades de la aplicación.

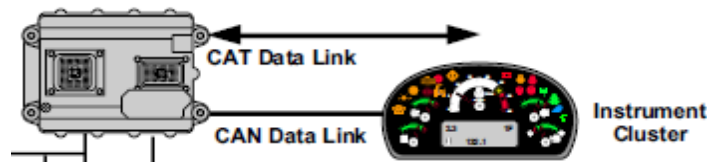


Figura 2.2. Comunicación entre la computadora ADEM A4 y el panel del operador.

2.2.3. SUMINISTRO DE COMBUSTIBLE

El sistema de suministro de combustible por inyección múltiple permite una alta precisión. La programación precisa del ciclo de combustión reduce las temperaturas de la cámara de combustión, genera menos emisiones y optimiza la combustión. Esto resulta en un mejor rendimiento a cambio del costo del combustible.

2.2.4. TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN DE RUIDO

Se ha disminuido el ruido gracias a algunos cambios de diseño como son: parte alta del motor aislada, mejoras del cárter de aceite, una estrategia de inyección múltiple, cubierta de la caja de sincronización aislada y refinamiento del tren de engranajes.

2.2.5. TRANSMISIÓN ELECTRÓNICA

La transmisión a control electrónico de siete velocidades de Caterpillar (Fig. 2.3) integra la estrategia de protección contra cambios innecesarios para proporcionar continuidad de velocidad y Modulación Individual de los Embragues (ICM) para asegurar los tiempos de cambio constantes.



Figura 2.3. Transmisión mecánica con transferencia de datos electrónicos del camión Caterpillar 740.

2.2.6. CAMBIOS DE MARCHA CON ACELERACIÓN CONTROLADA - CTS

Reducen de manera significativa los esfuerzos sobre el tren de fuerza y el desgaste del embrague, controlando la velocidad del motor y las conexiones de traba del convertidor de par y de los embragues de la transmisión (Fig. 2.4).



Figura 2.4. Aceleración controlada CTS.

2.2.7. SUSPENSIÓN DELANTERA

La suspensión delantera de tres puntos oscila en $\pm 6^\circ$ para ofrecer una amortiguación suave, permitiendo que el operador se desplace a la velocidad adecuada en terrenos irregulares y suavizando las cargas de impacto sobre las estructuras y los componentes (Fig. 2.5).

Los cilindros de presión baja y diámetro grande están diseñados para aplicaciones difíciles y ofrecen un desplazamiento suave y uniforme.



Figura 2.5. Suspensión delantera del camión Caterpillar 740.

2.2.8. FRENOS HERMÉTICOS ENFRIADOS POR ACEITE

Los frenos de placas múltiples sumergidas en aceite están instalados en los ejes delantero y central.

Estos frenos tienen excelente capacidad de parada mientras mantienen máxima durabilidad y mínimo desgaste.

2.2.9. SUSPENSIÓN TRASERA

Se caracteriza por tener una geometría de viga oscilante, con montantes de suspensión trasera diseñados por Caterpillar, que proporcionan un desplazamiento estable y fiable, para una excelente retención de carga.

2.2.10. CONTROL DE TRACCIÓN

El sistema de control de tracción (Fig. 2.6) consta de un diferencial interaxial con embrague en aceite y diferenciales de eje transversal con embrague en aceite. Todos los diferenciales pueden conectarse y desconectarse sobre la marcha para máxima versatilidad. Cuando se utilizan juntos, los diferenciales proporcionan un bloqueo total de la línea de impulsión.



Figura 2.6. Control de tracción del camión Caterpillar 740.

2.2.11. TRABA DE DIFERENCIAL INTERAXIAL

Bloquea los tres ejes a la vez y modifica la distribución de par para obtener excelente tracción en terrenos en malas condiciones y en pendientes. Se opera por medio de un interruptor situado en el posapié (Fig. 2.7).



Figura 2.7. Traba de diferencial interaxial del camión Caterpillar 740.

2.2.12. TRABAS DEL DIFERENCIAL TRANSVERSAL

Proporciona bloqueo total de la línea de impulsión (los tres ejes y las seis ruedas) para obtener un rendimiento máximo en las condiciones más adversas. Actúa en unísono con la traba del diferencial interaxial cuando se acciona el interruptor de pie y se selecciona el interruptor montado en el tablero (Fig. 2.8).

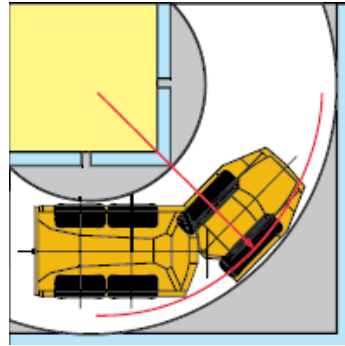


Figura 2.8. Trabas del diferencial transversal y radio de giro del camión Caterpillar 740.

Adicionalmente este equipo mediante el Equipment Manager le facilita la búsqueda y clasificación de los datos transmitidos por nivel de alerta, grupo, identificación de equipo, marca y modelo:

- Reportará los parámetros del equipo actuales (horas de máquina, ubicación, consumo de combustible, etc.).
- Vigilará todos los elementos de mantenimiento de máquina y guardará un historial.
- Establecerá por anticipado los servicios necesarios.
- Facilitará el plan de mantenimiento y el pedido de piezas.
- Le alertará en cuanto a los problemas potenciales e inmediatos.

2.3. CARACTERISTICAS ELECTRONICAS DEL CONTROL DEL CAMIÓN MINERO ARTICULADO CATERPILLAR 740

2.3.1. INTRODUCCIÓN

Los principales mecanismos de control de los camiones Caterpillar articulados (modelo Caterpillar 740), que permiten un desempeño adecuado y supervisado electrónicamente por los distintos componentes con los que interactúa la computadora del motor (ECM), se detalla a continuación en la Fig. 2.9:

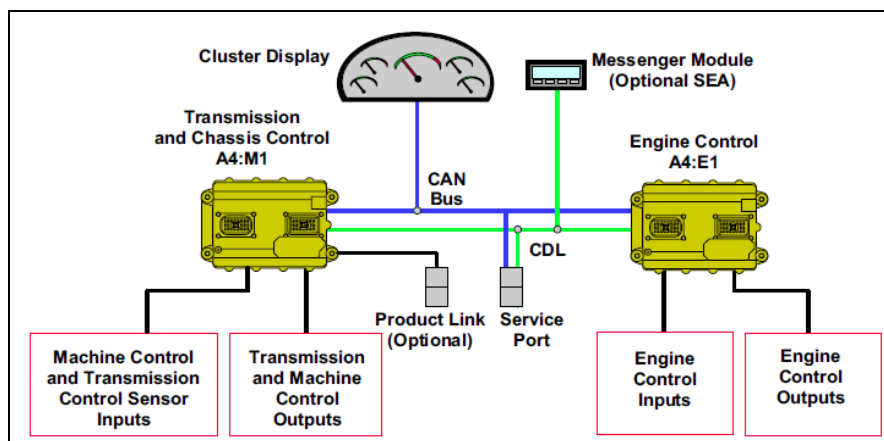


Figura 2.9. Interacción entre las computadoras del motor y de la transmisión del camión Caterpillar 740.

Dos computadoras, una que permite el control de la transmisión, y otra que permite el control del motor, interactúan con el panel del operador y permiten un control total de la unidad.

2.3.2. CONTROL DEL MOTOR

Este esquema (Fig. 2.10) del sistema de motor eléctrico, muestra los componentes que constituyen un aporte de control a la unidad, en interactuar con las señales de entrada y salida de la ECM del motor.

En base a las señales de entrada, el ECM del motor activa el electrónico de Accionamiento Mecánico de Inyectores Unitarios (MEUI) para controlar el suministro de combustible al motor. Un solenoide en cada inyector, controla la cantidad de combustible entregado por el inyector en el motor. El ECM del motor proporciona una señal a cada solenoide inyector unitario de control de la inyección de combustible. El sistema también controla otras funciones que son críticas para el rendimiento del motor.

Los dos conectores de interfaz de la máquina proporcionan las conexiones eléctricas del motor a la Transmisión / Chasis ECM tanto sobre el enlace de datos CAN y del Cat Data Link. Algunos de los componentes conectados al ECM del motor a través de la interfaz hombre-máquina, son: el pedal del acelerador sensor de posición, el solenoide de éter de ayuda, y el nivel del suelo cierre del interruptor.

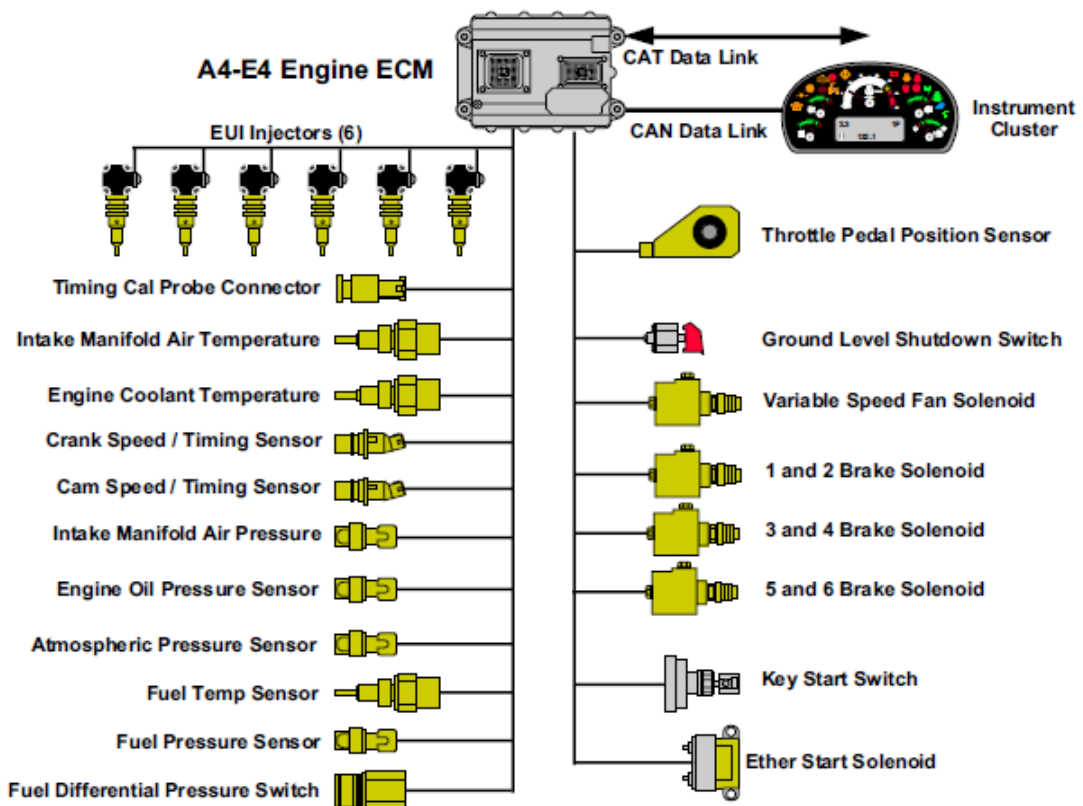


Figura 2.10. Comunicación de los sensores del motor con la computadora ECM A4-E4 del motor del camión Caterpillar 740.

La descripción de los componentes de entrada al ECM del motor se detalla a continuación:

- **Sensor de presión atmosférica:** Este sensor es una entrada a la ECM del motor y se utiliza como una referencia para los sensores de presión. Además, el sensor se utiliza para suministrar la información al motor de ECM durante el funcionamiento a gran altitud.
- **Colector de admisión de aire del sensor de temperatura:** Este sensor es una entrada a la ECM del motor a suministro de información sobre la temperatura del aire en el colector de admisión.
- **Colector de admisión de aire sensor de presión:** Este sensor es una entrada a la ECM del motor, suministra la presión de aire (aumento) en el colector de admisión.
- **Switch Diferencial de presión de combustible:** Este switch relé cambia avisa a la ECM que la presión de combustible a la salida de la base del filtro está restringido en comparación con la presión de entrada.
- **Sensor de temperatura de refrigerante del motor:** Este sensor es una entrada a la ECM del motor para suministrar información sobre la temperatura del refrigerante.
- **Sensor de presión del aceite de motor:** Este sensor es una entrada a la ECM del motor para suministrar la información sobre la presión de aceite del motor.
- **Sensor de posición del pedal acelerador:** Este sensor transmite la posición del acelerador al motor ECM con el fin de aumentar o disminuir el suministro de combustible a los inyectores.
- **Interruptor de parada a nivel del suelo:** Este interruptor es una entrada a la ECM del motor. Esta entrada desactiva la inyección de combustible cuando el motor está en marcha o en el arranque del motor.
- **Sensores de radares / tiempo:** Estos sensores de velocidad son los sensores pasivos de velocidad que proporcionar una señal similar a una onda senoidal que varía en amplitud y frecuencia de la velocidad. El sensor de tiempo de calibración de monitorea permanentemente la velocidad y la posición del volante.
- **Interruptor de la llave de arranque:** El interruptor de la llave de arranque "ON" + envía tensión al sistema eléctrico.
- **Sensor de temperatura del combustible:** El sensor envía información de datos de temperatura del combustible a la ECM del en el motor.
- **Sensor de presión de combustible:** El sensor envía datos de la regeneración de combustible de presión al ECM del motor.

- **Conector de sincronización de calibración:** La sonda de TDC se utiliza para la calibración del sensor velocidad/sincronización si el ECM del motor es reemplazado.
- **Interruptor de arranque manual éter:** Esta opción es una entrada a la ECM del motor para dinamizar el éter relé de arranque para enviar el flujo de éter continuo para el colector de admisión.

La descripción de los componentes de salida del ECM del motor se detalla a continuación:

- **Solenoide 1 y 2 de freno:** Este solenoide dirige aceite del motor al pistón maestro y al pistón esclavo para el inyector N ° 1 y N ° 2 y los brazos del balancín de escape.
- **Solenoide 3 y 4 de freno:** Este solenoide dirige aceite de motor a pistón maestro y el esclavo pistón N ° 3 y N ° 4 inyectores y los brazos del balancín de escape.
- **Solenoide 5 y 6 de freno:** Este solenoide dirige aceite de motor a pistón maestro y el esclavo pistón para el n ° 5 y 6 inyectores y los brazos del balancín de escape.
- **Inyectores electrónicos accionados mecánicamente:** Inyectores que suministran una cantidad de combustible gobernados por el motor básico.
- **Solenoide éter inicio:** Este solenoide suministra un flujo continuo de éter cuando los correctos parámetros están presentes en el ECM del motor.
- **Cuadro de instrumentos:** El cuadro de instrumentos recibe señales de los ECM del motor y Transmisión/Chasis ECM en el enlace de datos CAN, y proporciona información a través de diversos indicadores de alerta, las alarmas de acción, lecturas de LCD y los indicadores del medidor.

2.3.3. CONTROL DE LA TRANSMISIÓN

El objetivo principal de la transmisión ECM y chasis es para determinar la transmisión deseada del equipo y para energizar los solenoides de cambio apropiado para la transmisión hacia arriba o hacia abajo según sea necesario sobre la base de información tanto del operador y la máquina (Fig. 2.11).

El ECM de la transmisión y chasis controla el convertidor de par de embrague de bloqueo y el bloqueo del diferencial.

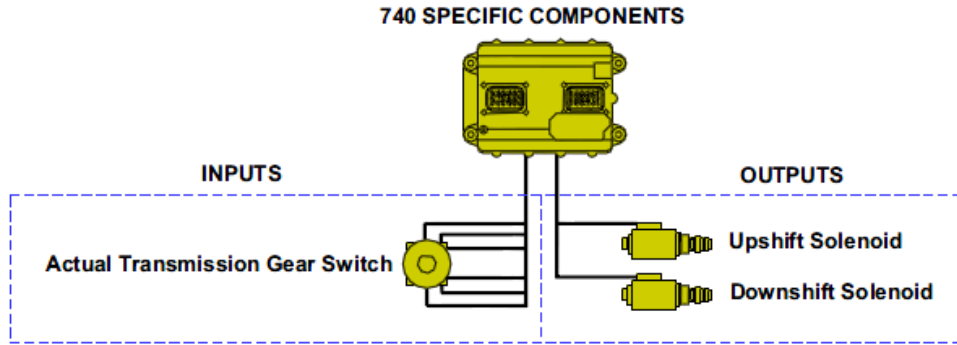


Figura 2.11. Comunicación de los sensores de la transmisión con la computadora de la transmisión del camión Caterpillar 740.

El ECM de transmisión también controla todas las funciones de elevación, la función de freno de estacionamiento, y otras funciones como se ve en la siguiente Fig. 2.12:

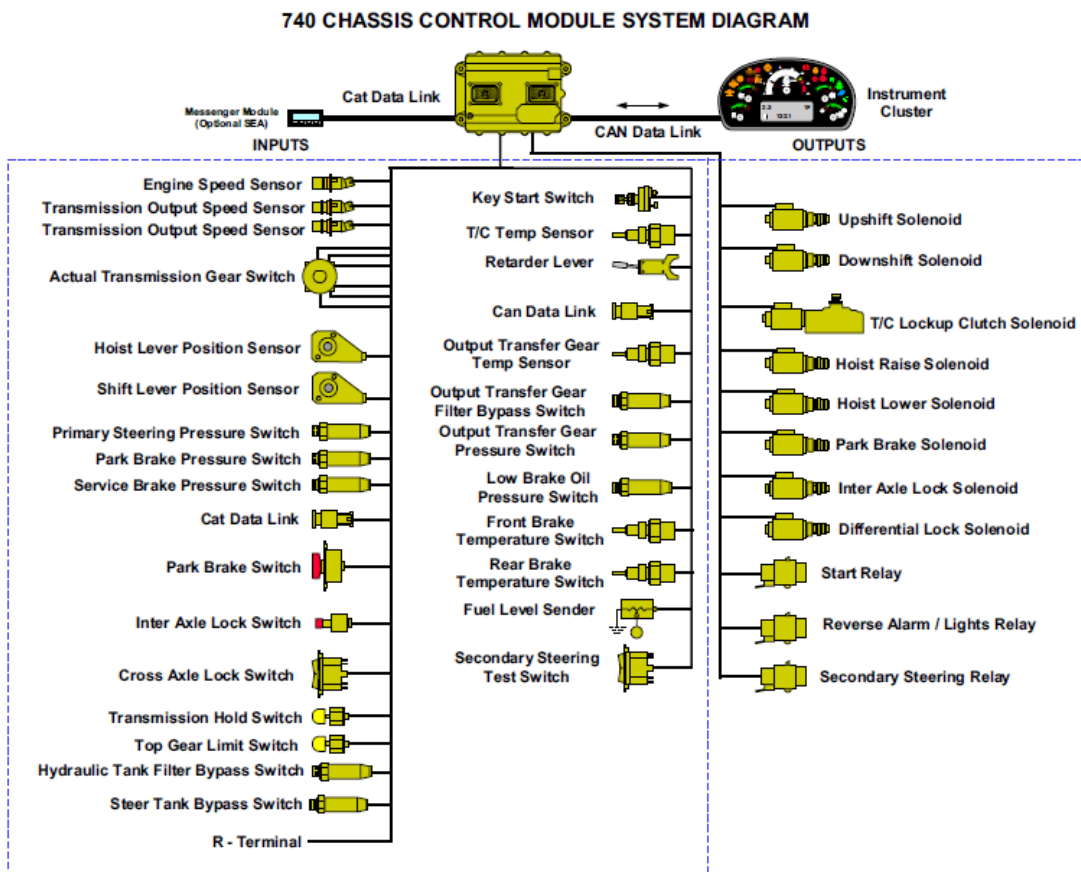


Figura 2.12. Comunicación de los sensores con la computadora del camión que permiten el control total del Caterpillar 740.

2.4. MODELAMIENTO DEL CAMIÓN MINERO DE DOS CUERPOS

Las ecuaciones del camión articulado que vamos a controlar, se han tomado como referencia del modelo matemático obtenido por Seon-Gon Kong and Bart Kosko [25], quienes realizan el diseño de un controlador difuso adaptativo para el estacionamiento de un camión articulado. En nuestro caso, el control será mediante un controlador neurodifuso.

El tráiler es controlado, cambiando la variable “ θ ”. Solo movimientos en retroceso son requeridos para este tipo de control. En cada paso, el tráiler se mueve hacia atrás con una constante de cambio en cada posición “ r ”.

Se asume que existe suficiente espacio entre el tráiler y el espacio de parqueo, la vertical “ y ” no es requerido como variable de entrada para este propósito. Más adelante tomaremos en cuenta el espacio de parqueo del camión, ya que se toma como modelo las instalaciones de la mina Cerro Verde para simular de manera real el comportamiento del camión.

De la Fig. 2.13 se pueden considerar las siguientes variables:

- (x, y): Coordenadas cartesianas del último punto del camión [0,100]
- Φ_t : Ángulo del tráiler con el eje horizontal [-90,270]
- Φ_c : Ángulo de la cabina con el eje horizontal [-90,270]
- Θ : Ángulo de la dirección del camión [-70,70]

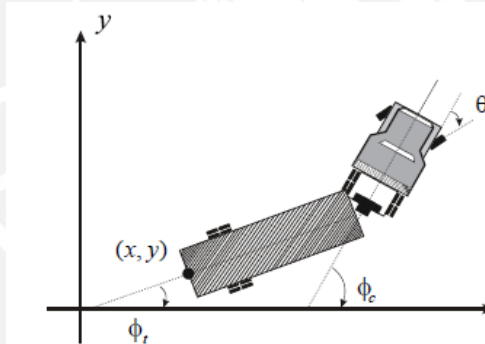


Figura 2.13. Variables de entrada y salida del camión de dos cuerpos para el diseño del controlador.

La descripción y condición de los ángulos de la cabina y tráiler del camión articulado para evitar el problema del jackknife, se muestran a continuación en la Fig. 2.14.

El ángulo de la cabina estará limitado entre los valores de -90° a 90° , mientras que el ángulo del tráiler podrá ser considerado dentro de los valores normales de 0° a 360° . Es importante considerar este detalle para evitar el impacto entre la cabina y el tráiler en los giros y desplazamiento del camión articulado [25].

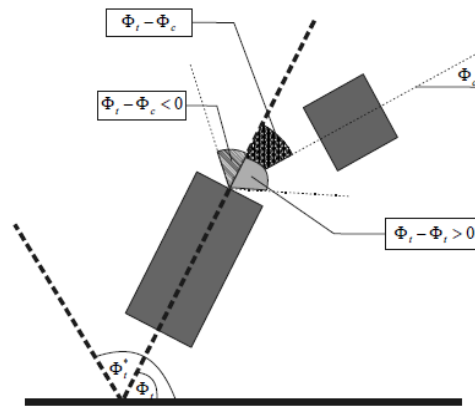


Figura 2.14. Ángulos entre la cabina y el tráiler del camión minero articulado.

A continuación implementamos un diagrama del camión minero de dos cuerpos, con las variables necesarias para la obtención del modelo matemático y para el diseño del controlador, tal como se muestra en la siguiente Fig. 2.15:

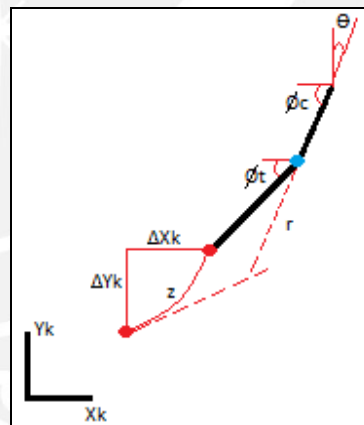


Figura 2.15. Variables de entrada y salida del camión minero de dos cuerpos.

La trayectoria del camión en un espacio de tiempo “r”, describe una circunferencia para la nueva posición de la base del tráiler, de la articulación entre tráiler - cabina, y la cabina del camión. En el diagrama mostrado anteriormente, la trayectoria para la nueva posición de la base del tráiler está representado por la variable “z”, en la cual se tienen las nuevas posiciones en “x” y “y” de la base del tráiler, así como los nuevos ángulos del tráiler y la cabina del camión.

De la trayectoria descrita por el camión, se pueden determinar las siguientes ecuaciones:

$$h = r \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)}) \tag{Ec. 2.1.}$$

$$a = r \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)})$$

$$b = L_c \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{c(k+1)})$$

$$h = L_c \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{c(k+1)}) \tag{Ec. 2.2.}$$

$$a + b = L_c + z$$

Ec.

2.3.

De los ángulos del tráiler en un periodo de simulación (Fig. 2.16):

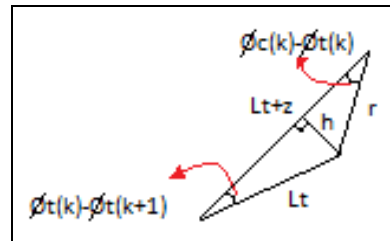


Figura 2.16. Ángulos del tráiler en un periodo de simulación.

Se puede determinar la siguiente ecuación:

$$\tan(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)}) = \frac{h}{a}$$

$$h = a \cdot \tan(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)})$$

Ec. 2.4.

$$r \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)}) + L_c \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k+1)}) = L_c + z$$

$$r \cdot \cos(\theta_c - \theta_t) + L_c = L_c + z$$

$$z = r \cdot \cos(\theta_c - \theta_t)$$

Ec. 2.5.

Entonces, a partir de la Ec. 2.5 se puede establecer las nuevas coordenadas del camión articulado, y derivando estas ecuaciones, se obtiene:

$$x_{k+1} = x_k + r \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)}) \cdot \cos(\theta_{c(k)})$$

Ec. 2.6.

$$y_{k+1} = y_k + r \cdot \cos(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)}) \cdot \sin(\theta_{c(k)})$$

Ec. 2.7.

Para determinar los ángulos del camión articulado, igualamos las Ec. 2.1 y Ec. 2.2.

$$h = L_c \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k+1)}) = r \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)})$$

$$L_c \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k+1)}) = r \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)})$$

$$\theta_{t(k+1)} - \theta_{t(k)} = -\frac{r}{L_c} \cdot \sin(\theta_{c(k)} - \theta_{t(k)})$$

Ec. 2.8.

Los ángulos de la cabina del camión en un periodo de tiempo, se pueden observar en la Fig. 2.17:

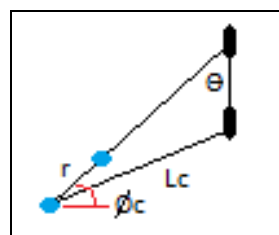


Figura 2.17. Ángulos de la cabina del camión en un periodo de simulación.

De la figura anterior, se puede obtener la siguiente ecuación:

$$\phi_c = -\frac{v}{L_c} \tan(\theta) \quad \text{Ec. 2.9.}$$

El modelo del tráiler, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\dot{x} = v \cos(\phi_c - \phi_t) \cos(\phi_t)$$

$$\dot{y} = v \cos(\phi_c - \phi_t) \sin(\phi_t)$$

$$\phi_c = -\frac{v}{L_c} \tan(\theta)$$

$$\phi_t = -\frac{v}{L_t} \sin(\phi_c - \phi_t)$$

$$\Rightarrow \phi_c - \phi_t = \phi_{ct}$$

$$\Rightarrow \phi_t = \phi_c - \phi_{ct}$$

Finalmente de las Ec. 2.6, Ec. 2.7, Ec. 2.8 y Ec. 2.9.

$$\dot{x} = v \cos(\phi_{ct}) \cos(\phi_c - \phi_{ct}) \quad \text{Ec. 2.10.}$$

$$\dot{y} = v \cos(\phi_{ct}) \sin(\phi_c - \phi_{ct}) \quad \text{Ec. 2.11.}$$

$$\phi_c = -\frac{v}{L_c} \tan(\theta) \quad \text{Ec. 2.12.}$$

$$\phi_{ct} = \frac{v}{L_t} \sin(\phi_{ct}) - \frac{v}{L_c} \tan(\theta) \quad \text{Ec. 2.13.}$$

Finalmente, simplificando las Ec. 2.10, Ec. 2.11, Ec. 2.12, y Ec. 2.13 del camión articulado, se puede expresar el modelo matemático de Seong-Gon y Bart Kosko [10], el cual es:

$$A = rx \cos(\theta)$$

$$B = Ax \cos(\phi_c[t] - \phi_t[t])$$

$$x[t+1] = x[t] - Bx \cos(\phi_c[t]) \quad \text{Ec. 2.14.}$$

$$y[t+1] = y[t] - Bx \sin(\phi_c[t]) \quad \text{Ec. 2.15.}$$

$$\phi_{ct}[t+1] = \phi_{ct}[t] + \arcsin\left(\frac{rx \sin(\theta)}{L_s + L_c}\right) \quad \text{Ec. 2.16.}$$

$$\phi_t[t+1] = \phi_t[t] - \arcsin\left(\frac{Ax \sin(\phi_c[t] - \phi_t[t])}{L_s}\right) \quad \text{Ec. 2.17.}$$

Dónde:

r: movimiento de las llantas en un paso de tiempo

Ls: longitud del tráiler, desde la base hasta el pivote

Lc: longitud de la cabina, desde el pivote hasta la parte superior de la cabina

La ilustración de las longitudes del camión articulado y el sentido de desplazamiento, se muestran en la siguiente Fig. 2.18:

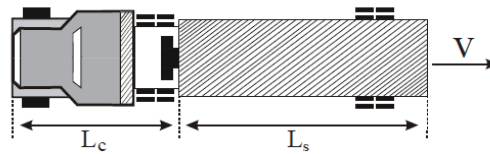


Figura 2.18. Longitudes e indicación de desplazamiento del camión minero articulado.

El diseño de una vía óptima para el movimiento hacia atrás de un camión y el remolque a través de una serie de obstáculos fijos, se encuentra entre los problemas más complicados de ingeniería. Factores tales como el tipo, la forma y velocidad de circulación, así como las limitaciones de tiempo para alcanzar el muelle de destino puede introducir complicación adicional en el problema.

Movimiento hacia atrás de un camión y el remolque en un muelle es un problema de control no lineal. Utilizando los métodos de control convencionales, se puede obtener un modelo matemático para el sistema y entonces la teoría de control no lineal se puede emplear para diseñar el controlador.

Una alternativa a esto es diseñar un controlador que simula el comportamiento humano. Este último se usa en el presente documento. Suponemos que un camión y la experiencia del conductor está disponible, además, podemos medir las diferentes posiciones del camión y el remolque y las acciones del controlador correspondiente para mover el camión y el remolque hacia atrás.

CAPÍTULO III: DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL PARA LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DE UN CAMIÓN MINERO DE DOS CUERPOS

3.1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas neurodifusos forman parte de una nueva tecnología de computación llamada computación flexible (soft-computing), la cual tiene su origen en la teoría de la Inteligencia Artificial. Ésta tecnología flexible engloba un conjunto de técnicas que tienen en común la robustez en el manejo de la información imprecisa e incierta que existe en los problemas relacionados con el mundo real.

Una de las características más importantes del sistema de control neurodifuso, es que permite una interacción entre la experiencia del operador de la máquina o proceso, y el entrenamiento del sistema de control en un software de diseño, el cual una vez validado, permitirá desenvolverse de manera óptima en condiciones normales y extremas de operación.

A continuación se diseñará un sistema de control neurodifuso para la conducción autónoma de un camión minero articulado Caterpillar 740, mediante el control de la velocidad y posición del vehículo. Posteriormente se entrenará el controlador diseñado, y se comparará los valores obtenidos en el transcurso de este proceso, con la finalidad de obtener las respuestas deseadas para el tránsito correcto del camión minero dentro de un campamento minero.

3.2. FUNDAMENTOS DEL SISTEMA DE CONTROL AVANZADO A UTILIZAR

3.2.1. LÓGICA DIFUSA

3.2.1.1. INTRODUCCIÓN

En los conjuntos clásicos algo está incluido completamente en él o no lo está en absoluto. Esta situación puede describirse asignando un 1 a todos los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los no incluidos. A la función que asigna estos valores los denominaremos función de inclusión o pertenencia (*membership function*). Veremos cómo los conjuntos difusos o borrosos permiten describir el grado de pertenencia o inclusión de un objeto (o el valor de una variable) al

concepto dado por la etiqueta que le da el nombre, asignando un número real entre 0 y 1 (así, por ejemplo una persona podrá ser medio baja o muy alta) [24]. A modo de ejemplo, para el conjunto de las personas se pueden definir subconjuntos borrosos en función de la edad (Fig. 3.1).

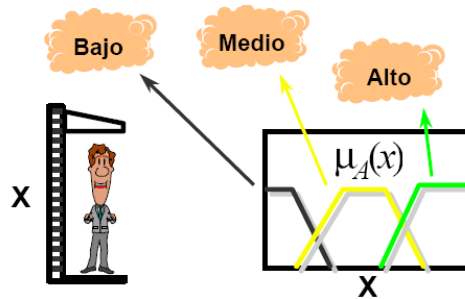


Figura 3.1. Ejemplo típico de conjunto borroso de estatura de personas.

A cualquier conjunto, se le asocia un conjunto de pertenencia. Es importante resaltar que el funcionamiento de las operaciones básicas de los conjuntos difusos (ver Tabla 3.1), las cuales coinciden con los correspondientes a los de la teoría clásica de conjuntos.

Tabla 3.1. Operaciones entre conjuntos difusos.

	Operación	Rango
Igualdad	$\mu_A(x) = \mu_B(x)$	$x \in U$
Unión	$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	$\forall x \in U$
Intersección	$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$	$\forall x \in U$
Complemento	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	$x \in U$
Norma	$\mu_{Norm(A)}(x) = \frac{\mu_A(x)}{\max[\mu_A(x)]}$	$x \in U$
Concentración	$\mu_{Conc(A)}(x) = (\mu_A(x))^2$	$x \in U$
Dilatación	$\mu_{Dilat(A)}(x) = (\mu_A(x))^{0,5}$	$x \in U$

Fuente: Cornelius T. Leondes, 1998. Fuzzy Logic and Expert Systems Applications.

La arquitectura típica de un control difuso lógico (FCL) se muestra en la Fig. 3.2. El cual se compone de cuatro principales componentes: un borrosificador, una regla difusa base, una máquina de inferencia (Inference Engine) y un desborrosificador (defuzzifier).

En la salida del desborrosificador no hay una acción de control para una planta, entonces el sistema es un sistema de decisión de lógica difusa. El borrosificador tiene el efecto de transformar los datos medidos alterados.

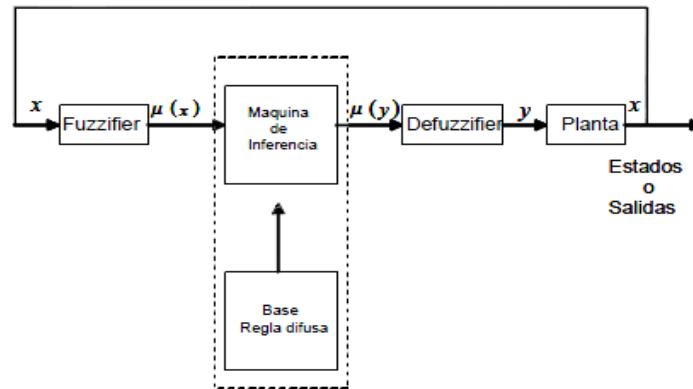


Figura 3.2. Arquitectura básica de un controlador de lógica difusa (FLC).

3.2.1.2. FUNCIONES DE INCLUSIÓN O PERTENENCIA DE CONJUNTOS BORROSOS

La función de inclusión o pertenencia (*membership function*) de un conjunto borroso consiste en un conjunto de pares ordenados $F = \{(u, u_F(u)) / u \in U\}$ si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de $u_F(u)$ indica el grado en que el valor u de la variable U está incluida en el concepto representado por la etiqueta F . Para la definición de estas funciones de pertenencia (Fig. 3.3) se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, por coincidir con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más frecuentes son la función de tipo trapezoidal, singleton, triangular, S, exponencial y tipo π .

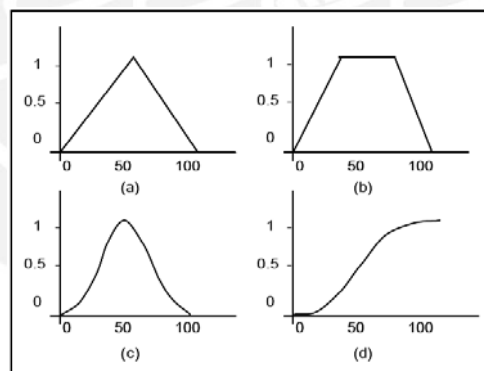


Figura 3.3. Algunas de las figuras más habituales: (a) Triangular, (b) Trapezoidal, (c) Gaussiana, (d) Sigmoidal.

3.2.1.3. BORROSIFICADOR

La inferencia borrosa también como en el caso de la lógica clásica, la borrosa se ocupa del razonamiento formal con proposiciones, pero a diferencia de ésta, los valores de las proposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso. De esta forma, los conjuntos borrosos también representan predicados en la lógica proposicional. El objeto de la lógica borrosa es proporcionar un soporte formal al razonamiento basado en el lenguaje natural, que se caracteriza por tratarse de un razonamiento de tipo aproximado, que hace uso de unas proposiciones que a su vez expresan información de carácter impreciso.

Se pueden utilizar diversas estrategias de borrosificación.

- **Borrosificador singleton:** Es el método de borrosificación más utilizado, principalmente en sistemas de control consiste en considerar los valores propios discretos como conjuntos borrosos. De otra manera para cada valor de entrada x se define un conjunto A' que lo soporta, con una función de pertenencia $\mu_{A'}(x')$, de modo que $\mu_{A'}(x) = 1$, ($x' = x$), y $\mu_{A'}(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que $x' \neq x$.
- **Borrosificador no singleton.** Este método de borrosificador utiliza una función exponencial del tipo siguiente:

$$\mu_{A'}(x') = a * \exp\left[-\left(\frac{x' - x}{\sigma}\right)\right] \quad \text{Ec. 3.1.}$$

La función con forma de campana está centrada en el valor x de entrada, dispone de una anchura σ y una amplitud a . El borrosificador (fuzzifier), mapea en conjunto de entradas difusa en la entrada del espacio y el desborrosificador (defuzzifier), mapea agregando la salida del conjunto difuso una simple punto en la cresta de la salida en el espacio.

3.2.1.4. REGLAS BORROSAS

La base de reglas se puede representar bien como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una memoria asociativa borrosa o FAM (*Fuzzy Associative Memory*). Las FAM son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas. Formalmente, una base de reglas borrosa es una colección de reglas $R^{(l)}$ con el formato:

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad \text{Ec. 3.2.}$$

Donde F_1^l y G^l son conjuntos borrosos en $U_i \subset R$ y $V \subset R$, respectivamente, y $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U_1 x \dots x U_n$ e $y \in V$ son variables lingüísticas.

Este formato de reglas se conoce como Borroso Puro o de Tipo Mandani, por ser quien primero las propuso en 1974, y el cual será desarrollado en el presente proyecto para realizar un controlador borroso directo sin optimización que estabiliza un sistema en torno a su punto de trabajo. Otro formato frecuente para las reglas es el llamado Sugeno [21].

3.2.1.5. DESBORROSIFICADOR

El Desborrosificador es la función que transforma un conjunto borroso en V , normalmente la salida de un dispositivo de inferencia borrosa, en un valor no borroso y $\in V$. Para esto se utilizan diversos métodos.

- **Desborrosificador por máximo:** Está definido como:

$$y = \arg \sup_{y \in V} (\mu_{B'}(y)) \quad \text{Ec. 3.3.}$$

Es decir, y es el punto de V en que $\mu_{G'}(y)$ alcanza su valor máximo, donde $\mu_{B'}(y)$ está definido según la ecuación

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B^1}(y) \dot{+} \dots \dot{+} \mu_{B^M}(y) \quad \text{Ec. 3.4.}$$

- **Desborrosificador por medida de centros:** De la manera siguiente

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}^l (\mu_{B'}(\bar{y}^l))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B'}(\bar{y}^l))} \quad \text{Ec. 3.5.}$$

Donde \bar{y}^l representa el centro del conjunto fuzzifier G^l (definido como el punto de V en el que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo), y $\mu_{B'}(y)$ está definido como:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in U} [\mu_{F^1 x \dots F^M x \rightarrow G^l}(x, y) * \mu_{A'}(x)] \quad \text{Ec. 3.6.}$$

- **Desborrosificador por centro de área:** Definido como:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M M^l (\mu_{B'}(\bar{y}^l))}{\sum_{l=1}^M A^l (\mu_{B'}(\bar{y}^l))} = \frac{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B'}(\bar{y}^l)^2 dy M^l (\mu_{B'}(\bar{y}^l))}{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B'}(\bar{y}^l) dy} \quad \text{Ec. 3.7.}$$

Donde M^l es el momento (entorno al eje y del universo de discurso de la salida V), de la función de inclusión del conjunto borroso G^l , A^l es el área, y $\mu_{B'}(y)$ está definida como la Ec. 3.6.

La estructura del borrosificador, reglas difusas y desborrosificador se muestra en la siguiente Fig. 3.4.

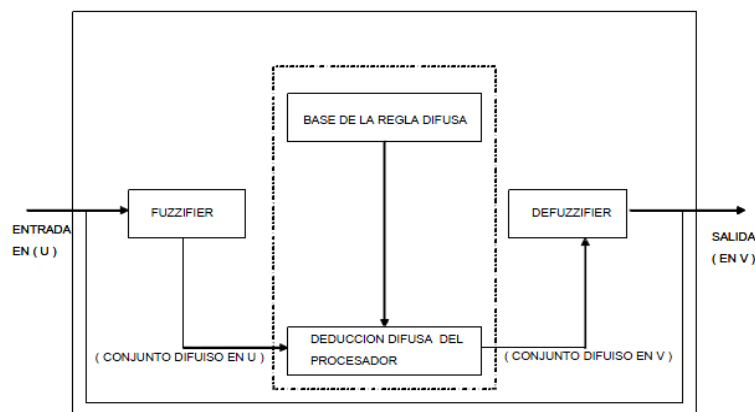


Figura 3.4. Estructura de un sistema de lógica difusa.

3.2.2. REDES NEURONALES

3.2.2.1. INTRODUCCIÓN

La neurona o elemento de procesamiento a su vez están constituidas de: vector de entrada, pesos, umbral, un operador matemático de suma y función de activación, Fig. 3.5.

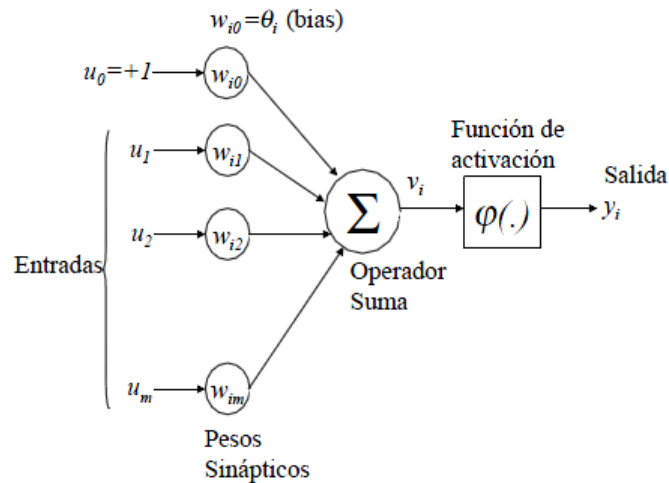


Figura 3.5. Modelo de una neurona.

El primer modelo matemático de una neurona biológica fue dado por Mc Culloch y Pitt y es el siguiente:

$$y = \varphi\left(\sum_{i=0}^n w_i u_i\right)$$

Ec. 3.8.

Dónde: $u_i, i = 1, 2, \dots, n$ son las entradas a la neurona, u_0 es la entrada al umbral e y es la salida de la neurona, los pesos sinápticos $w_i \in R, i = 1, 2, \dots, n$ cambian su valor según se requiera, $\varphi(\cdot)$ es la función de activación [11].

A continuación se da una descripción de cada uno de los elementos.

3.2.2.2. VECTOR DE ENTRADA

Es denotado por $U, U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ donde m es el número de entradas a la RN y a su vez la dimensión de U , este vector U son los datos con los que va operar la neurona, estas pueden ser dadas del medio ambiente o ser salidas de neuronas anteriores.

Cabe hacer notar que si estamos hablando de identificación de funciones o control de sistemas $U = U(k)$, donde $k \in K \subset R$; es la variable del tiempo, ya sea, según sea el caso, continuo o discreto, para esta situación las entradas generan una matriz $E \in R^{n \times m}$ donde m es la dimensión del vector de entradas y n es la dimensión del subespacio K , esta n generalmente se le conoce como número de iteraciones.

3.2.2.3. PESOS SINÁPTICOS

Al ser capturados los datos de entrada estos son propagados a través de la red, en el proceso de propagación cada componente u_i del vector de entrada U es multiplicada por una variable w_{ij} , la cual aumenta o atenúa la señal de entrada, a w_{ij} se le conoce como peso sináptico o simplemente peso, estos pesos no tienen el mismo valor siempre sino que se van modificando según se requiera para tener un mejor desempeño, posteriormente puede haber una convergencia y entonces estar fijos. Cuando se habla de que una red es capaz de aprender se refiere al hecho de poder modificar sus pesos w_{ij} , el conjunto de pesos genera una matriz W , es decir, w_{ij} es la ij -ésima componente de la matriz de pesos W .

3.2.2.4. EL UMBRAL

Denotado por θ_i es simplemente un peso más, pero a diferencia de estos el umbral tiene una entrada fija de -1. En el contexto en que usaremos las RN, el umbral nos sirve para trasladar el punto de equilibrio de la RN, del origen $\bar{x} = 0$ a un punto $\bar{x} \neq 0$.

3.2.2.5. OPERADOR DE SUMA

Realiza la adición de los productos $u_i * w_{ij}$, la operación aquí descrita constituyen una combinación lineal generando un campo local inducido (CLI) v_i , es decir:

3.2.2.6. LA FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN

Denotada por $\varphi(\cdot)$, define la salida de la neurona en términos del CLI v_i , es definida como una función para limitar la amplitud de la salida neuronal. Sin embargo en el sentido en el que estamos tratando las redes neuronales, la razón de ser de la función de activación es la de proporcionar un comportamiento no lineal a la red y así poder aproximar funciones de todo tipo, el teorema universal de aproximación de funciones da condiciones para determinar si una función Φ , es una función de activación. Las funciones cumplen las condiciones del teorema y son utilizadas como funciones de activación. Las tres primeras funciones son aptas para nuestro propósito, el escalón como veremos más adelante tiene una gran aplicación en reconocimiento de patrones. Estas funciones son:

- **Función Escalón:** Este tipo de función presenta una magnitud creciente definida en una variable de tiempo.
- **Función Saturación (Sat):** El factor de amplificación es generalmente tomado como 1, pero su valor puede variar según sea requerido.
- **Función Sigmoide (Sigm):** La función más común en la construcción de RN. Esta es definida como una función estrictamente creciente que exhibe un balance entre una conducta lineal y no lineal.
- **Función Tangente Hiperbólica (Tansig):** Al igual que la sigmoide es una de las principales funciones en la construcción de las RN.

Donde a es como antes, un parámetro. Las funciones escalón, saturación, sigmoide así como la tangente hiperbólica son mostradas en la Fig. 3.6.

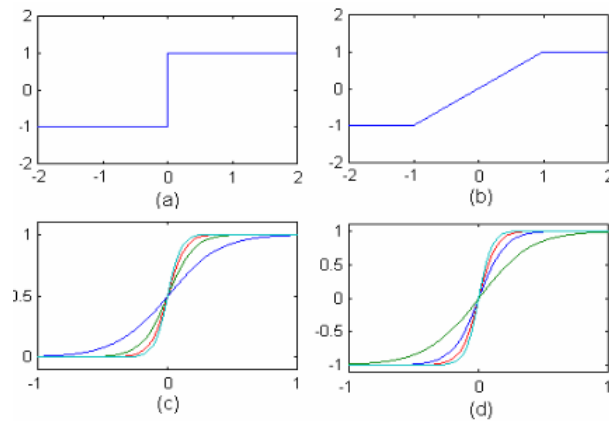


Figura 3.6. Funciones de activación de redes neuronales: a) Escalón, b) Saturación c) Sigmoide d) Tangente hiperbólica.

3.2.2.7. TOPOLOGÍA DE LA RED NEURONAL

Es la forma en que se organizan las neuronas en una RN y existen dos tipos fundamentales Redes Estáticas (Feed Forward), RNFF y Redes Recurrentes (RNR) o Redes Dinámicas. En las RNFF, todas las señales neuronales se propagan hacia adelante. No existen conexiones hacia atrás y normalmente tampoco autorrecurrentes, ni laterales y son especialmente útiles en tareas de reconocimiento o clasificación de patrones. Las RNR son aquellas donde la información circula tanto hacia adelante como hacia atrás durante el funcionamiento de la red. Para que esto sea posible, existen conexiones hacia adelante y retroalimentaciones. En este trabajo de tesis utilizaremos una red híbrida que posee las dos características pero asociada principalmente con las RNR.

3.2.3. CONTROL NEURODIFUSO

3.2.3.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los más importantes conceptos de propiedades de sistemas dinámicos es la estabilidad, sin embargo es difícil analizar la estabilidad de sistemas no lineales nos gustaría que los sistemas difusos y las RN, como a continuación se dice que el análisis de estabilidad de sistemas de controles difusos, el control difuso ha sido exitosamente aplicado en muchas aplicaciones industriales prácticas, varias metodologías existentes para el análisis de estabilidad para sistemas de control difuso fueron analizados de la siguiente manera:

$$R^i : \text{Si } x \text{ es } A_i \text{ \& } y \text{ es } B_i, \text{ entonces } z = a_0^i + a_1^i x + \dots + a_n^i y \quad \text{Ec. 3.9.}$$

Donde “ x ” y “ y ” son variables lingüísticas estas representan la distancia y orientación en relación a las cotas de la orientación, z es el próximo que sigue el ángulo decidido por la regla de control, y a_0^i, a_n^i son los parámetros de entrada en

el proceso de la identificación. La identificación se hace optimizando un mínimo cuadrados desempeñando el índice como un método de regresión lineal con pesos. Sumando el modelado de una acción de operador, este método es también usando el modelo (identificación) controlando el proceso recordando sus datos de entradas y salidas, el cual incluye parámetros de aprendizaje como la estructura de aprendizaje [8]. Estos son llamados reglas de control lingüísticas aproximándose al modelado difuso o identificación difusa. El modelo Takagi y Sugeno tiene la siguiente forma:

$$L^i : \text{Si } x(k) \text{ es } A_1^i \ \& \dots \ \& \ x(k-n+1) \text{ es } A_n^i \\ \& \ u(k) \text{ es } B_1^i \ \& \dots \ \& \ u(k-m+1) \text{ es } B_m^i \\ \text{Entonces } x^i(k+1) = a_0^i + a_1^i x(k) + \dots + a_n^i x(k-n+1) \\ + b_1^i u(k) + \dots + b_m^i u(k-m+1) \quad \text{Ec. 3.10.}$$

Donde $x(\cdot)$ es la variable de estado, $x_i(k+1)$ es la salida de la regla L^i , $u(\cdot)$ es la variable de entrada.

3.2.3.2. TAXONOMÍA DE LOS SISTEMAS NEURODIFUSOS

El sistema neurodifuso consiste de un sistema difuso tradicional (Fig. 3.7) excepto que cada etapa, puede ser representada por una capa de neuronas a las que se puede proveer capacidades de aprendizaje de Redes Neuronales para optimizar el conocimiento del sistema.



Figura 3.7. Diagrama de bloques de un sistema neurodifuso.

Los sistemas neurodifusos combinan la capacidad de aprendizaje de las RNAs con el poder de interpretación lingüística de los sistemas de inferencia difusos, obteniéndose los siguientes resultados:

- Adaptabilidad de los algoritmos de aprendizaje desarrollados para redes neuronales.
- Posibilidad de promover la integración de conocimiento (implícito que puede ser adquirido a través del aprendizaje, y explícito que puede ser explicado y entendido).
- La posibilidad de extraer conocimiento para una base de reglas difusas a partir de un conjunto de datos.

Existen sistemas de desarrollo que han logrado unir la Lógica Difusa con las Redes Neuronales, por ejemplo se tiene:

- **ANFIS:** Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, es un método que permite sintonizar o crear la base de reglas de un sistema difuso, utilizando el algoritmo de entrenamiento de retropropagación a partir de la recopilación de datos de un proceso. Su arquitectura es funcionalmente equivalente a una base de reglas tipo Sugeno.

- **FSOM:** Fuzzy Self-Organizing Maps, consiste en un sistema difuso optimizado a partir de la técnica de los mapas auto-organizados de Kohonen.
- **NEFCLASS:** El algoritmo NEFCLASS está basado en la estructura del perceptrón multicapa cuyos pesos son modelados por conjuntos difusos. Así, se preserva la estructura de una red neuronal, pero se permite la interpretación del sistema resultante por el sistema difuso asociado, es decir, la RNA deja de ser una “caja negra”.

La división de los sistemas neurodifusos fué propuesta por Nauck en su paper. Las razones para usar tal taxonomía es que muchas de las aproximaciones NF implementadas hasta hoy, pueden ser enmarcadas dentro de estas divisiones propuestas que se basan en las diferentes combinaciones de las RNA y los Sistemas Difusos:

- **Modelos Concurrentes:** Cuando la RNA y el Sistema Difuso trabajan juntos pero sin interactuar el uno en el otro, es decir, ninguno determina las características del otro.
- **Modelos Cooperativos:** Cuando la RNA se usa para determinar los parámetros de funcionamiento del Sistema Difuso. En estos modelos, se distinguen dos fases: la de Entrenamiento y la de Funcionamiento. En la primera, la RNA interactúa con el Sistema Difuso determinando los parámetros del mismo, mientras en la segunda, la RNA desaparece dejando sólo el Sistema Difuso.
- **Modelos Híbridos:** En esta aproximación, los sistemas difusos y de RNA, trabajan juntos en una arquitectura homogénea que puede ser interpretada como una RNA con parámetros difusos o como un Sistema Difuso con parámetros o funcionamiento distribuidos. Las ANFIS y el NEFCON.

La Fig. 3.8 representa un prototipo de sistema de cooperación de ambas tecnologías (redes neuronales y lógica difusa). Tiene como propósito controlar una aplicación utilizando la capacidad de aprendizaje de las redes neuronales artificiales y la comprensión clara de los modelos lógicos difusos.

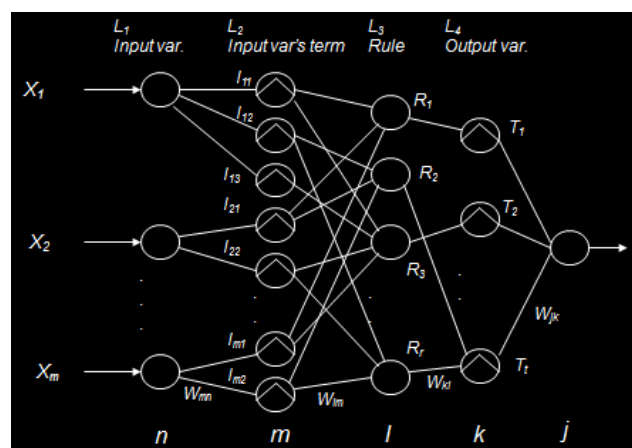


Figura 3.8. Aprendizaje de las redes neuronales artificiales.

El aprendizaje de esta estructura (Fig. 3.9) del controlador se proporciona a través del peso sináptico que se le otorgue en las conexiones entre las capas 3 y 4, y los parámetros en los nodos de las capas 2 y 4. A continuación se da una descripción de la función que realiza cada capa en la arquitectura mostrada (en donde la salida del *i*-ésimo nodo en la capa *k* se denota como O_i^k). Se hace notar que los dos sistemas son equivalentes.

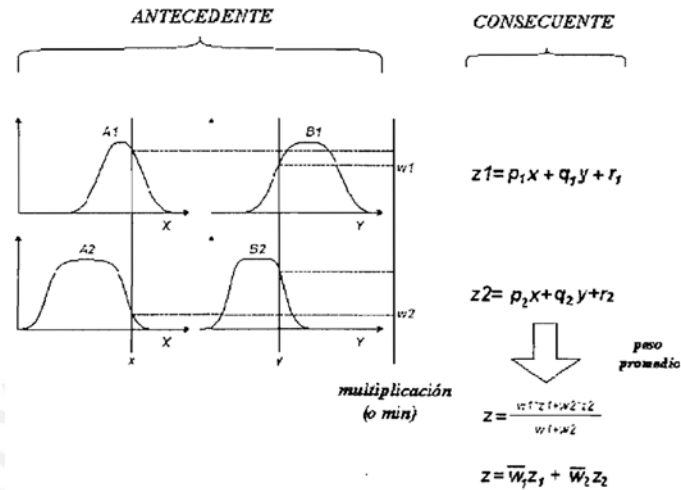


Figura 3.9. Estructura de operación de las redes neuronales.

En la Fig. 3.10 cada pequeño rectángulo representa una neurona.

En la capa de fusificación, cada función de pertenencia de entrada del antecedente de una regla difusa representa una neurona. Los parámetros de estas neuronas, como los vértices de las funciones de pertenencia, pueden ser entrenados para determinar la forma final y la ubicación de las funciones de pertenencia.

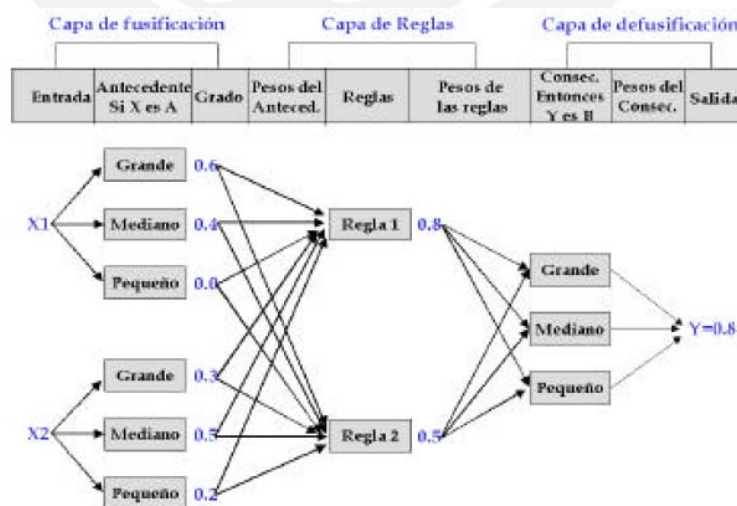


Figura 3.10. Estructura de un sistema neurodifuso.

3.2.3.3. AGRUPAMIENTO DE LOS SISTEMAS NEURODIFUSOS

El agrupamiento numérico es la base de muchas clasificaciones y de algoritmos para el modelaje de sistemas [8]. El propósito del agrupamiento es identificar conjuntos de datos de un conjunto mayor para obtener una concisa representación del comportamiento del sistema. Un problema con el agrupamiento es la partición del conjunto dado, en grupos de tal manera que los datos en un grupo sean lo más similares entre ellos, que con datos de otros grupos.

De esta manera, el objeto principal en el proceso de agrupamiento es encontrar la organización de datos dentro de grupos "sensibles", los cuales permitan descubrir similitudes y diferencias, así como deducir conclusiones acerca de estos.

- **Partición por Rejilla:** En este tipo de aproximación utiliza las funciones de membresía previamente definidas para las variables de entrada del antecedente, las mismas que son utilizadas para el agrupamiento de los datos en el espacio de entrada. El agrupamiento se lo realiza utilizando una combinación lógica de las funciones de membresía del antecedente.

El principal problema de este método es que el número de reglas crece rápidamente. El número de reglas N que son necesaria para cubrir completamente el dominio del antecedente está dado por la expresión:

$$N = \prod_{i=1}^r R_i$$

Ec. 3.11.

Donde r es la dimensión del espacio de entrada y R_i es el número de etiquetas lingüísticas de la i -ésima variable del antecedente. La dimensión del espacio res una función del número de entradas y del orden del sistema difuso.

La aplicación práctica de la partición por rejilla está restringida a pequeños sistemas (dos o tres entradas) ya que el número de reglas es muy grande para sistemas con mayor número de entradas

- **Agrupamiento Substractivo:** (Sub-Clustering) Este método considera a cada punto de dato como un potencial centro del grupo. Una medida del potencial de cada punto de dato es definido como una función de las distancias Euclidianas a todos los otros puntos de datos de entrada.

$$D(i) = \sum_{j=1}^P \exp\left(-\delta \|q(i) - q(j)\|^2\right) \quad i = 1, \dots, D$$

Ec. 3.12.

Donde P representa et número de pares de datos de entrenamiento, $q(i)$ es el vector de entrada y δ es el parámetro de diseño. Obviamente el potencial de un punto de dato es mayor cuando éste se encuentra rodeado por una vecindad de datos. A continuación se indican los pasos que se siguen en este algoritmo:

- Para $i = 1, \dots, P$ se calcula los valores de potencial $D(i)$.
- Se define $J = 1$ y se selecciona el punto de dato con ei mayor valor de potencial como el primer centro del grupo. Siendo $r^*(1)$ la localización del punto y $D^*(1)$ su potencial.
- Se revisa e! potencial de cada punto de datos $i = 1, \dots, P$ por la fórmula:

$$D(i) = D(i) - D^*(1) \exp\left(-\beta \|q(i) - q^*(1)\|^2\right) \quad \text{Ec. 3.13.}$$

- Se define $J = J+1$ y se selecciona el punto de dato con el mayor potencial como el siguiente centro. Siendo $r^*(J)$ la localización del nuevo centro y $D^*(J)$ su potencial.
- Se revisa el potencial para cada punto de dato, $i = 1, \dots, D$ por la fórmula:

$$D(i) = D(i) - D^*(J) \exp\left(-\beta \|q(i) - q^*(J)\|^2\right) \quad \text{Ec. 3.14.}$$

- Si la inecuación $D^*(J) < \varepsilon D^*(1)$ es verdadera se detiene el algoritmo y se regresa al paso 4.

Los parámetros δ y β pueden ser considerados como radios, usando las siguientes igualdades:

$$\delta = \frac{4}{d_\delta^2}, \quad \beta = \frac{4}{d_\beta^2} \quad \text{Ec. 3.15.}$$

Cada uno de los radios anteriores define una vecindad en el espacio de entrada. Se debe mencionar que el valor de p debe ser menor que el de δ . La selección de ε es muy importante para producir la estructura del sistema. Si ε es seleccionado muy pequeño, un gran número de centros de grupo serán generados. De lo contrario, un valor grande de ε generará una estructura pequeña para el sistema.

De los dos métodos anteriormente detallados, el segundo método requiere una mayor capacidad computacional, lo que no ocurre con el primero. Sin embargo si se tiene un sistema con muchas entradas y varias funciones de membresía por entrada, trabajar con el primer método sería imposible por el excesivo número de grupos (reglas difusas), lo que no ocurre con el segundo, que es independiente del número de entradas y de sus funciones de membresía, únicamente toma en cuenta el vector de entrada y los parámetros δ , β y ε .

Por lo anteriormente descrito y considerando el número de entradas a los sistemas (máximo dos) que se está modelando en este trabajo, se utiliza en el entrenamiento de los modelos ANFIS la partición por rejilla.

3.3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.3.1. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE CONTROL NEURODIFUSO

Para controlar la trayectoria del camión minero Caterpillar 740, consideramos primero la identificación del entorno de la mina Cerro Verde en donde nuestro sistema de control va a interactuar como prueba y permitirá obtener las respuestas deseadas del diseño, así como realizar ajustes al controlador.

3.3.2. ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR NEURODIFUSO PARA EL CONTROL DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DEL CAMIÓN MINERO DE DOS CUERPOS

El sistema neurodifuso puede ser visto como una red de tres capas. Los nodos de la red se conectan en cascada conectados por en capas. Un diagrama del sistema neurodifuso se muestra en la Fig. 3.11. La primera capa o capa de entrada comprende varios nodos, cada uno consistente en una neurona de base gaussiana.

Por lo tanto, se podría decir que la capa de salida lleva a cabo el proceso de defuzificación, proporcionando las salidas del sistema neurodifuso.

En resumen, la estructura del sistema neurodifuso podría ser visto como una red de base radial típico, donde una capa adicional ha sido insertada entre la radial capa de base (la capa de entrada) y la capa lineal (la capa de salida). Las neuronas de esta capa adicional indican los grados de pertenencia que corresponden a las reglas, siendo N_2 el número total de reglas difusas. Una vez que estos cálculos se han llevado a cabo, la capa de salida se aplica la defuzificación; con el fin de obtener los valores numéricos de las salidas del sistema.

Hay algunos parámetros en el sistema neurodifuso que determinan la relación entre las entradas y las salidas. En este caso, el comportamiento del sistema neurodifuso depende del valor de los siguientes parámetros: los centros de la función de pertenencia, las anchuras de las funciones de pertenencia y los valores de salida estimados.

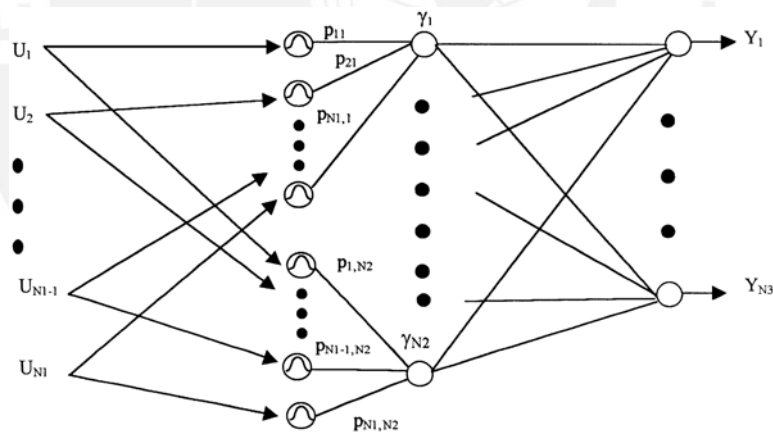


Figura 3.11. Aprendizaje de las Redes Neuronales Artificiales.

El algoritmo de aprendizaje se puede dividir en tres fases:

- **La primera:** Esta fase consiste en obtener valores convenientes para los centros de función de pertenencia y valores estimados de salida.
- **La segunda:** Después de la asignación realizada al final de la primera fase, cada nodo en la capa oculta se asocia con cada regla difusa generada por el sistema neurodifuso.
- **La tercera:** Esta última fase se centra en el ajuste de los parámetros del sistema neurodifuso, y la mejora de los valores dados por las fases anteriores.

Es importante mencionar que en los diseños presentados posteriormente, no se está considerando el aprendizaje del controlador.

3.3.3. IDENTIFICACIÓN DEL ENTORNO DE INTERACCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL PARA EL CAMIÓN MINERO DE DOS CUERPOS

La trayectoria a recorrer por el camión minero será otorgada por medio de un sistema GPS, motivo por el cual para el diseño de esta tesis se está considerando un mapeo satelital de la minera Cerro Verde (Fig. 3.12), en la cual se colocarán hitos a ciertas distancias para que el vehículo se desplace sin problemas.

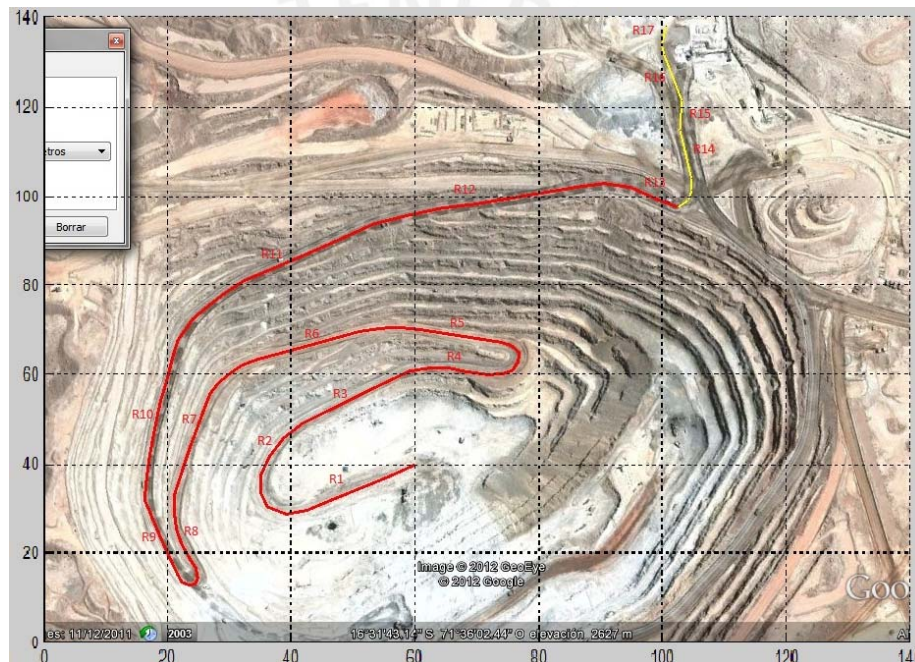


Figura 3.12. Desplazamiento del camión minero de dos cuerpos en la mina Cerro Verde.

Así mismo la interacción del sistema de control diseñado, otorgará un desempeño del camión en las distintas áreas de la mina Cerro Verde (ver de la Fig. 3.13 a la Fig. 3.21), por tal motivo es que se realiza una medición satelital de las distancias de parqueo que se disponen en dicho establecimiento, para poder cumplir con los objetivos del diseño del controlador.

Es importante mencionar este punto, ya que estas medidas se toman como referencias y como puntos de comparación, al obtener los resultados del controlador. Con esta comparación, nos permitirá visualizar si los resultados obtenidos son satisfactorios. Por ello es que se plasman a continuación las gráficas de los espacios máximos que se disponen en cada área en la cual va a interactuar el camión articulado:

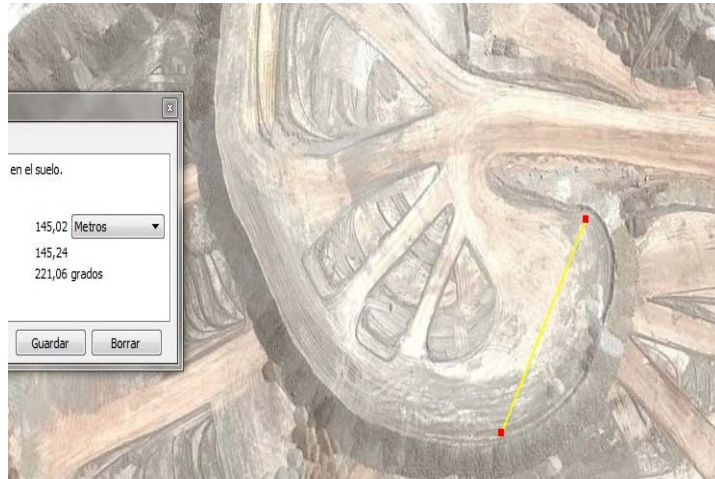


Figura 3.13. Espacio de parqueo en los botaderos de la mina SMCV (146 metros).

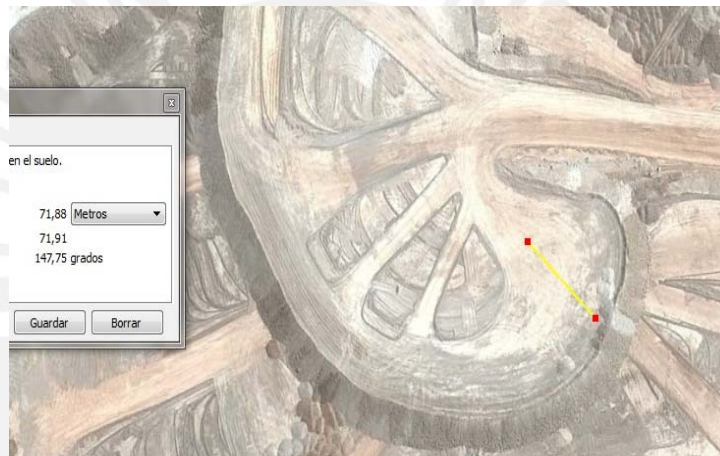


Figura 3.14. Espacio de parqueo en los botaderos de la mina SMCV (72 metros).

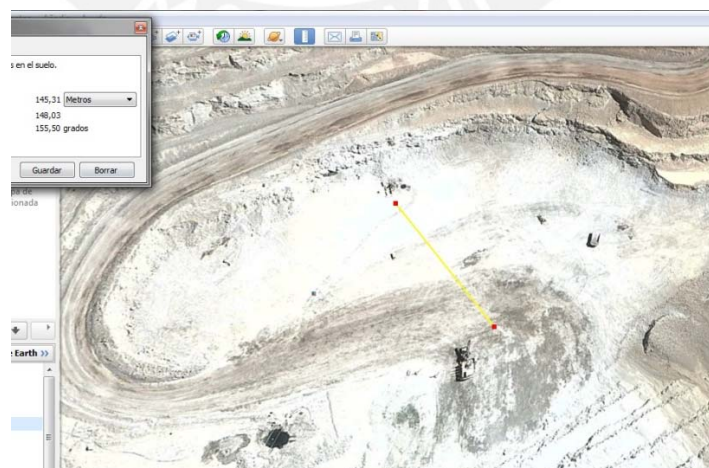


Figura 3.15. Espacio de parqueo en la zona de carga de material de la mina SMCV (145 metros).

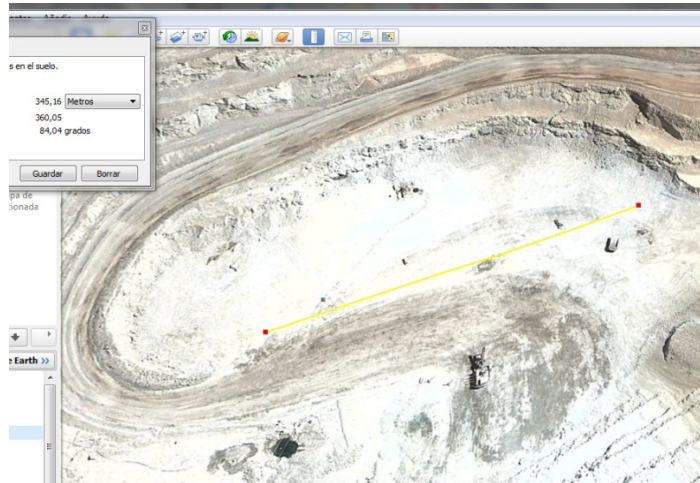


Figura 3.16. Espacio de parqueo en el área de carga de material de la mina SMCV (345 metros).



Figura 3.17. Espacio de parqueo en las Chancadoras de la mina SMCV (76 metros).



Figura 3.18. Espacio de parqueo en las Chancadoras de la mina SMCV (35 metros)



Figura 3.19. Espacio de parqueo en el área de Mantenimiento de la mina SMCV (57 metros).



Figura 3.20. Espacio de parqueo en el área de Mantenimiento de la mina SMCV (52 metros).



Figura 3.21. Vista General de la minera Cerro Verde.

3.3.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO Y NEURODIFUSO

3.3.4.1. INTRODUCCIÓN

Ahora se procede al diseño de dos tipos de controladores, control difuso y control neurodifuso; con el objetivo de comparar ambas respuestas y concluir el tipo de controlador que mejor se adapta y responde a nuestra planta.

Es importante mencionar que en el proceso de diseño de los sistemas de control, consideramos 2 tipos de controladores: el primer controlador "A" se encargará de interactuar con la planta cuando el camión minero se desplace de una área a otra (línea recta y curvas), y el segundo controlador "B" se encargará de interactuar con la planta cuando el camión minero necesite estacionarse en los puntos de carga de material, descarga de material o mantenimiento (Fig. 3.22).

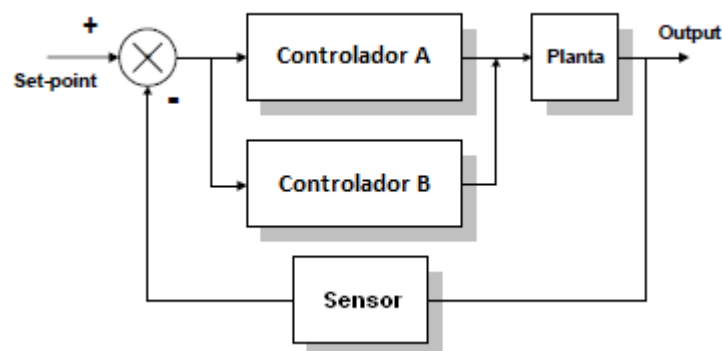


Figura 3.22. Comunicación de los controladores diseñados con la planta.

Ambos controladores "A" y "B" interactúan con la mina bajo las mismas consideraciones, es decir con obstáculos en ruta, o sin obstáculos en ruta. La configuración de los controladores en el programa Matlab (simulink), se puede observar en la siguiente Fig. 3.23.

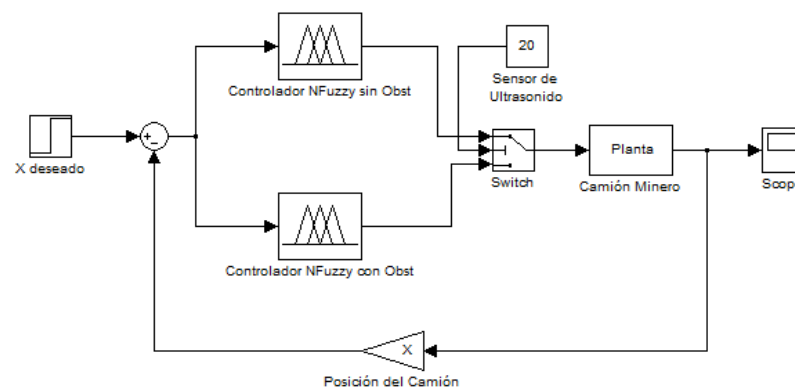


Figura 3.23. Comunicación de los controladores diseñados en el software Matlab (Simulink).

Para ello es que consideramos el diseño de un controlador difuso y neurodifuso para demostrar el mejor comportamiento de nuestra planta en el entorno de trabajo presentado.

3.3.4.2. CONTROL DIFUSO SIN OBSTÁCULOS EN RUTA

Este tipo de controlador (Fig. 3.24) tiene como variables de entrada a: X (posición del camión), angT (ángulo del tráiler) y angCT (ángulo entre la cabina y el tráiler); y como variables de salida a: theta (ángulo del timón del camión).

Tener en cuenta que el camión se desplazará a velocidad constante (35Km/h), y el controlador difuso permitirá el control del camión por las rutas de la mina (rectas y curvas) a excepción de los puntos de carga de material, descarga de material y el área de mantenimiento.

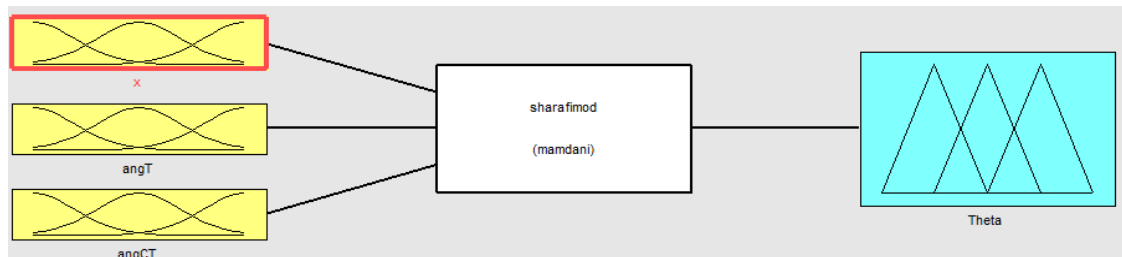


Figura 3.24. Controlador difuso sin obstáculos en ruta.

La variable de entrada “x” (Fig. 3.25) al controlador difuso, está definida por:

- LE - Left [0 0 10 35], LC - Left Center [30 40 50], CE - Center [45 50 55], RC - Right Center [50 60 70], RI - Right [65 90 100 100].

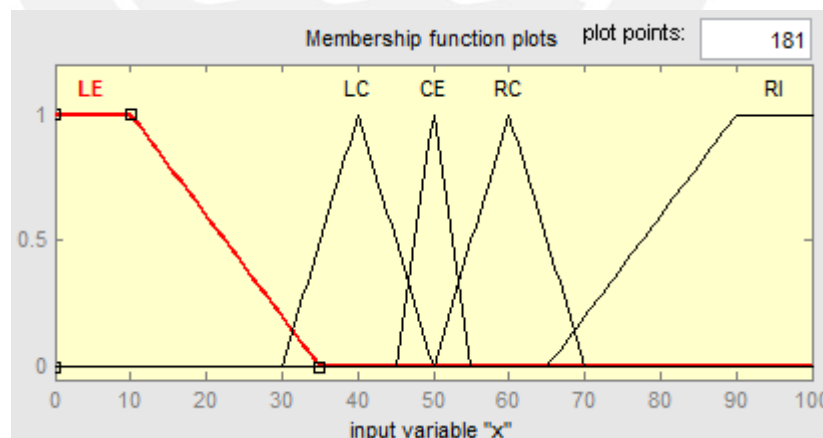


Figura 3.25. Entrada “X” al controlador difuso.

La variable de entrada “angT” (Fig. 3.26) al controlador difuso, está definida por:

- RB – Right Below [-100 -45 10], RU – Right Upper [-10 25 60], RV – Right Vertical [40 65 90], VE - Vertical [70 90 110], LV – Left Vertical [90 115 140], LU – Left Upper [120 155 190], LB – Left Below [170 225 280].

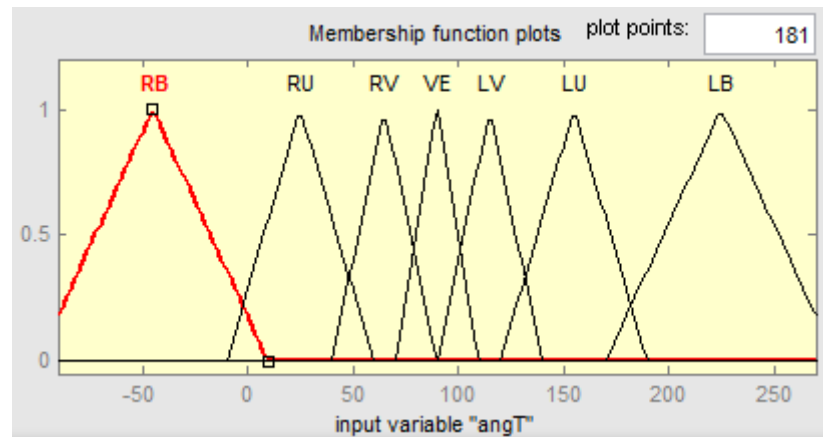


Figura 3.26. Entrada “angT” (ángulo del tráiler) al controlador difuso.

La variable de entrada “angCT” (Fig. 3.27) al controlador difuso, está definida por:

- NE – Negative [-90 -90 -70 -4], ZR – Zero [-8 0 8], PO – Positive [4 70 90 90].

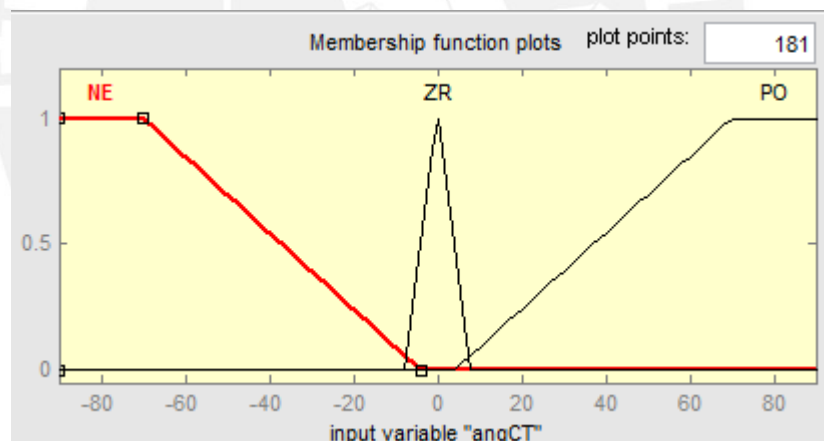


Figura 3.27. Entrada “angCT” (ángulo entre la cabina y el tráiler) al controlador difuso.

La variable de salida “Theta” (Fig. 3.28) del controlador difuso, está definida por:

- NB – Negative Big [-70 -70 -70 -35], NM – Negative Medium [-58.33 -35 -11.67], NS – Negative Small [-28 -14 0], ZE - Zero [-11.67 0 11.67], PS – Positive Small [0 14 28], PM – Positive Medium [11.67 35 58.33], PB – Positive Big [35 70 70 70].

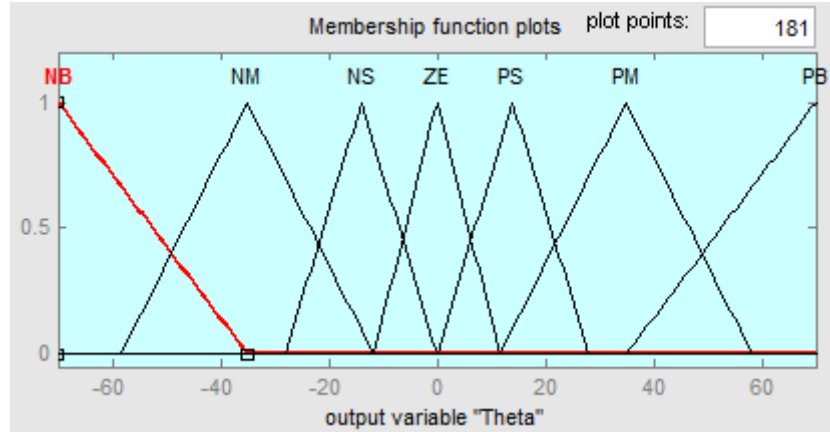


Figura 3.28. Salida “Theta” (ángulo del timón del tráiler) al controlador difuso.

Las superficies de control del controlador difuso, en base a las reglas de inferencia, se muestran a continuación (ver de la Fig. 3.29 a la Fig. 3.31):

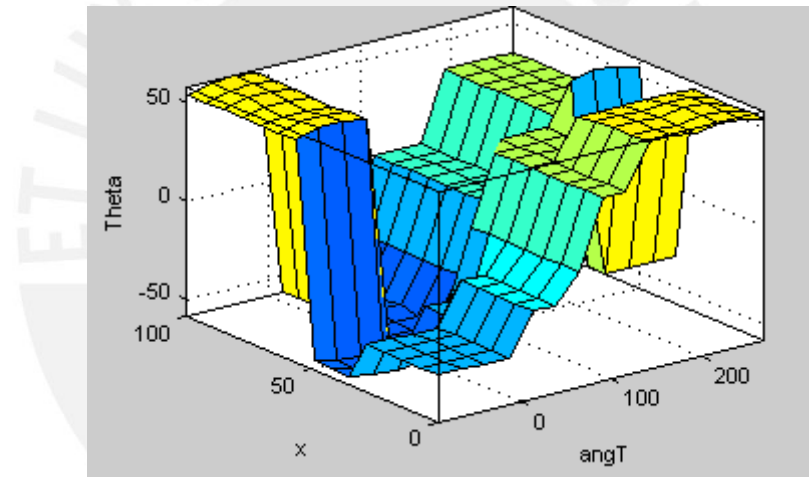


Figura 3.29. Superficie de control para las variables Theta, X y angT.

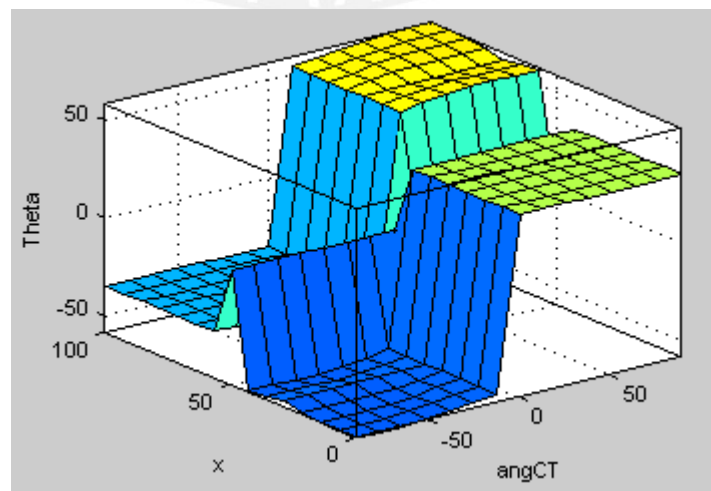


Figura 3.30. Superficie de control para las variables Theta, X y angCT.

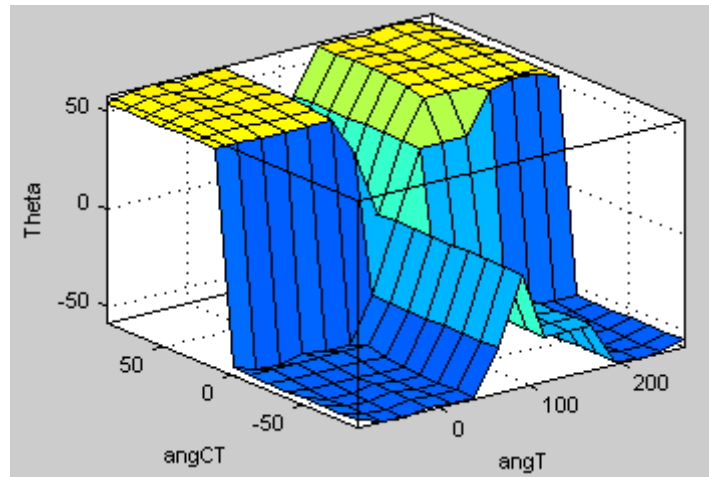


Figura 3.31. Superficie de control para las variables Theta, angCT y angT.

La base de reglas para este tipo de controlador está dado de la Tabla 3.2 a la Tabla 3.6, y por:

- Cuando la variable de entrada “x=LE”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.2. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=LE.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NM	NM	PB
RU	NS	NS	PS
RV	NS	ZE	PS
VE	NB	PM	PM
LV	NB	PM	PB
LU	NB	PB	PB
LB	NB	PB	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=LC”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.3. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=LC.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	NB	PB
RU	NS	NM	PS
RV	NS	ZE	PS
VE	NB	PM	PM
LV	NB	PM	PB
LU	NB	PM	PB
LB	NB	NM	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=CE”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.4. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=CE.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	NB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NM	NM	PM
VE	ZE	ZE	ZE
LV	NM	PM	PM
LU	NM	PM	PB
LB	NB	PB	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=RC”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.5. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=RC.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	PB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NB	NB	PB
VE	NM	NM	PB
LV	NM	ZE	PB
LU	NM	ZE	PB
LB	NB	PM	PM

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=RI”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.6. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=RI.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	PB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NB	NB	PB
VE	NM	NM	PB
LV	NS	ZE	PS
LU	NS	ZE	PS
LB	NM	PM	PB

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4.3. CONTROL DIFUSO CON OBSTÁCULOS EN RUTA

Este tipo de controlador (Fig. 3.32) tiene como variables de entrada a: distobjeto (distancia del obstáculo al camión), angobjeto (ángulo del obstáculo con respecto al camión) y velobjeto (velocidad del obstáculo); y como variables de salida a: angcamion (ángulo del timón del camión) y velcamion (velocidad del camión).

Tener en cuenta que el camión se desplazará a velocidad variable según sea la distancia que se encuentre del obstáculo, y el controlador difuso permitirá el control del camión por las rutas de la mina (rectas y curvas) y en los puntos de estacionamiento (carga de material, descarga de material y el área de mantenimiento)

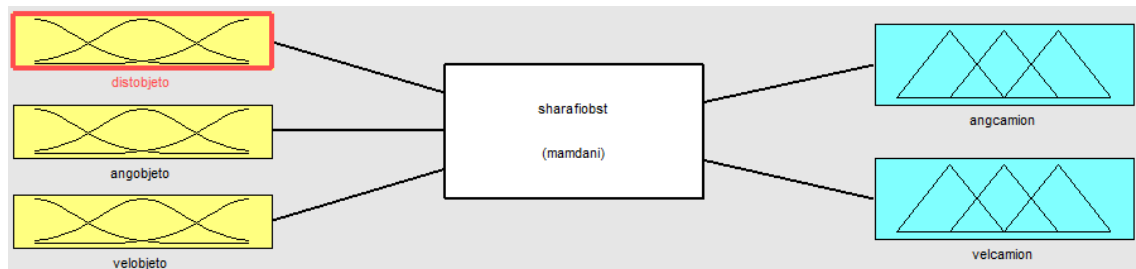


Figura 3.32. Controlador difuso con obstáculos en ruta.

La variable de entrada “distobjeto” (Fig. 3.33) al controlador difuso, está definida:

- Cerca [0 0 7.5 15], Medio [7.5 15 22.5], Lejos [15 22.5 30 30].

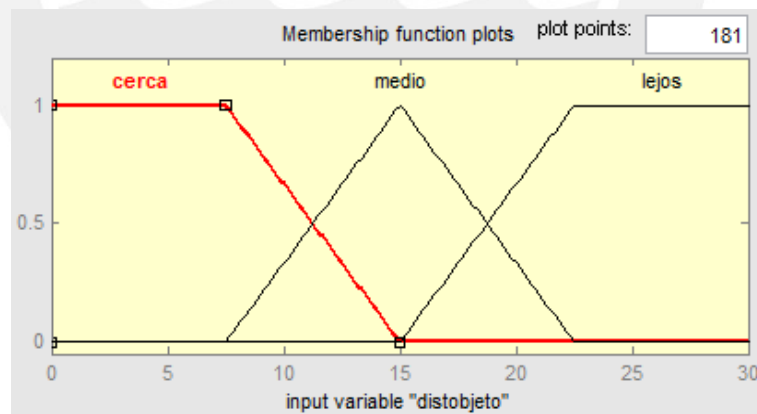


Figura 3.33. Entrada “distobjeto” (distancia entre el objeto y el camión) al controlador difuso.

La variable de entrada “angobjeto” (Fig. 3.34) al controlador difuso, está definida:

- Dadelante – Derecha Adelante [-200 -200 -125 -100], Der – Derecha [-125 -100 -75 -50], Dattras – Derecha Atrás [-75 -50 -25 0], Atras [-25 0 25], ladelante – Izquierda Atras [0 25 50 75], Izq – Izquierda [50 75 100 125], ladelante – Izquierda Adelante [100 125 200 200].

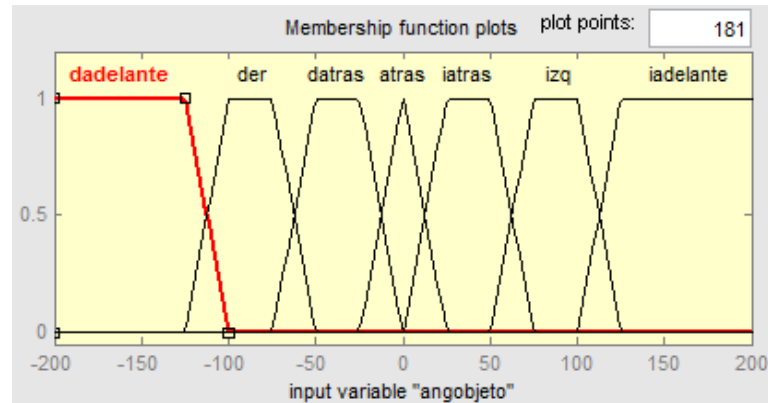


Figura 3.34. Entrada “angobjeto” (ángulo del objeto con respecto al camión) al controlador difuso.

La variable de entrada “velobjeto” (Fig. 3.35) al controlador difuso, está definida por:

- Neg - Negativo [-15 -15 -1 0], Cero [-1 -0.5 0.5 1], Pos – Positivo [0 1 9 11], Mpos – Muy Positivo [9 10 15 15].

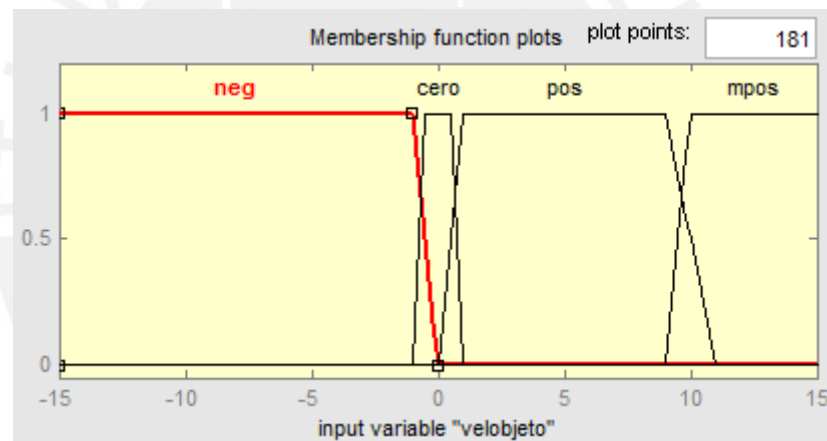


Figura 3.35. Entrada “velobjeto” (velocidad del obstáculo) al controlador difuso.

La variable de salida “angcamion” (Fig. 3.36) del controlador difuso, está definida por:

- NB – Negative Big [-70 -70 -70 -35], NM – Negative Medium [-58.33 -35 -11.67], NS – Negative Small [-28 -14 0], ZE - Zero [-11.67 0 11.67], PS – Positive Small [0 14 28], PM – Positive Medium [11.67 35 58.33], PB – Positive Big [35 70 70 70].

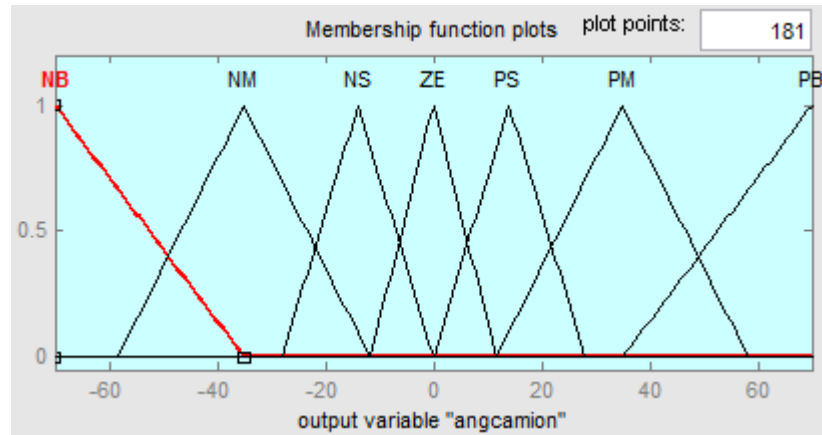


Figura 3.36. Salida “angcamion” (ángulo del timón del camión) del controlador difuso.

La variable de salida “velcamion” (Fig. 3.37) del controlador difuso, está definida por:

- Lento [0 0 3 7.5], MLento [3 7.5 12], Medio [7.5 12 18 22.5], Prapido [18 22.5 27], Rapido [22.5 27 30 30].

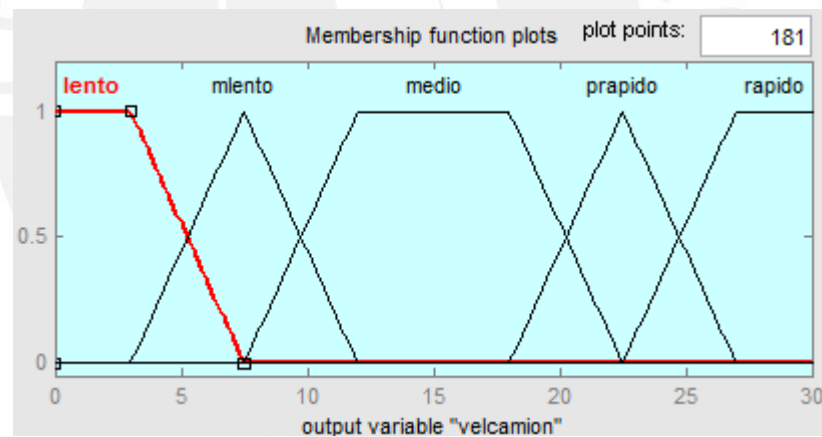


Figura 3.37. Salida “velcamion” (velocidad del camión) del controlador difuso.

Las superficies de control del controlador difuso, en base a las reglas de inferencia, se muestran a continuación (ver de la Fig. 3.38 a la Fig. 3.40):

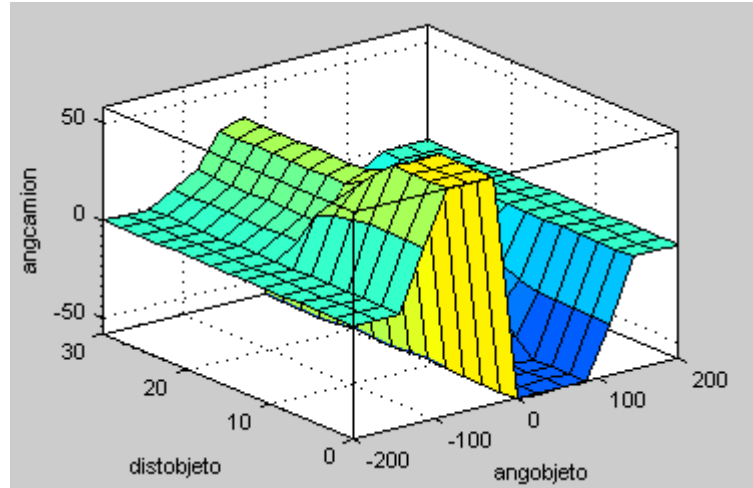


Figura 3.38. Superficie de control para las variables angcamion, distobjeto y angobjeto.

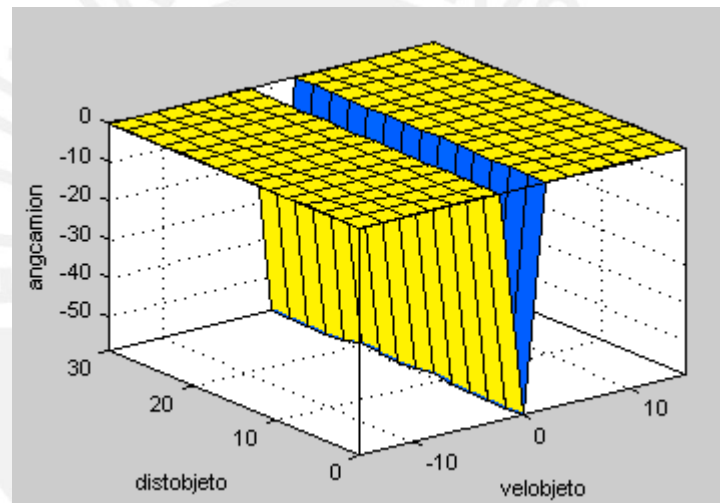


Figura 3.39. Superficie de control para las variables angcamion, distobjeto y velobjeto.

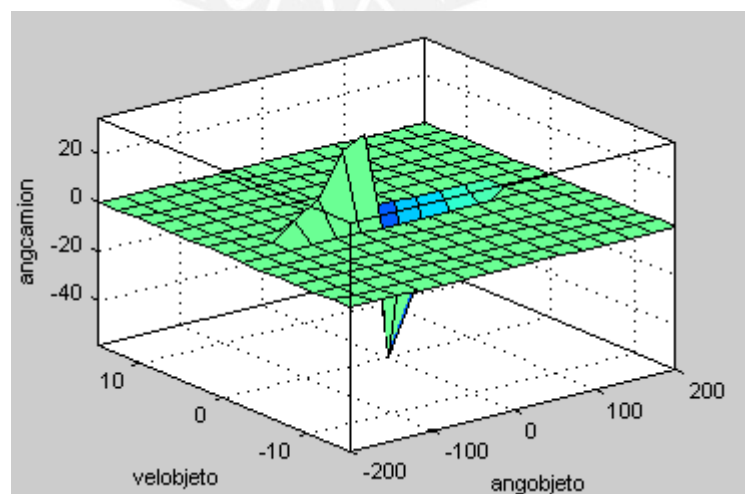


Figura 3.40. Superficie de control para las variables angcamion, velobjeto y angobjeto.

La base de reglas para este tipo de controlador está dado de la Tabla 3.7 a la Tabla 3.12, y por:

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=cerca”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.7. Base de reglas para el ángulo del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=cerca.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PB	--	--
Datras	--	PB	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NB	--	--
Izq	--	NB	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.8. Base de reglas para la velocidad del camión (velcamion) con entrada distobjeto=cerca.

Velcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	Lento	--	--
Der	--	Lento	--	--
Datras	--	Lento	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Lento	--	--
Izq	--	Lento	--	--
Iadelante	--	Lento	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=medio”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.9. Base de reglas para el ángulo del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=medio.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PS	--	--
Datras	--	PM	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NM	--	--
Izq	--	NS	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.10. Base de reglas para la velocidad de camión (Velcamion) con entrada distobjeto=medio.

Velcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	Medio	--	--
Der	--	Lento	--	--
Datras	--	Lento	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Lento	--	--
Izq	--	Lento	--	--
Iadelante	--	Medio	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=lejos”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.11. Base de reglas para el ángulo del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=lejos.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PS	--	--
Datras	--	PM	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NM	--	--
Izq	--	NS	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.12. Base de reglas para la velocidad de camión (Velcamion) con entrada distobjeto=lejos.

Velcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	Medio	--	--
Der	--	Medio	--	--
Datras	--	Medio	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Medio	--	--
Izq	--	Medio	--	--
Iadelante	--	Medio	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4.4. CONTROL NEURODIFUSO SIN OBSTÁCULOS EN RUTA

Este tipo de controlador (Fig. 3.41) tiene como variables de entrada a: X (posición del camión), angT (ángulo del tráiler) y angCT (ángulo entre la cabina y el tráiler); y como variables de salida a: theta (ángulo del timón del camión). Tener en cuenta que el camión se desplazará a velocidad constante (35Km/h), y el controlador neurodifuso permitirá el control del camión por las rutas de la mina (rectas y curvas)

a excepción de los puntos de carga de material, descarga de material y el área de mantenimiento.

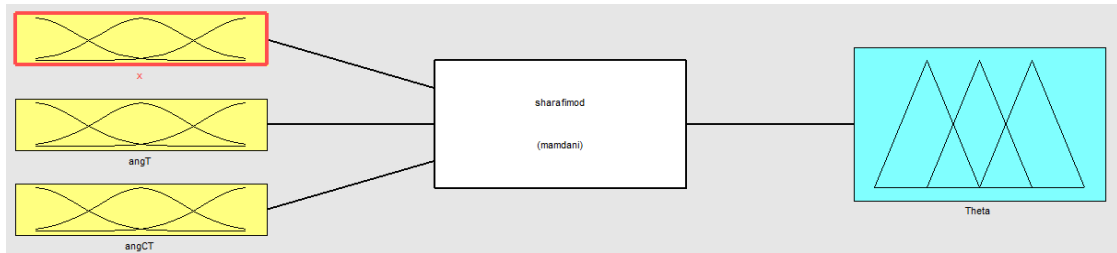


Figura 3.41. Controlador neurodifuso sin obstáculos en ruta.

La variable de entrada “x” (Fig. 3.42) al controlador neurodifuso, está definida por:

- LE - Left [8.42 -0.0848 8.42 12.58], LC - Left Center [4.246 40], CE - Center [2.124 50], RC - Right Center [4.246 60], RI - Right [8.493 87.5 0.08493 100].

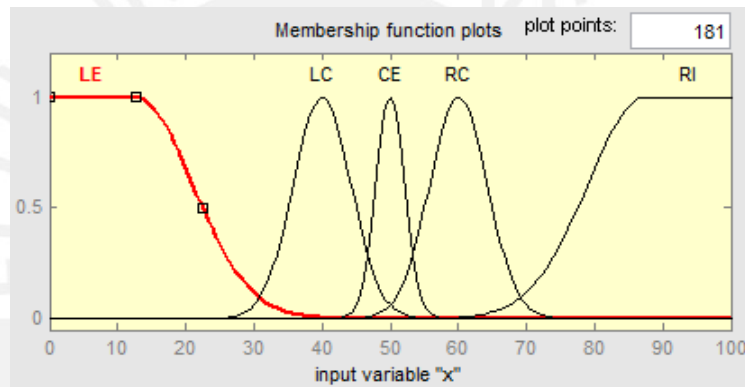


Figura 3.42. Entrada “x” (posición del camión) al controlador neurodifuso.

La variable de entrada “angT” (Fig. 3.43) al controlador neurodifuso, está definida por:

- RB – Right Below [23.36 -45], RU – Right Upper [14.86 25], RV – Right Vertical [10.62 65], VE - Vertical [8.493 90], LV – Left Vertical [10.62 115], LU – Left Upper [14.86 155], LB – Left Below [23.36 225].

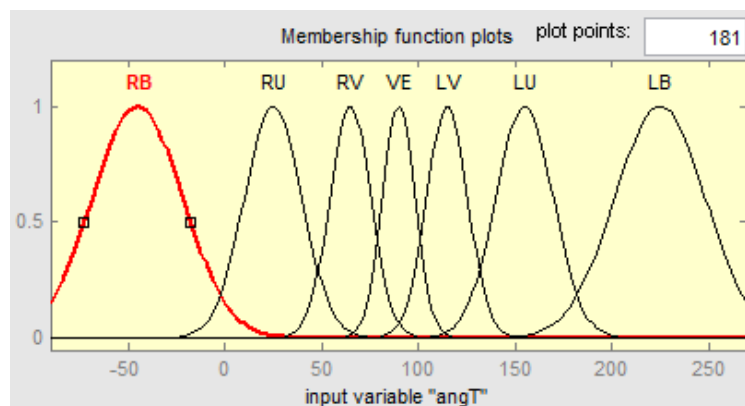


Figura 3.43. Entrada “angT” (ángulo del trailer) al controlador neurodifuso.

La variable de entrada “angCT” (Fig. 3.44) al controlador neurodifuso, está definida por:

- NE – Negative [0.1529 -90 22.42 -63.4], ZR – Zero [3.397 0], PO – Positive [22.42 63.4 0.1529 90].

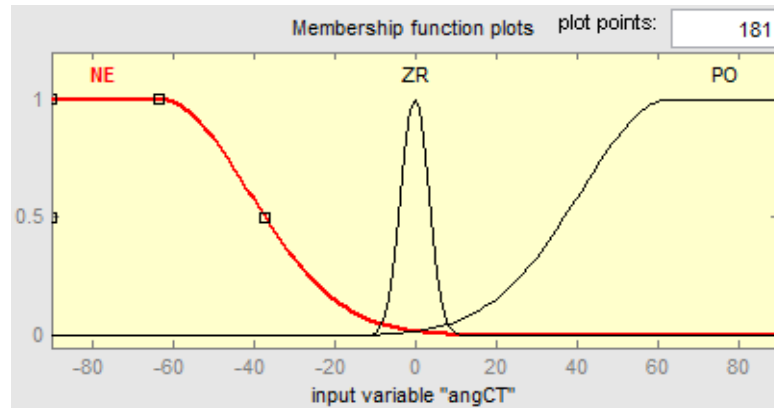


Figura 3.44. Entrada “angCT” (ángulo entre la cabina y el trailer) al controlador neurodifuso.

La variable de salida “Theta” (Fig. 3.45) del controlador neurodifuso, está definida por:

- NB – Negative Big [0.1189 -70 11.89 -66.5], NM – Negative Medium [9.907 -35], NS – Negative Small [5.945 -14], ZE - Zero [4.956 0], PS – Positive Small [5.945 14], PM – Positive Medium [9.907 35], PB – Positive Big [11.89 66.5 0.1189 70].

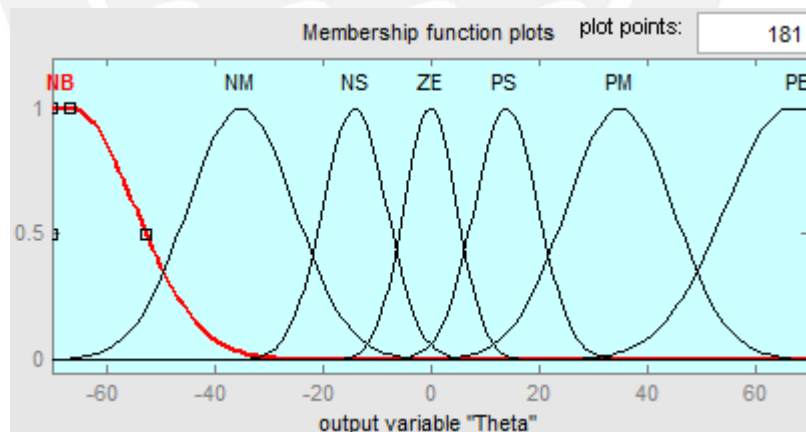


Figura 3.45. Salida “Theta” (ángulo del timón del camión) del controlador neurodifuso.

Las superficies de control del controlador neurodifuso, en base a las reglas de inferencia, se muestran a continuación (ver de la Fig. 3.46 a la Fig. 3.48):

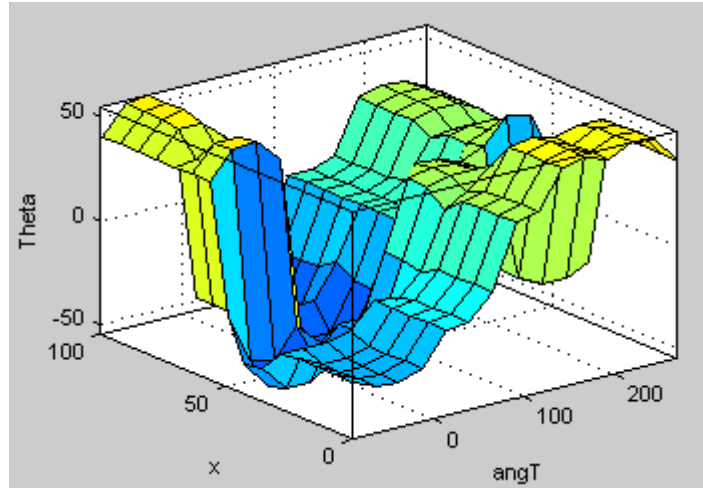


Figura 3.46. Superficie de control para las variables theta, X y angT.

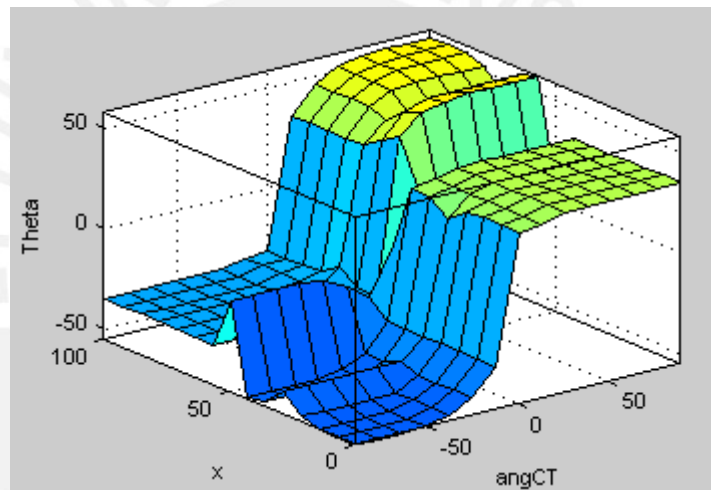


Figura 3.47. Superficie de control para las variables theta, X y angCT.

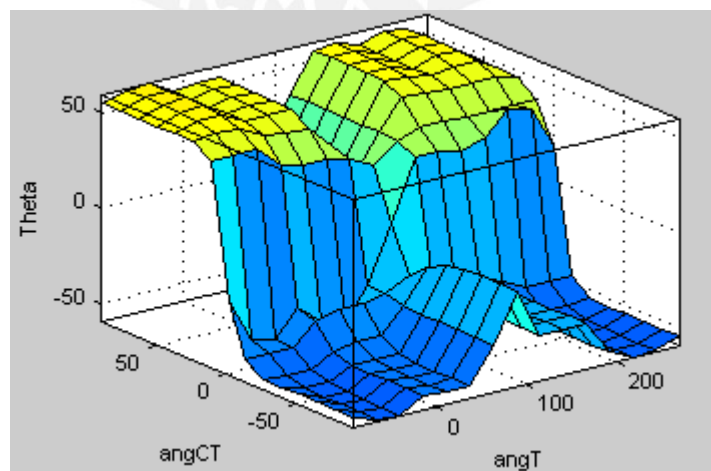


Figura 3.48. Superficie de control para las variables theta, angCT y angT.

La base de reglas para este tipo de controlador está dada de la Tabla 3.13 a la Tabla 3.17, y por:

- Cuando la variable de entrada “x=LE”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.13. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=LE.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NM	NM	PB
RU	NS	NS	PS
RV	NS	ZE	PS
VE	NB	PM	PM
LV	NB	PM	PB
LU	NB	PB	PB
LB	NB	PB	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=LC”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.14. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=LC.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	NB	PB
RU	NS	NM	PS
RV	NS	ZE	PS
VE	NB	PM	PM
LV	NB	PM	PB
LU	NB	PM	PB
LB	NB	NM	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=CE”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.15. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada x=CE.

Theta	angCT		
angT	NE	ZR	PO
RB	NB	NB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NM	NM	PM
VE	ZE	ZE	ZE
LV	NM	PM	PM
LU	NM	PM	PB
LB	NB	PB	PB

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “x=RC”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.16. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada $x=RC$.

Theta	angCT		
	NE	ZR	PO
angT			
RB	NB	PB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NB	NB	PB
VE	NM	NM	PB
LV	NM	ZE	PB
LU	NM	ZE	PB
LB	NB	PM	PM

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “ $x=RI$ ”, la variable de salida “theta”, será:

Tabla 3.17. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (theta) con entrada $x=RI$.

Theta	angCT		
	NE	ZR	PO
angT			
RB	NB	PB	PB
RU	NB	NB	PB
RV	NB	NB	PB
VE	NM	NM	PB
LV	NS	ZE	PS
LU	NS	ZE	PS
LB	NM	PM	PB

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4.5. CONTROL NEURODIFUSO CON OBSTÁCULOS EN RUTA

Este tipo de controlador (Fig. 3.49) tiene como variables de entrada a: distobjeto (distancia del obstáculo al camión), angobjeto (ángulo del obstáculo con respecto al camión) y velobjeto (velocidad del obstáculo); y como variables de salida a: angcamion (ángulo del timón del camión) y velcamion (velocidad del camión). Tener en cuenta que el camión se desplazará a velocidad variable según sea la distancia que se encuentre del obstáculo, y el controlador neurodifuso permitirá el control del camión por las rutas de la mina (rectas y curvas) y en los puntos de estacionamiento (carga de material, descarga de material y el área de mantenimiento).

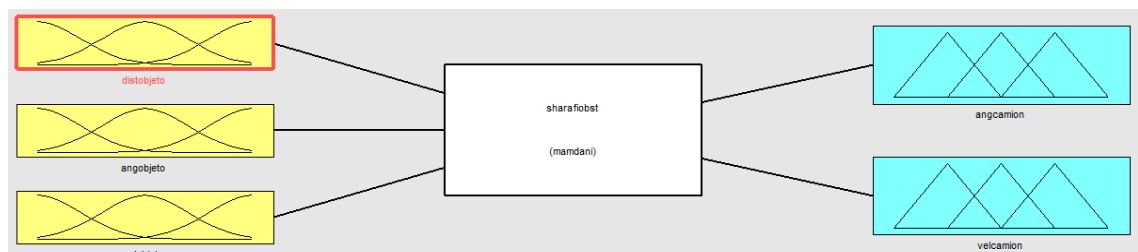


Figura 3.49. Controlador neurodifuso con obstáculos en ruta.

La variable de entrada “distobjeto” (Fig. 3.50) al controlador neurodifuso, está definida por:

- Cerca [0.02548 0 2.548 8.25], Medio [3.185 15], Lejos [2.548 21.75 0.02548 30].

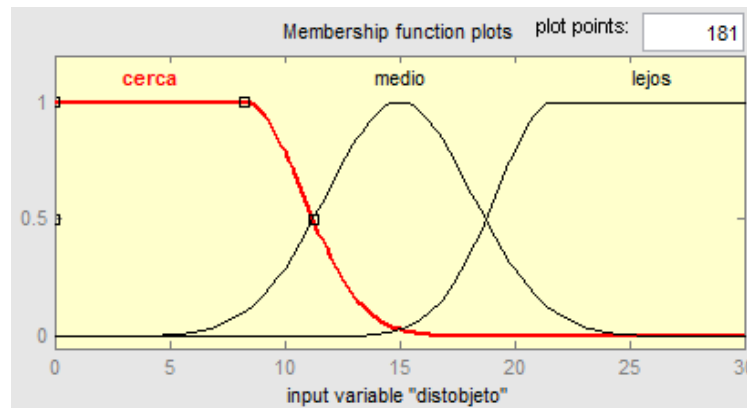


Figura 3.50. Entrada “distobjeto” (distancia entre el obstáculo y el camión) al controlador neurodifuso.

La variable de entrada “angobjeto” (Fig. 3.51) al controlador neurodifuso, está definida por:

- Dadelante – Derecha Adelante [0.3397 -200 8.493 -122.5], Der – Derecha [8.493 -102.5 8.493 -72.5], Datras – Derecha Atrás [8.493 -52.5 8.493 -22.5], Atras [10.62 0], Iatras – Izquierda Atras [8.493 22.5 8.493 52.5], Izq – Izquierda [8.493 72.5 8.493 102.5], Iadelante – Izquierda Adelante [8.493 122.5 0.3397 200].

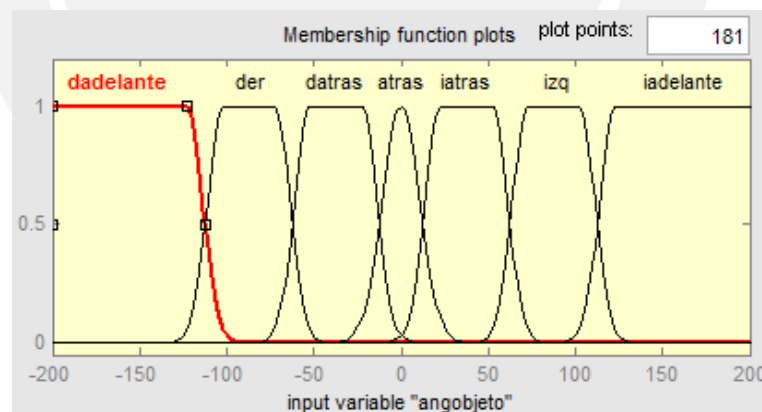


Figura 3.51. Entrada “angobjeto” (ángulo del objeto con respecto al camión) al controlador neurodifuso.

La variable de entrada “velobjeto” (Fig. 3.52) al controlador neurodifuso, está definida por:

- Neg - Negativo [0.02548 -15 0.3397 -0.9], Cero [0.1699 -0.55 0.1699 0.55], Pos – Positivo [0.3397 0.9 0.6795 9.2], Mpos – Muy Positivo [0.3397 9.9 0.02548 15].

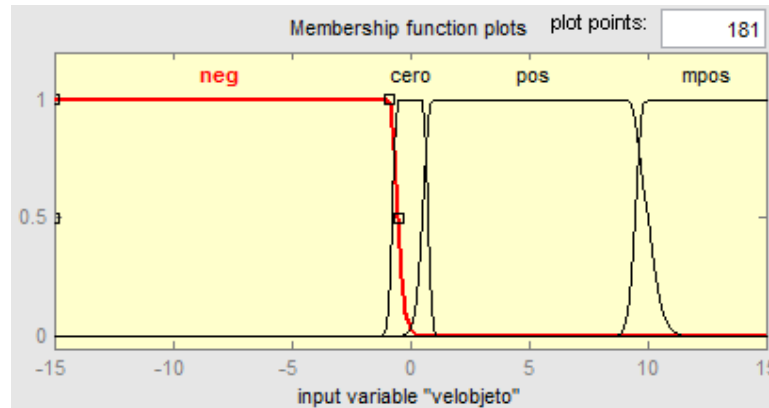


Figura 3.52. Entrada “velobjeto” (velocidad del obstáculo) al controlador neurodifuso.

La variable de salida “Theta” (Fig. 3.53) del controlador neurodifuso, está definida por:

- NB – Negative Big [0.1189 -70 11.89 -66.5], NM – Negative Medium [9.907 -35], NS – Negative Small [5.945 -14], ZE - Zero [4.956 0], PS – Positive Small [5.945 14], PM – Positive Medium [9.907 35], PB – Positive Big [11.89 66.5 0.1189 70].

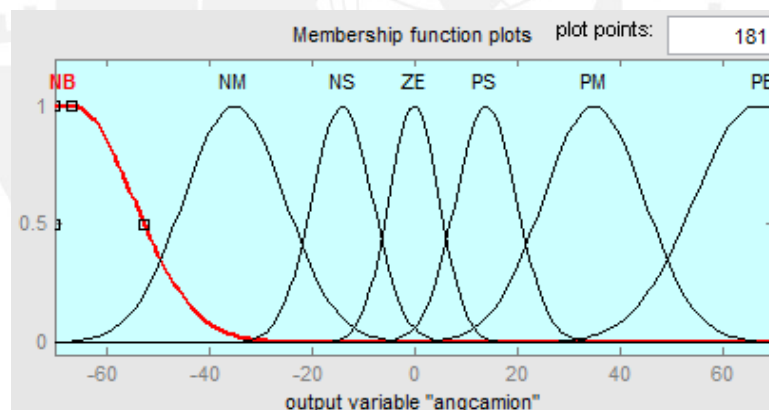


Figura 3.53. Salida “angcamion” (ángulo del timón del camión) del controlador neurodifuso.

La variable de salida “velcamion” (Fig. 3.54) del controlador neurodifuso, está definida por:

- Lento [0.02548 0 1.529 3.45], MLento [1.911 7.5], Medio [1.529 11.55 1.529 18.45], Prapido [1.911 22.5], Rapido [1.529 26.55 0.02548 30].

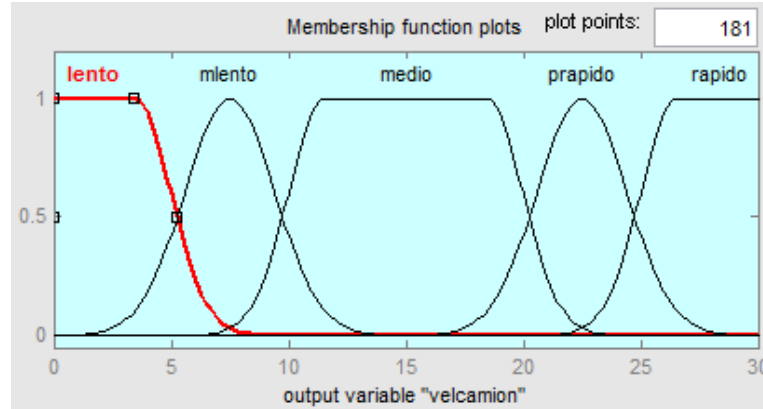


Figura 3.54. Salida “velcamion” (velocidad del camión) del controlador neurodifuso.

Las superficies de control del controlador neurodifuso, en base a las reglas de inferencia, se muestran a continuación (ver de la Fig. 3.55 a la Fig. 3.57):

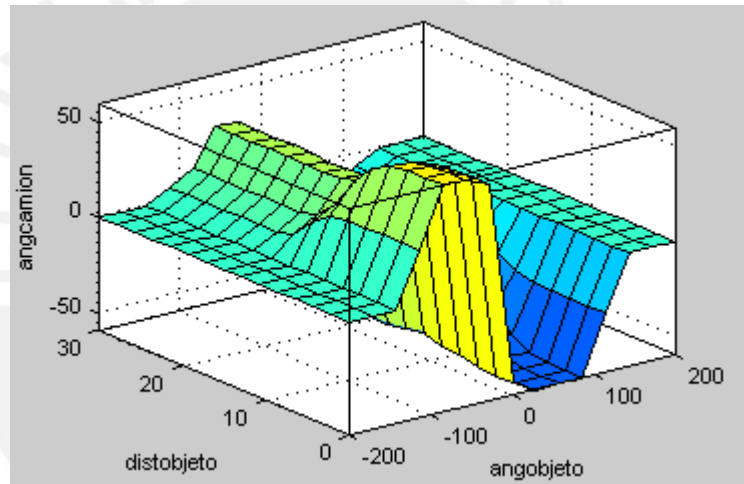


Figura 3.55. Superficie de control para las variables angcamion, distobjeto y angobjeto.

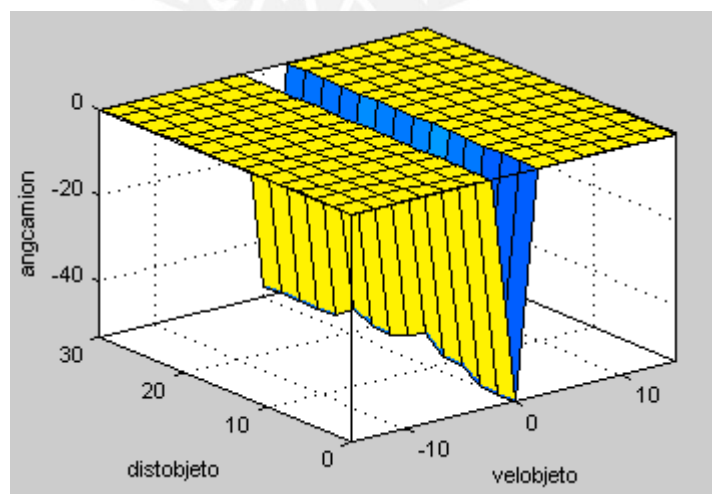


Figura 3.56. Superficie de control para las variables angcamion, distobjeto y velobjeto.

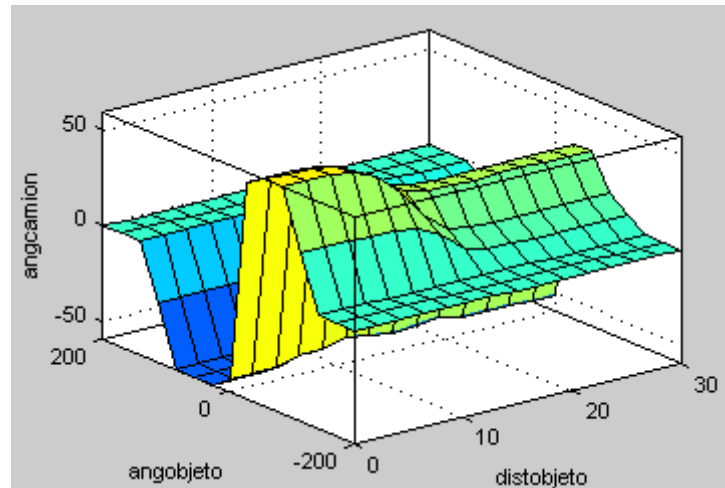


Figura 3.57. Superficie de control para las variables angcamion, angobjeto y distobjeto.

La base de reglas para este tipo de controlador está dada de la Tabla 3.18 a la Tabla 3.23, y por:

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=cerca”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.18. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=cerca.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PB	--	--
Datras	--	PB	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NB	--	--
Izq	--	NB	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.19. Base de reglas para la velocidad del camión (Velcamion) con entrada distobjeto=cerca.

Velcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	Lento	--	--
Der	--	Lento	--	--
Datras	--	Lento	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Lento	--	--
Izq	--	Lento	--	--
Iadelante	--	Lento	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=medio”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.20. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=medio.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PS	--	--
Datras	--	PM	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NM	--	--
Izq	--	NS	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.21. Base de reglas para la velocidad del camión (Velcamion) con entrada distobjeto=medio.

Velcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	Medio	--	--
Der	--	Lento	--	--
Datras	--	Lento	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Lento	--	--
Izq	--	Lento	--	--
Iadelante	--	Medio	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

- Cuando la variable de entrada “distobjeto=lejos”, las variables de salida “angcamion” y “velcamión”, serán:

Tabla 3.22. Base de reglas para el ángulo del timón del camión (Angcamion) con entrada distobjeto=lejos.

Angcamion	velobjeto			
angobjeto	Neg	Cero	Pos	Mpos
Dadelante	--	ZE	--	--
Der	--	PS	--	--
Datras	--	PM	--	--
Atras	--	NB	--	--
Iatras	--	NM	--	--
Izq	--	NS	--	--
Iadelante	--	ZE	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.23. Base de reglas para la velocidad del camión (Velcamion) con entrada distobjeto=lejos.

Velcamion	velobjeto			
	Neg	Cero	Pos	Mpos
angobjeto				
Dadelante	--	Medio	--	--
Der	--	Medio	--	--
Datras	--	Medio	--	--
Atras	--	Lento	--	--
Iatras	--	Medio	--	--
Izq	--	Medio	--	--
Iadelante	--	Medio	--	--

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.5. DISPOSITIVOS PARA LA APLICACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL NEURODIFUSO PARA LA CONDUCCIÓN AUTÓNOMA DEL CAMIÓN MINERO DE DOS CUERPOS

El sistema de control del camión articulado constará de dos controladores, el primer controlador se encargará del control del camión en retroceso en los puntos de estacionamiento establecidos en la ruta de la mina Cerro Verde que se está tomando como referencia de ruta de simulación en el presente proyecto. Estos puntos de estacionamiento pueden ser: el punto inferior del tajo abierto para la carga de material por medio de la Pala Excavadora, o el área de Chancado para descargar el material a ser reducido de volumen para su posterior tratamiento, o los Botaderos para descargar el material que no sirve para la obtención de minerales, o el área de Mantenimiento para realizar cualquier verificación o reparación a las unidades de la mina.

El segundo controlador se encargará del control del camión en dirección frontal en las rutas de la mina Cerro Verde que se está tomando como referencia de ruta de simulación en el presente proyecto. Estas rutas se han dividido en partes, simulando puntos de referencia, tal como si fuera un sistema GPS [4].

Los controladores a diseñar tendrán como entradas, sensores de ultrasonido posicionados alrededor del camión minero (Fig. 3.58), con la finalidad de evitar golpear objetos mediante un adecuado control para esquivarlos. La ubicación de los sensores se aprecia a continuación:



Figura 3.58. Ubicación de los sensores de ultrasonido en el camión minero 740.

La posición y descripción de las entradas y salidas del sistema de control para la conducción autónoma de un camión minero articulado, se muestran a continuación:

- **Entrada 1:** Sensores de Ultrasonido

Estarán distribuidos de la siguiente manera en el camión minero (Fig. 3.59):

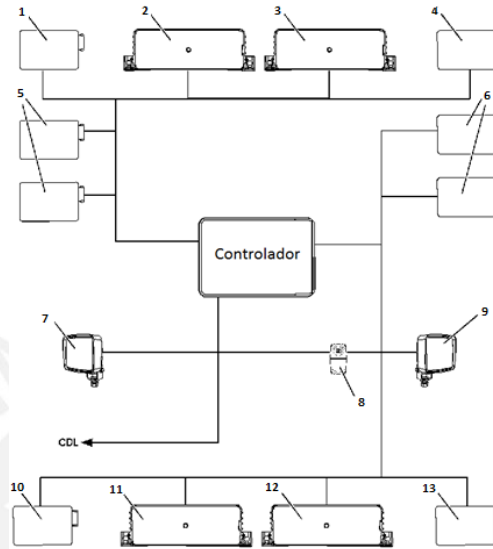


Figura 3.59. Distribución de los sensores de ultrasonido para el camión minero 740.

1. Sensor de ultrasonido delantero de largo alcance.
2. Sensor de ultrasonido delantero de corto alcance.
3. Sensor de ultrasonido delantero de corto alcance.
4. Sensor de ultrasonido delantero de largo alcance.
5. Sensor de ultrasonido izquierdo de largo alcance.
6. Sensor de ultrasonido derecho de largo alcance.
7. Lámpara auxiliar izquierda.
8. Interruptor de encendido de lámpara derecha e izquierda.
9. Lámpara auxiliar derecha.
10. Sensor de ultrasonido posterior de largo alcance.
11. Sensor de ultrasonido posterior de corto alcance.
12. Sensor de ultrasonido posterior de corto alcance.
13. Sensor de ultrasonido posterior de largo alcance.

Estos sensores permitirán obtener la distancia del obstáculo y el ángulo respecto al camión (Fig. 3.60).

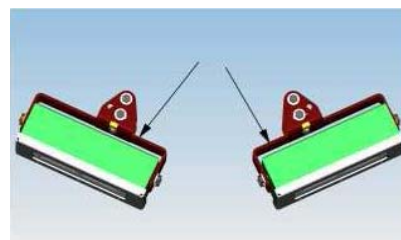


Figura 3.60. Sensores de ultrasonido como entrada para el camión minero 740.

El reconocimiento de un objeto depende de la composición del material y la geometría del objeto. El sistema puede detectar un objeto que es más pequeño que un vehículo ligero, si esto no se realizara, estos vacíos permitirían que el sistema pierda objetos más pequeños, y podrían ocasionar accidentes alrededor de la mina cuando el sistema de control interactúe con su entorno. Existen zonas alrededor del camión minero que los sensores de detección de objetos no tienen cobertura, y se evidencian en la siguiente imagen (Fig. 3.61) y son las áreas sombreadas y enumeradas con (1).

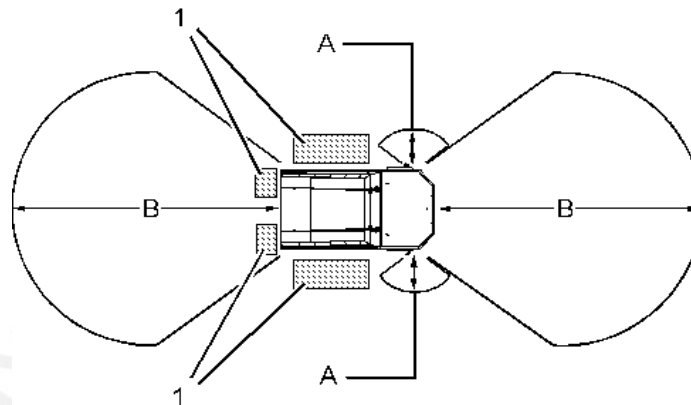


Figura 3.61. Cobertura de los sensores de ultrasonido en el camión minero 740.

Cobertura de los sensores de ultrasonido de detección de objetos:

- (1) Áreas de restricción de detección de los sensores de ultrasonido.
- (A) 1.5m (5ft)
- (B) 18.3m (60ft)

La cobertura proporcionada por los sensores de detección, se muestra a continuación:

- (A) 2.23m (7.3ft)
- (B) 1.52m (5ft)

Los objetos son más propensos a entrar en los puntos ciegos de la máquina cuando la máquina se ha detenido. Para ayudar a prevenir que objetos entren en un punto ciego desapercibido (Fig. 3.62), el Sistema de Detección de Objetos se activa cuando la llave de contacto se gira a la posición ON. El sistema permanece en el estado activo cuando estacionario después de la puesta en marcha. El sistema permanecerá en el estado activo hasta que la máquina cumple los criterios de espera cuando viaja hacia adelante.

El sistema permanece en el estado activo en cualquier momento la máquina se desplaza marcha atrás. El sistema volverá al estado activo automáticamente después de que el operador ha puesto la máquina a una parada completa y ha permanecido parado durante el tiempo de retardo de reactivación que se ha configurado, o cambia el engranaje de la máquina.

El retardo de reactivación se utiliza para detener el sistema de la transición desde el estado de espera al estado activo, mientras que haciendo paradas cortas.

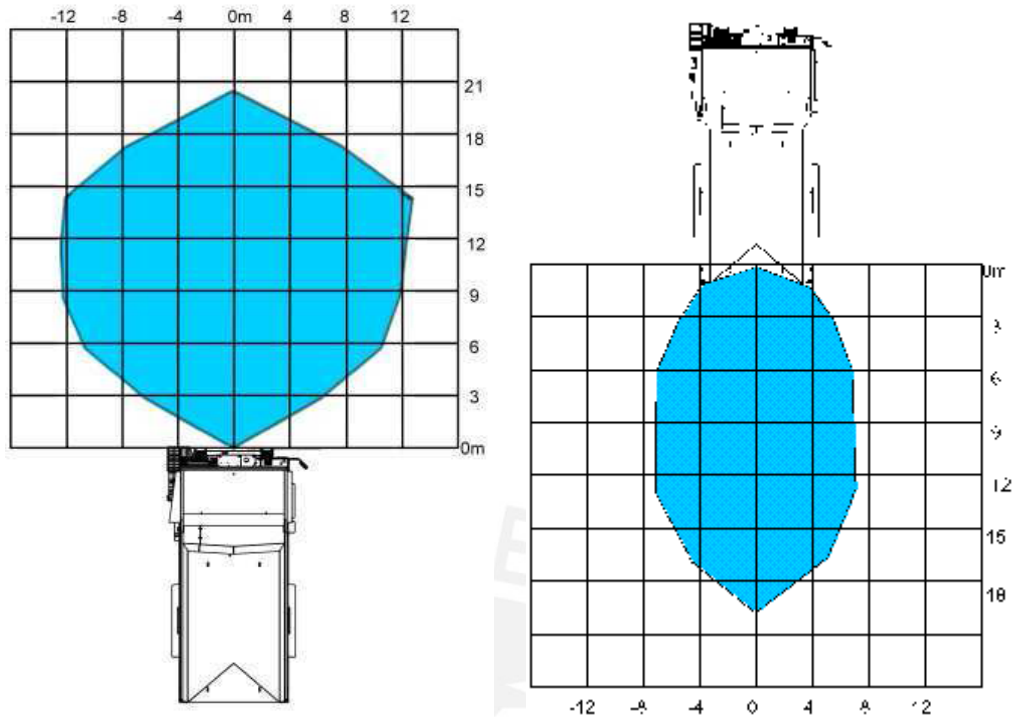


Figura 3.62. Cobertura de los sensores delanteros y posteriores de ultrasonido en el camión minero 740.

- **Entrada 2:** Sistema GPS

Este sistema (Fig. 3.63) permitirá obtener la posición actual “X” del camión minero articulado, así como el ángulo del tráiler.



Figura 3.63. Dispositivos para la comunicación GPS, como entrada para el camión minero 740.

- **Entrada 3:** Sensor de ángulo de giro

Este tipo de control nos permitirá saber el ángulo entre la cabina del camión y del tráiler “angCT”. Así mismo otorgará un buen control del giro del timón del camión (Fig. 3.64).

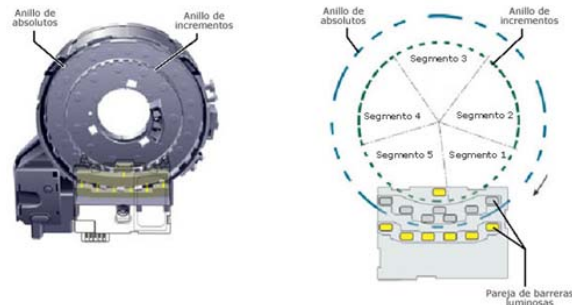


Figura 3.64. Sensor de ángulo de giro como salida para el camión minero 740.

- **Entrada Opcional 4: Cámaras**

El sistema de cámaras opcional (Fig. 3.65), permitirá al chofer o sistema de monitoreo, observar algún objeto, persona o vehículo alrededor del camión, antes y durante la marcha, con la finalidad de evitar accidentes en los rangos que los dispositivos de entrada (sensores de ultrasonido) no puedan cubrir, o simplemente como mediada adicional de precaución.

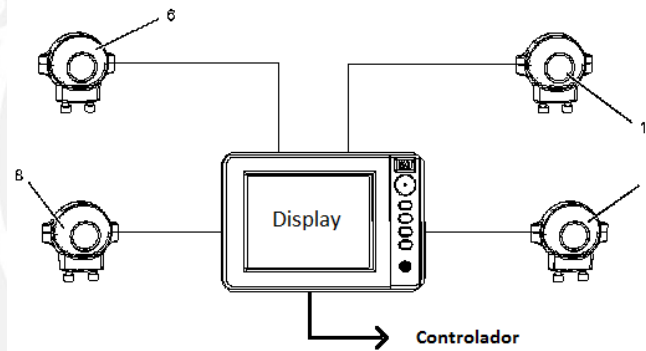


Figura 3.65 Cámaras opcionales como entradas al sistema de control para conducción autónoma del camión minero 740.

El sistema de detección de objetos utiliza sensores de detección de objetos y vídeo para proporcionar al operador con información adicional sobre el área de trabajo alrededor de la máquina. El display permitirá visualizar los objetos alrededor de la máquina. El sistema detectará objetos tan pequeños como un vehículo ligero que se encuentra en la trayectoria de la máquina por medio de los sensores de ultrasonido (Fig. 3.66).

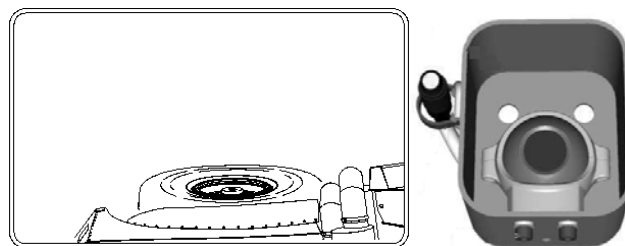


Figura 3.66. Tipo de cámara y campo de visualización opcional para el sistema de control para conducción autónoma del camión minero 740.

- **Salida 1:** Giro del timón del camión (motor y sensor de ángulo de dirección)

Esta salida nos permitirá dar el giro exacto al timón del camión por medio de un motor eléctrico colocado en la cremallera de la dirección del camión minero, y para obtener un giro exacto, ésta señal del motor, es realimentada con un sensor de ángulo de dirección (Fig. 3.67). Este pequeño control no es considerado en ésta tesis, pero es muy sencillo de desarrollar ya que se dispone de un sistema de control MIMO.

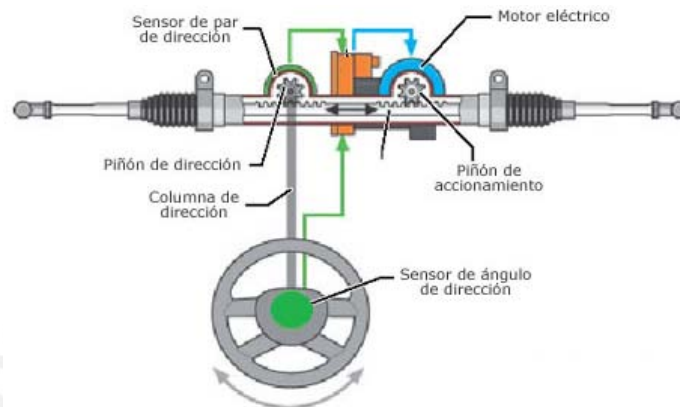


Figura 3.67. Funcionamiento de la salida de giro del timón del camión minero 740.

El sensor de ángulo de dirección es del mismo tipo del considerado en la Fig. 3.64 y su principio de funcionamiento es tal como se muestra en la siguiente (Fig. 3.68):

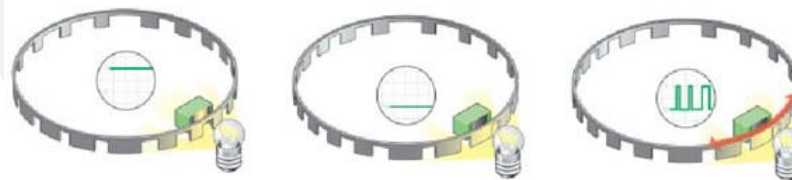


Figura 3.68. Funcionamiento del sensor de ángulo de giro del timón del camión 740.

- **Salida 2:** Velocidad del camión minero

Ésta salida permitirá controlar la velocidad del camión por medio de un control sobre la transmisión (Fig. 3.69) o caja de cambios del equipo.

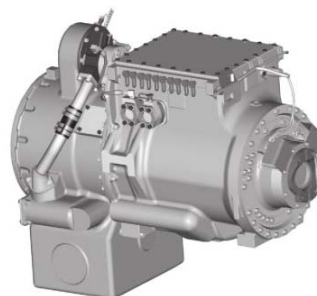


Figura 3.69. Transmisión del camión minero 740.

La señal de control será derivada hacia la entrada “upshift solenoid” y “downshift solenoid” de la transmisión (Fig. 3.70).

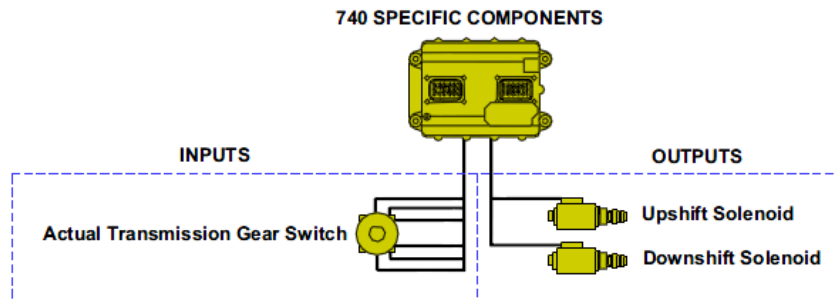


Figura 3.70. Velocidad del camión minero por medio de la comunicación con los solenoides de la transmisión del camión minero 740.

- **Salida Opcional 4: Lámparas**

Estos dispositivos permitirán una mejor de los objetos por medio de las cámaras opcionales consideradas en el sistema de control (Fig. 3.71).

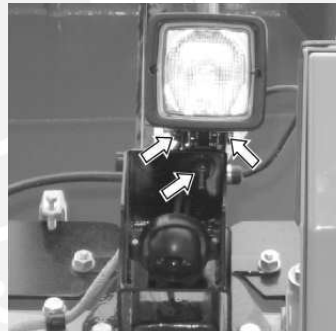


Figura 3.71. Instalación de lámparas opcionales como salida para el sistema de control para conducción autónoma del camión minero 740.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS DEL DISEÑO DE LOS CONTROLADORES DIFUSO Y NEURODIFUSO

4.1. RESULTADOS DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

4.1.1. CONTROLADOR DIFUSO PARA ESTACIONAMIENTO SIN OBSTÁCULOS

Para obtener los resultados de la simulación del estacionamiento del camión minero **sin obstáculos**, mediante el diseño del **controlador difuso**, debemos de introducir las variables de “x” (coordenada “x” inicial del camión), “y” (coordenada “y” inicial del camión), “CT” (ángulo inicial entre la cabina y el tráiler), “T” (ángulo inicial del tráiler) y “x” (coordenada “x” final deseada).

En la primera simulación se utilizan los valores de:

- | | |
|--|-----|
| • Coordenada inicial x [0 a 100]: | 70 |
| • Coordenada inicial y : | 10 |
| • Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: | 20 |
| • Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: | 120 |
| • Coordenada final de x [50]: | 50 |

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.1. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 125m aprox.

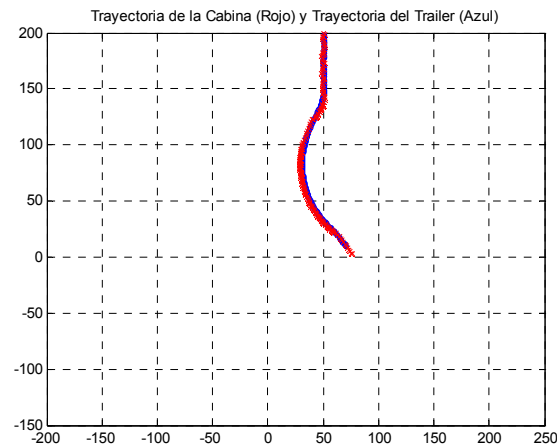


Figura 4.1. Simulación # 1 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.2. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón en los primeros 50 segundos, y luego su oscilación disminuye cuando el camión está ubicado de manera recta hacia el objetivo.

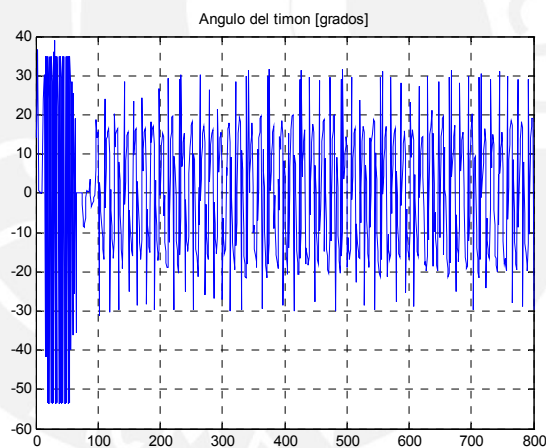


Figura 4.2. Simulación # 1 - Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante durante todo el tiempo de simulación; tal como se ve en la Fig. 4.3.

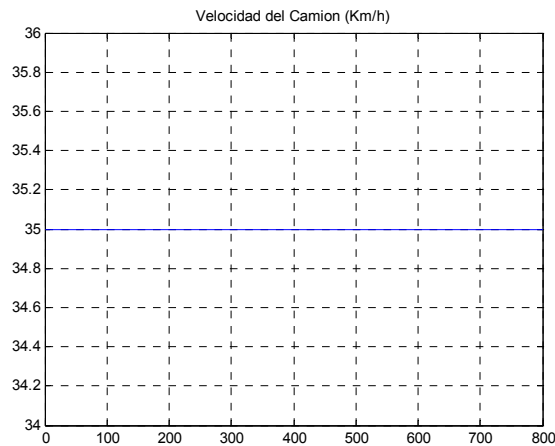


Figura 4.3. Simulación # 1 – Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.1:

Tabla 4.1. Error de variables para la simulación # 1 con controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.9719	90	89.5253	35	35
2	50	50.0716	90	87.6723	35	35
3	50	51.1392	90	86.6431	35	35
4	50	50.1545	90	87.3703	35	35
5	50	51.1808	90	88.9908	35	35
6	50	52.1539	90	89.2385	35	35
7	50	51.066	90	90.7717	35	35
8	50	48.9659	90	93.0159	35	35
9	50	47.913	90	93.3763	35	35
10	50	49.9115	90	92.0611	35	35

X promedio	50.2528	Ang promedio	89.8665	V promedio	35.0000
X error promedio	0.2528	Ang error promedio	2.0611	V error promedio	0.0000
X error max	2.1539	Ang error max	3.3763	V error max	0.0000
X error min	2.0870	Ang error min	3.3569	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la segunda simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 20
- Coordenada inicial y : 10
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 90
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 220
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.4. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 200m aprox.

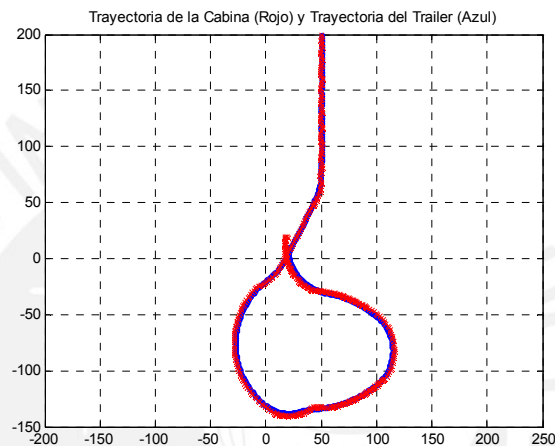


Figura 4.4. Simulación # 2 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.5. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón en los primeros 150 segundos, y luego su oscilación disminuye cuando el camión está ubicado de manera recta hacia el objetivo.

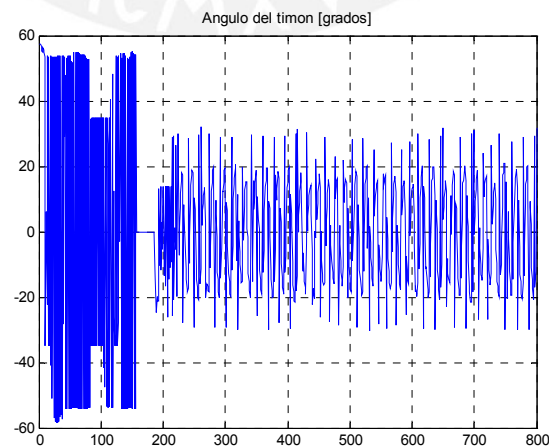


Figura 4.5. Simulación # 2 - Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante durante todo el tiempo de simulación; tal como se ve en la Fig. 4.6.

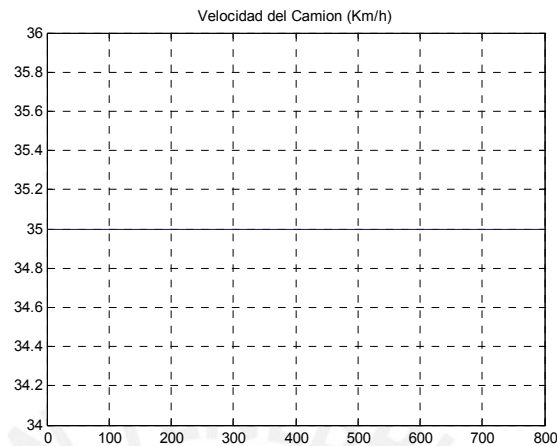


Figura 4.6. Simulación # 2 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.2:

Tabla 4.2. Error de variables para la simulación # 2 con controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.7365	90	90.8216	35	35
2	50	50.7318	90	89.5518	35	35
3	50	51.7156	90	90.1278	35	35
4	50	49.7163	90	90.4507	35	35
5	50	50.7631	90	89.9812	35	35
6	50	49.8721	90	88.6779	35	35
7	50	47.9836	90	86.6066	35	35
8	50	50.0447	90	86.2099	35	35
9	50	51.053	90	87.4067	35	35
10	50	52.0278	90	89.4519	35	35

X promedio	50.3645	Ang promedio	88.9286	V promedio	35.0000
X error promedio	0.3644	Ang error promedio	0.5481	V error promedio	0.0000
X error max	2.0278	Ang error max	3.7901	V error max	0.0000
X error min	2.0164	Ang error min	0.8216	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la tercera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 80
- Coordenada inicial y : 20
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 0
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 90
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.7. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 150m aprox.

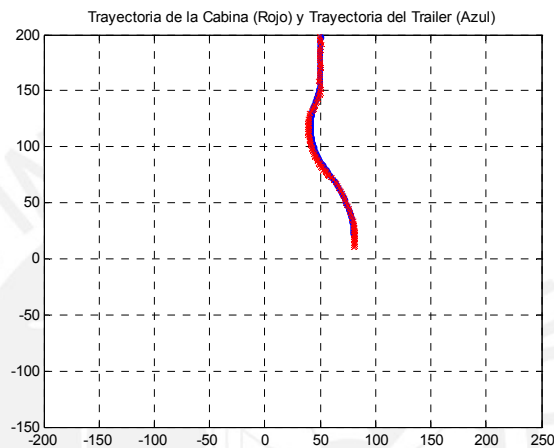


Figura 4.7. Simulación # 3 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.8. Se observa que el camión posee una leve oscilación mayor del timón en los primeros 110 segundos, y luego su oscilación disminuye y se mantiene en los rangos de 25° a -25°, cuando el camión está ubicado de manera recta hacia el objetivo.

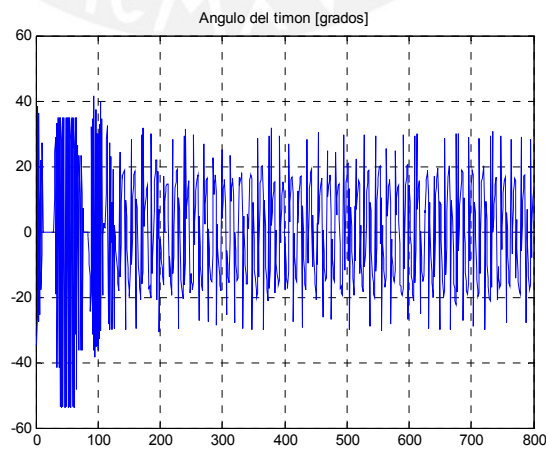


Figura 4.8. Simulación # 3 - Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante durante todo el tiempo de simulación; tal como se ve en la Fig. 4.9.

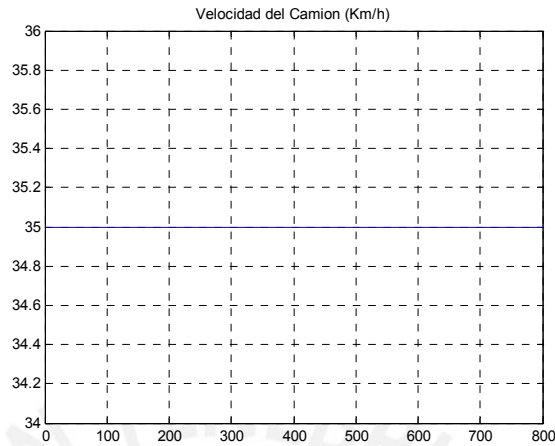


Figura 4.9. Simulación # 3 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.3:

Tabla 4.3. Error de variables para la simulación # 3 con controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.8846	90	90.3041	35	35
2	50	50.8112	90	92.3196	35	35
3	50	49.7928	90	92.3716	35	35
4	50	48.8311	90	90.5737	35	35
5	50	49.9171	90	88.2263	35	35
6	50	50.9803	90	87.5009	35	35
7	50	51.9668	90	87.9891	35	35
8	50	49.8496	90	90.3993	35	35
9	50	49.7762	90	93.8414	35	35
10	50	49.6995	90	94.6935	35	35

X promedio	50.1509	Ang promedio	90.8220	V promedio	35.0000
X error promedio	0.1509	Ang error promedio	4.6935	V error promedio	0.0000
X error max	1.9668	Ang error max	4.6935	V error max	0.0000
X error min	1.1689	Ang error min	2.4991	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la cuarta simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 50
- Coordenada inicial y : 20
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 5
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 0
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.10. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 200m aprox.

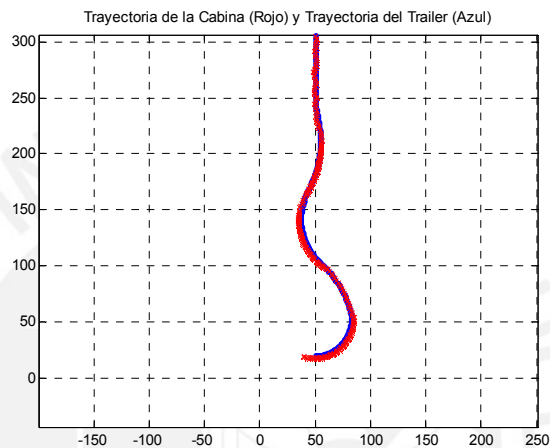


Figura 4.10. Simulación # 4 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.11. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón en los primeros 150 segundos, y luego su oscilación disminuye cuando el camión está ubicado de manera recta hacia el objetivo y se mantiene entre los rangos de 25° y -25° .

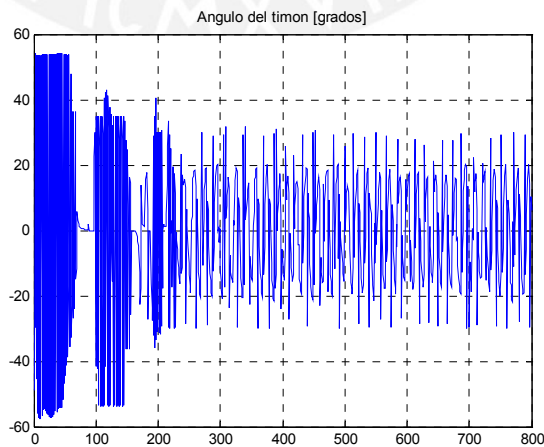


Figura 4.11. Simulación # 4 - Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante durante todo el tiempo de simulación; tal como se ve en la Fig. 4.12.

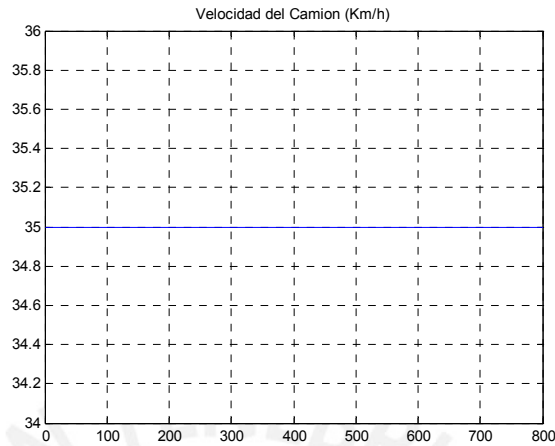


Figura 4.12. Simulación # 4 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.4:

Tabla 4.4. Error de variables para la simulación # 4 con controlador difuso para estacionamiento sin obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.9451	90	90.9813	35	35
2	50	50.0069	90	90.2513	35	35
3	50	50.0999	90	88.3055	35	35
4	50	51.1757	90	86.8459	35	35
5	50	52.1978	90	87.2354	35	35
6	50	51.2583	90	88.5586	35	35
7	50	50.2818	90	88.1558	35	35
8	50	50.2704	90	89.2009	35	35
9	50	49.2404	90	90.7436	35	35
10	50	50.2103	90	90.82	35	35

X promedio	50.4687	Ang promedio	89.1098	V promedio	35.0000
X error promedio	0.4687	Ang error promedio	0.8200	V error promedio	0.0000
X error max	2.1978	Ang error max	3.1541	V error max	0.0000
X error min	0.7596	Ang error min	0.9813	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2. CONTROLADOR DIFUSO PARA ESTACIONAMIENTO CON OBSTÁCULOS

Para obtener los resultados de la simulación del estacionamiento del camión minero **con obstáculos**, mediante el diseño del **controlador difuso**, debemos de introducir las variables de “x” (coordenada “x” inicial del camión), “y” (coordenada “y” inicial del camión), “CT” (ángulo inicial entre la cabina y el tráiler), “T” (ángulo inicial del tráiler) y “x” (coordenada “x” final deseada).

En la primera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 100
- Coordenada inicial y : 60
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 20
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 80
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.13. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 150m aprox.

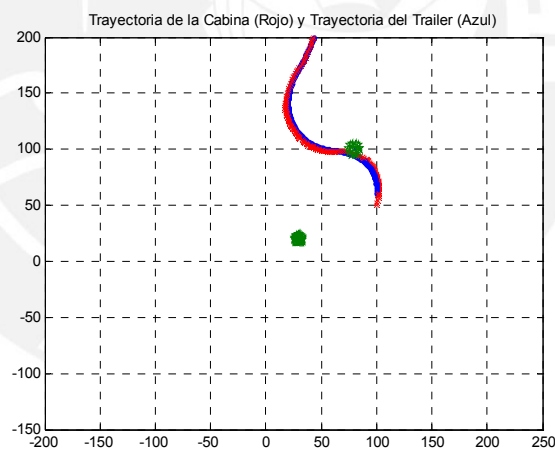


Figura 4.13. Simulación # 1 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.14, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión impacta con el obstáculo.

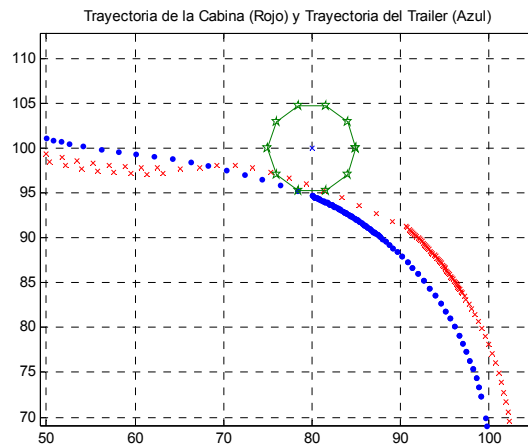


Figura 4.14. Simulación # 1 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.15. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón cuando interactúa con la evasión del obstáculo dentro de los 150 y 200 segundos.

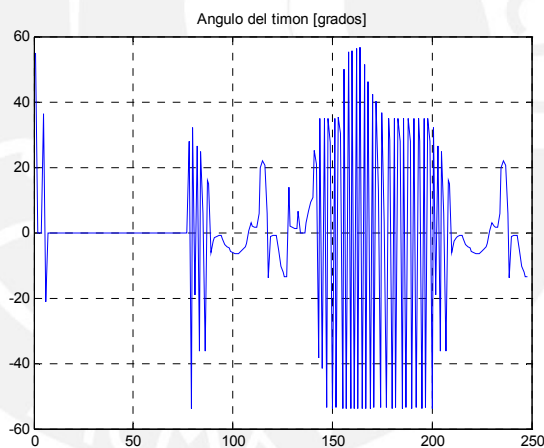


Figura 4.15. Simulación # 1 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 3Km/h durante 70 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.16.

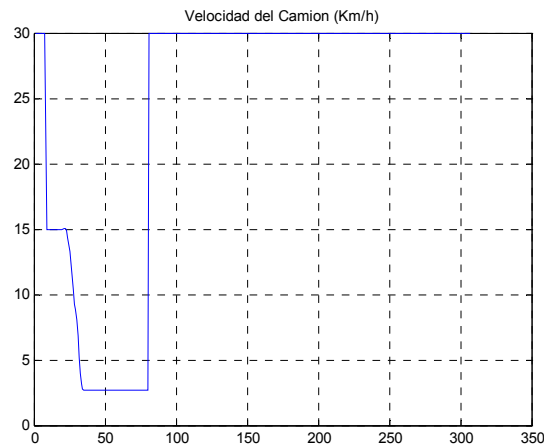


Figura 4.16. Simulación # 1 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.5:

Tabla 4.5. Error de variables para la simulación # 1 con controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.3045	90	92.322	30	30
2	50	50.1705	90	94.4456	30	30
3	50	51.0204	90	94.7557	30	30
4	50	49.9236	90	93.5208	30	30
5	50	48.8984	90	91.3904	30	30
6	50	49.8774	90	90.5982	30	30
7	50	49.9269	90	88.6446	30	30
8	50	50.034	90	86.8635	30	30
9	50	50.149	90	86.4126	30	30
10	50	50.2213	90	87.525	30	30

X promedio	50.0526	Ang promedio	90.6478	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0526	Ang error promedio	0.6478	V error promedio	0.0000
X error max	1.1016	Ang error max	4.7557	V error max	0.0000
X error min	1.0204	Ang error min	3.5874	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la segunda simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 0
- Coordenada inicial y : -40
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: -40
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 75
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.17. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 100m aprox.

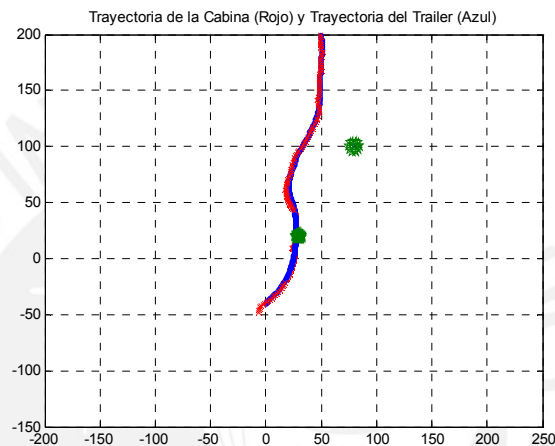


Figura 4.17. Simulación # 2 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.18, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión impacta con el obstáculo.

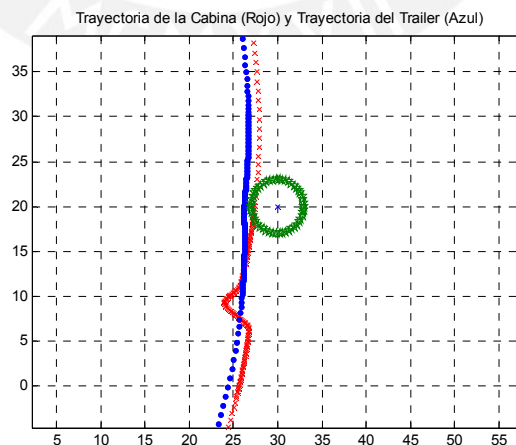


Figura 4.18. Simulación # 2 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.19. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón cuando interactúa con la evasión del obstáculo.

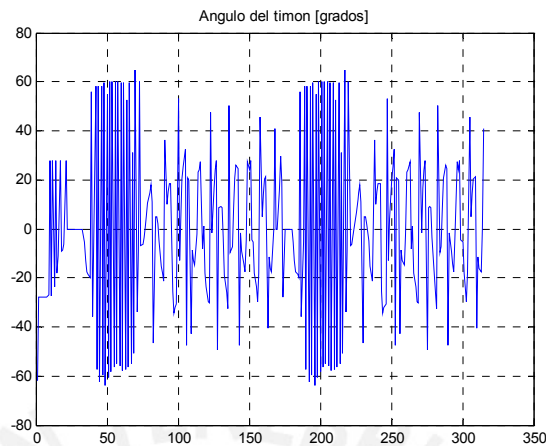


Figura 4.19. Simulación # 2 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 3Km/h durante 150 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.20.

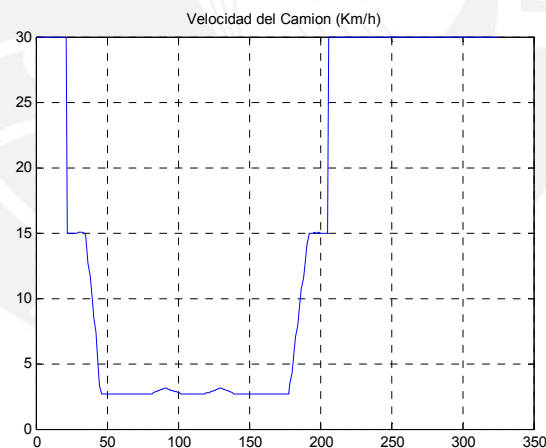


Figura 4.20. Simulación # 2 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.6:

Tabla 4.6. Error de variables para la simulación # 2 con controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.2484	90	89.1249	30	30
2	50	48.1847	90	91.7524	30	30
3	50	50.0699	90	93.8874	30	30
4	50	49.9384	90	94.1719	30	30
5	50	49.856	90	92.8385	30	30
6	50	48.8408	90	90.8716	30	30
7	50	49.8311	90	90.2685	30	30
8	50	48.8707	90	88.9102	30	30
9	50	49.9717	90	87.1359	30	30
10	50	50.0889	90	86.4065	30	30

X promedio	49.5901	Ang promedio	90.5368	V promedio	30.0000
X error promedio	0.4099	Ang error promedio	3.5935	V error promedio	0.0000
X error max	1.8153	Ang error max	4.1719	V error max	0.0000
X error min	0.2484	Ang error min	3.5935	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la tercera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 25
- Coordenada inicial y : -25
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 0
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 90
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.21. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 125m aprox.

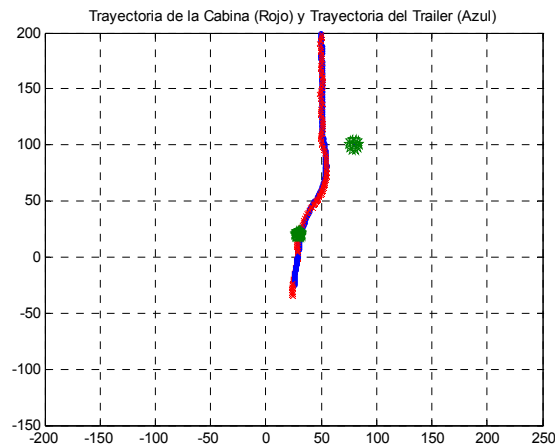


Figura 4.21. Simulación # 3 - Trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.22, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión impacta con el obstáculo.

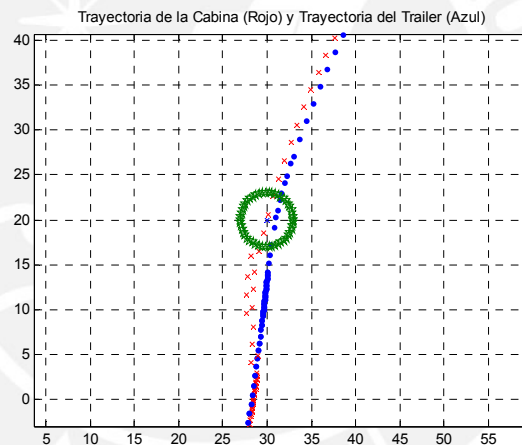


Figura 4.22. Simulación # 3 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador difuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.23. Se observa que el camión posee mayor oscilación del timón cuando interactúa con la evasión del obstáculo.

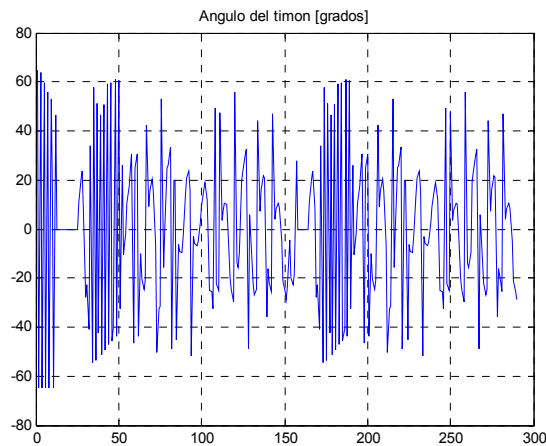


Figura 4.23. Simulación # 3 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 15Km/h y 3Km/h durante 50 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.24.

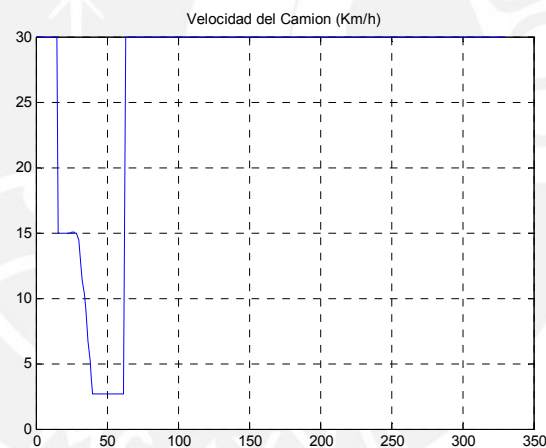


Figura 4.24. Simulación # 3 - Velocidad del camión minero con el controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.7:

Tabla 4.7. Error de variables para la simulación # 3 con controlador difuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.9908	90	84.9469	30	30
2	50	50.0828	90	86.6356	30	30
3	50	51.0989	90	89.1243	30	30
4	50	50.0798	90	90.5429	30	30
5	50	49.9756	90	92.9663	30	30
6	50	50.8459	90	94.22	30	30
7	50	51.7346	90	93.6876	30	30
8	50	49.697	90	91.1907	30	30
9	50	48.6866	90	90.2937	30	30
10	50	49.7469	90	88.3469	30	30
	X promedio	50.1939	Ang promedio	90.1955	V promedio	30.0000
	X error promedio	0.2531	Ang error promedio	0.1955	V error promedio	0.0000
	X error max	1.7346	Ang error max	5.0531	V error max	0.0000
	X error min	1.3134	Ang error min	4.2200	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

4.2. RESULTADOS DEL DISEÑO DEL CONTROLADOR NEURODIFUSO

4.2.1. CONTROLADOR NEURODIFUSO PARA ESTACIONAMIENTO SIN OBSTÁCULOS

Para obtener los resultados de la simulación del estacionamiento del camión minero **sin obstáculos**, mediante el diseño del **controlador neurodifuso**, debemos de introducir las variables de “x” (coordenada “x” inicial del camión), “y” (coordenada “y” inicial del camión), “CT” (ángulo inicial entre la cabina y el tráiler), “T” (ángulo inicial del tráiler) y “x” (coordenada “x” final deseada).

En la primera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 70
- Coordenada inicial y : 10
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 20
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 120
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.25. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 50m aprox.

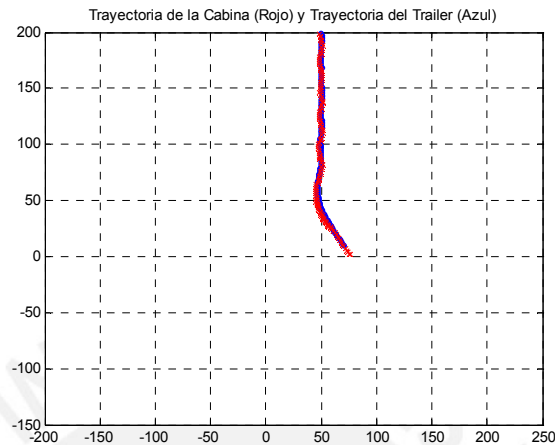


Figura 4.25. Simulación # 1 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.26. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 15° y -15° , durante su recorrido hasta llegar al objetivo.

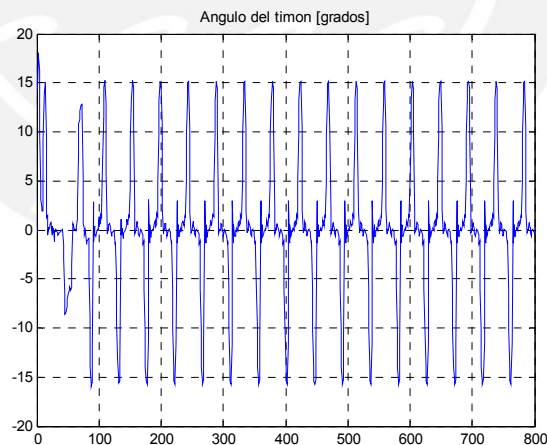


Figura 4.26. Simulación # 1 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante en un valor de 35Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se observa en la Fig. 4.27.

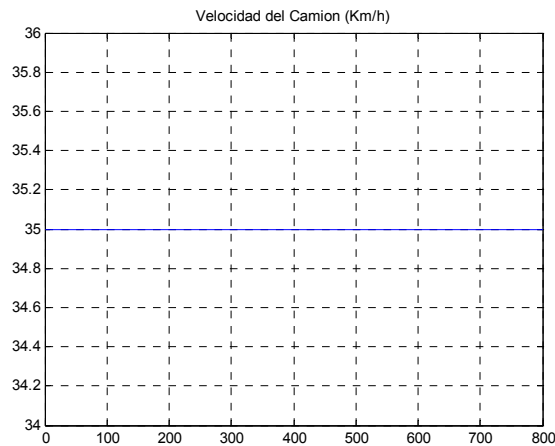


Figura 4.27. Simulación # 1 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.8:

Tabla 4.8. Error de variables para la simulación # 1 con controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.0156	90	89.7502	30	30
2	50	50.0131	90	89.1217	30	30
3	50	49.9533	90	90.0742	30	30
4	50	49.8264	90	91.6444	30	30
5	50	50.1655	90	90.5267	30	30
6	50	49.5142	90	90.7003	30	30
7	50	49.7207	90	90.587	30	30
8	50	50.3998	90	90.0357	30	30
9	50	50.3634	90	91.371	30	30
10	50	50.3618	90	91.0057	30	30

X promedio	50.0334	Ang promedio	90.4817	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0334	Ang error promedio	0.4817	V error promedio	0.0000
X error max	0.4858	Ang error max	1.6444	V error max	0.0000
X error min	0.3998	Ang error min	0.8783	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la segunda simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 20
- Coordenada inicial y : 10
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 90
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 220
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.28. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 150m aprox.

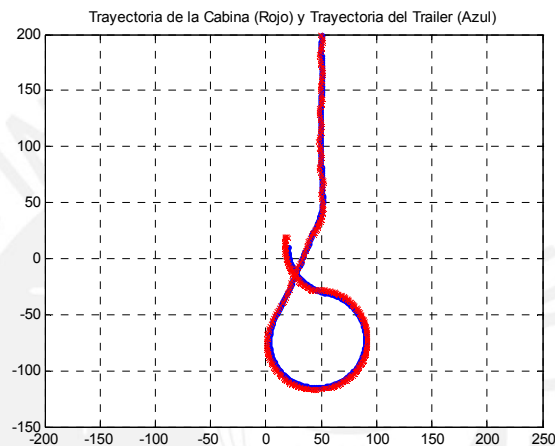


Figura 4.28. Simulación # 2 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.29. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 15° y -15° , durante su recorrido hasta llegar al objetivo.

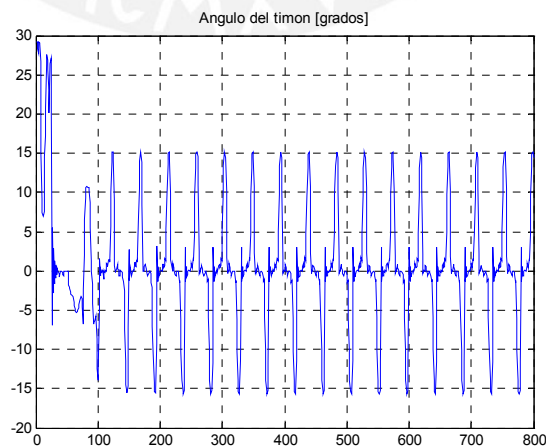


Figura 4.29. Simulación # 2 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante en un valor de 35Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se observa en la Fig. 4.30.

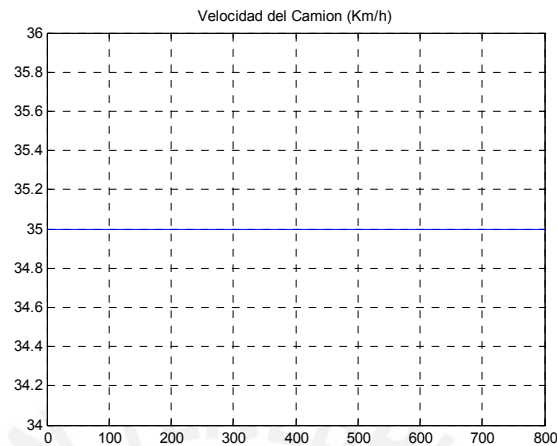


Figura 4.30. Simulación # 2 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.9:

Tabla 4.9. Error de variables para la simulación # 2 con controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.6338	90	89.4516	30	30
2	50	50.0437	90	88.8987	30	30
3	50	49.6129	90	89.729	30	30
4	50	49.6409	90	90.8429	30	30
5	50	49.6428	90	90.9737	30	30
6	50	49.7478	90	90.7404	30	30
7	50	50.2922	90	90.7039	30	30
8	50	49.8151	90	90.6036	30	30
9	50	49.8492	90	89.3318	30	30
10	50	49.9355	90	89.7662	30	30

X promedio	49.8214	Ang promedio	90.1042	V promedio	30.0000
X error promedio	0.1786	Ang error promedio	0.2338	V error promedio	0.0000
X error max	0.3871	Ang error max	1.1013	V error max	0.0000
X error min	0.2922	Ang error min	0.9737	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la tercera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 80
- Coordenada inicial y : 20
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 0
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 90
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.31. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 80m aprox.

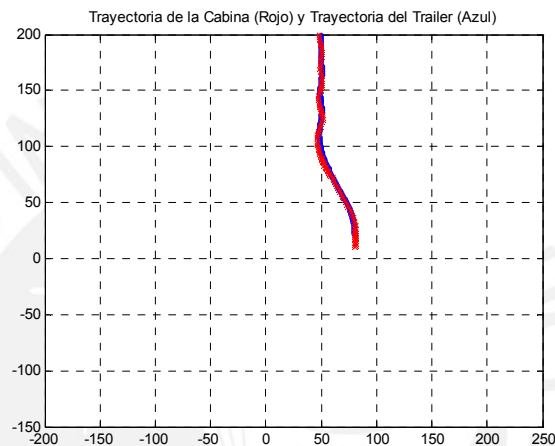


Figura 4.31. Simulación # 3 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.32. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 15° y -15°, durante su recorrido hasta llegar al objetivo.

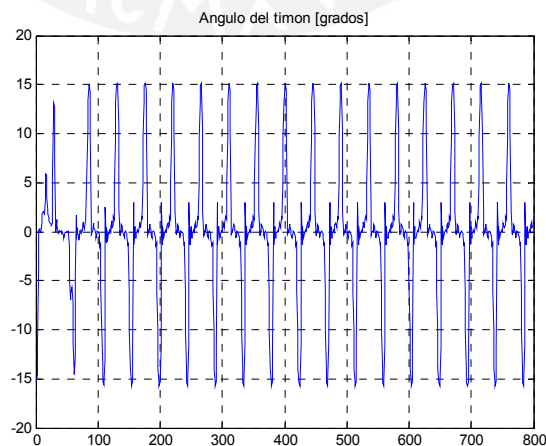


Figura 4.32. Simulación # 3 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante en un valor de 35Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se observa en la Fig. 4.33.

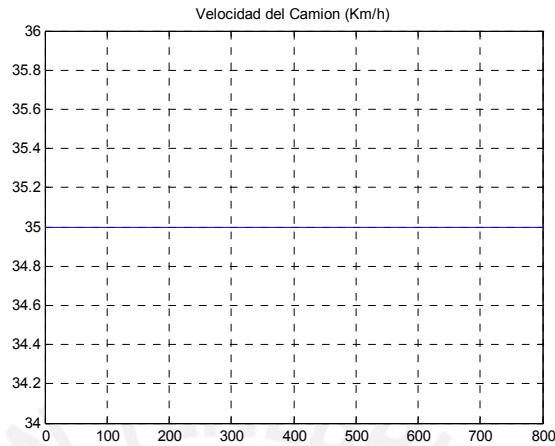


Figura 4.33. Simulación # 3 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.10:

Tabla 4.10. Error de variables para la simulación # 3 con controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.6646	90	90.4818	30	30
2	50	49.578	90	90.209	30	30
3	50	49.4966	90	89.8817	30	30
4	50	49.8508	90	89.5658	30	30
5	50	49.8741	90	89.3553	30	30
6	50	49.9958	90	89.3525	30	30
7	50	49.7827	90	89.6359	30	30
8	50	49.9888	90	90.2193	30	30
9	50	50.1565	90	91.0239	30	30
10	50	50.2432	90	91.8627	30	30

X promedio	49.8631	Ang promedio	90.1588	V promedio	30.0000
X error promedio	0.1369	Ang error promedio	0.1588	V error promedio	0.0000
X error max	0.5034	Ang error max	1.8627	V error max	0.0000
X error min	0.2432	Ang error min	0.6475	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.
En la cuarta simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 50
- Coordenada inicial y : 20
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 5
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 0
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento sin obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.34. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 100m aprox.

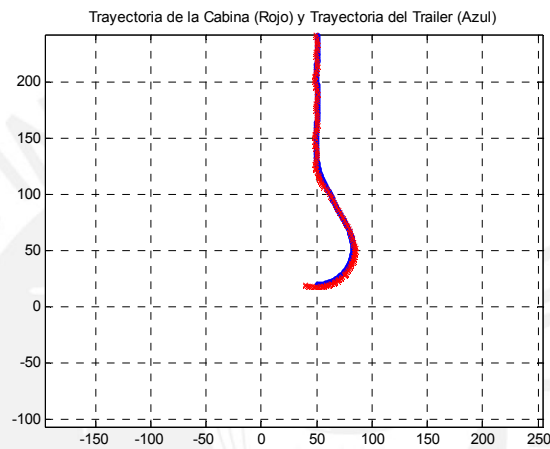


Figura 4.34. Simulación # 4 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento sin obstáculos, se muestra en la Fig. 4.35. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 15° y -15° , durante su recorrido hasta llegar al objetivo.

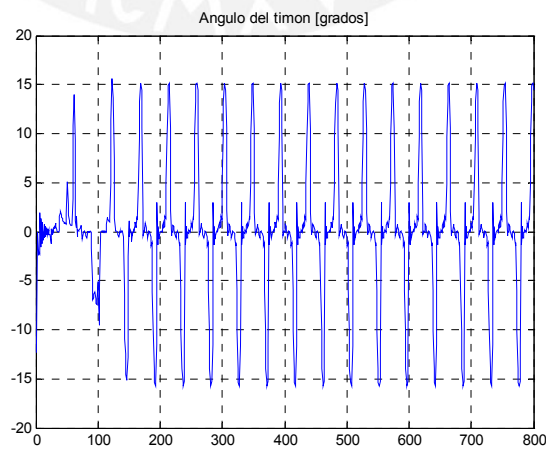


Figura 4.35. Simulación # 4 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos, se mantiene constante en un valor de 35Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se observa en la Fig. 4.36.

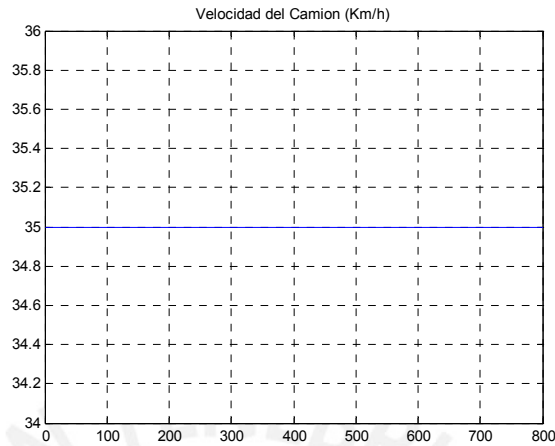


Figura 4.36. Simulación # 4 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.11:

Tabla 4.11. Error de variables para la simulación # 4 con controlador neurodifuso para estacionamiento sin obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.1904	90	91.5768	30	30
2	50	50.08	90	90.7658	30	30
3	50	50.0272	90	91.1211	30	30
4	50	50.0704	90	91.4951	30	30
5	50	50.217	90	89.8066	30	30
6	50	50.3756	90	90.8371	30	30
7	50	50.5332	90	89.227	30	30
8	50	50.626	90	89.591	30	30
9	50	50.64	90	89.0711	30	30
10	50	50.6333	90	89.0735	30	30

X promedio	50.3393	Ang promedio	90.2565	V promedio	30.0000
X error promedio	0.6333	Ang error promedio	0.2565	V error promedio	0.0000
X error max	0.6400	Ang error max	1.5768	V error max	0.0000
X error min	0.0272	Ang error min	0.9289	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2. CONTROLADOR NEURODIFUSO PARA ESTACIONAMIENTO CON OBSTÁCULOS

Para obtener los resultados de la simulación del estacionamiento del camión minero **con obstáculos**, mediante el diseño del **controlador neurodifuso**, debemos de introducir las variables de “x” (coordenada “x” inicial del camión), “y” (coordenada “y” inicial del camión), “CT” (ángulo inicial entre la cabina y el tráiler), “T” (ángulo inicial del tráiler) y “x” (coordenada “x” final deseada).

En la primera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 100
- Coordenada inicial y : 60
- Angulo entre la cabina y el tráiler CT [-90 a 90]: 20
- Inclinación inicial del tráiler T [-90 a 270]: 80
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.37. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 125m aprox., evadiendo los obstáculos en la ruta.

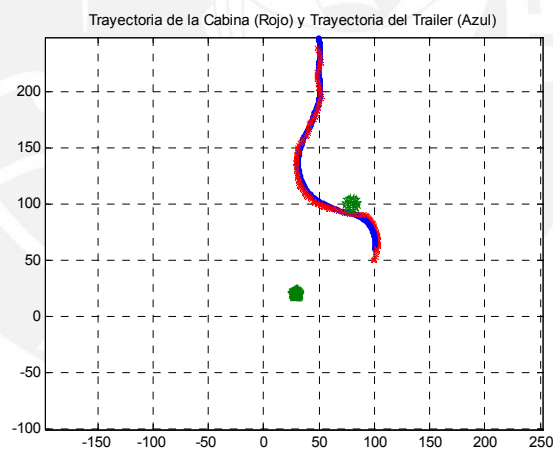


Figura 4.37. Simulación # 1 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.38, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión evade correctamente el obstáculo presentado en la ruta.

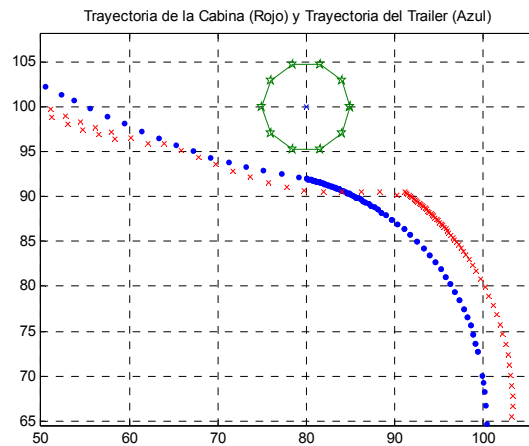


Figura 4.38. Simulación # 1 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.39. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 25° y -25° cuando interactúa con el obstáculo en la ruta.

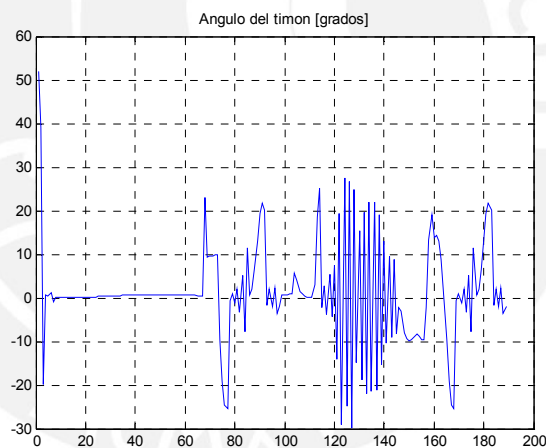


Figura 4.39. Simulación # 1 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 15Km/h y 3Km/h durante 70 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.40.

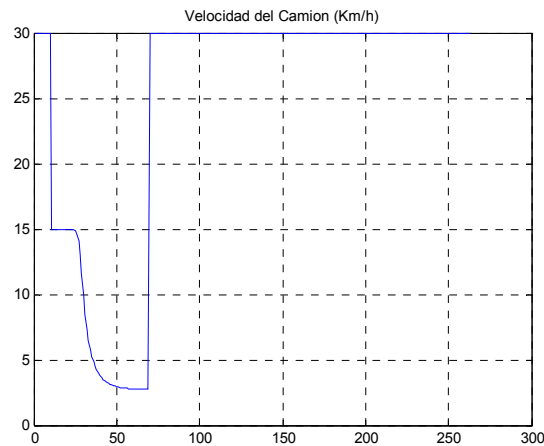


Figura 4.40. Simulación # 1 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.12:

Tabla 4.12. Error de variables para la simulación # 1 con controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.362	90	89.7645	30	30
2	50	50.4475	90	89.5447	30	30
3	50	50.4667	90	89.4312	30	30
4	50	50.4033	90	90.2144	30	30
5	50	50.2818	90	90.328	30	30
6	50	50.1302	90	90.195	30	30
7	50	49.9714	90	90.4528	30	30
8	50	49.8354	90	90.8443	30	30
9	50	49.7561	90	90.2606	30	30
10	50	49.7715	90	89.5695	30	30

X promedio	50.1426	Ang promedio	90.0605	V promedio	30.0000
X error promedio	0.2285	Ang error promedio	0.0605	V error promedio	0.0000
X error max	0.4667	Ang error max	0.8443	V error max	0.0000
X error min	0.2439	Ang error min	0.5688	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la segunda simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 0
- Coordenada inicial y : -40
- Ángulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: -40
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 75
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.41. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 100m aprox., evadiendo los obstáculos en la ruta.

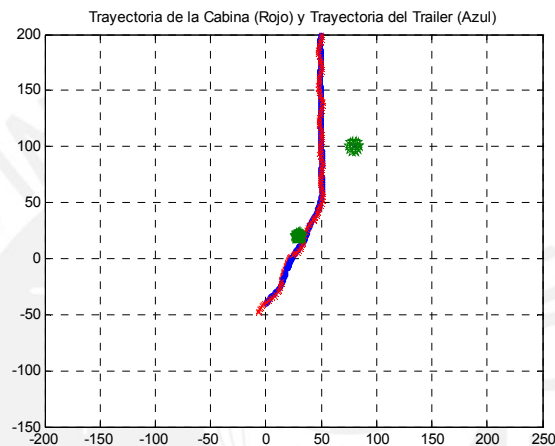


Figura 4.41. Simulación # 2 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.42, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión evade correctamente el obstáculo presentado en la ruta.

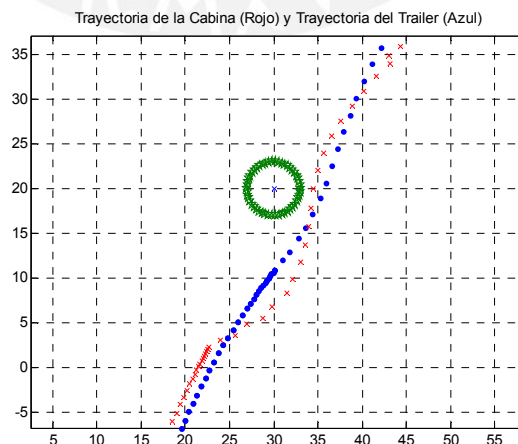


Figura 4.42. Simulación # 2 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.43. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 42° y -42° cuando interactúa con el obstáculo en la ruta.

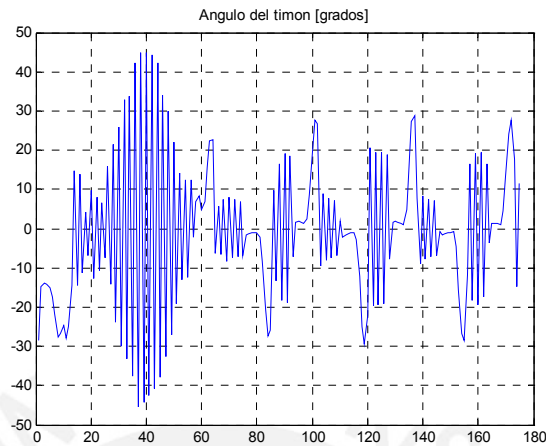


Figura 4.43. Simulación # 2 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 15Km/h y 3Km/h durante 30 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.44.

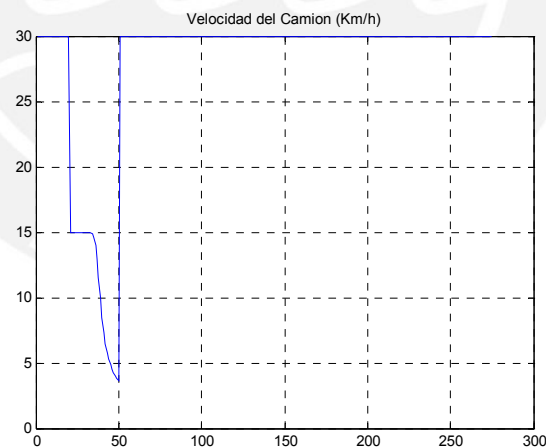


Figura 4.44. Simulación # 2 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.13:

Tabla 4.13. Error de variables para la simulación # 2 con controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	49.9585	90	89.8127	30	30
2	50	50.0659	90	89.704	30	30
3	50	50.0892	90	89.8165	30	30
4	50	50.1116	90	89.3824	30	30
5	50	50.0929	90	90.5141	30	30
6	50	50.0148	90	90.1389	30	30
7	50	49.8754	90	90.8605	30	30
8	50	49.6995	90	90.9871	30	30
9	50	49.5233	90	90.1065	30	30
10	50	49.7871	90	90.0048	30	30

X promedio	49.9218	Ang promedio	90.1328	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0782	Ang error promedio	0.1328	V error promedio	0.0000
X error max	0.4767	Ang error max	0.9871	V error max	0.0000
X error min	0.1116	Ang error min	0.6176	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

En la tercera simulación se utilizan los valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 25
- Coordenada inicial y : -25
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 0
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 90
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso y para el estacionamiento con obstáculos, tomando como referencia el área de carga en el punto más bajo del tajo abierto de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.45. Se observa que el camión converge al valor deseado luego de un recorrido de 70m aprox., evadiendo los obstáculos en la ruta.

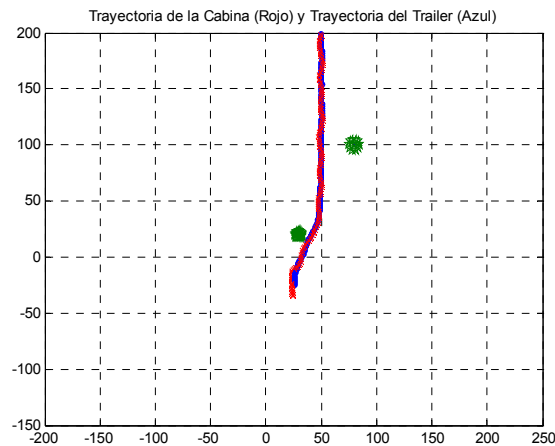


Figura 4.45. Simulación # 3 - Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

A continuación se muestra la Fig. 4.46, donde se realiza una ampliación de la evasión del obstáculo, y se observa que el camión evade correctamente el obstáculo presentado en la ruta.

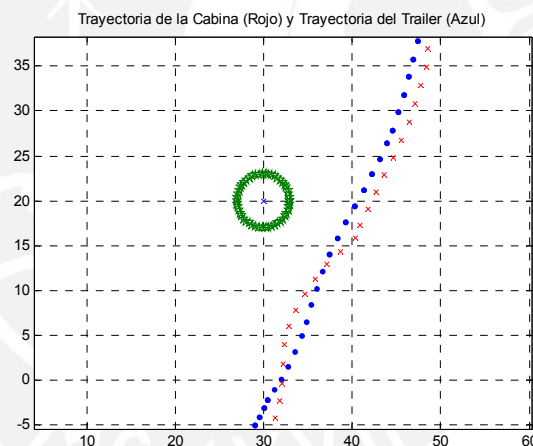


Figura 4.46. Simulación # 3 – Vista amplia de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el estacionamiento con obstáculos, se muestra en la Fig. 4.47. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 20° y -20° cuando interactúa con el obstáculo en la ruta.

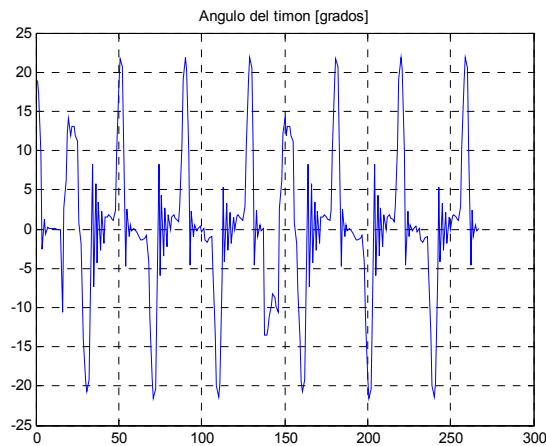


Figura 4.47. Simulación # 3 – Ángulo del timón del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos, disminuye hasta 15Km/h durante 10 segundos que el camión evade el obstáculo en ruta, tal cual se observa en la Fig. 4.48.

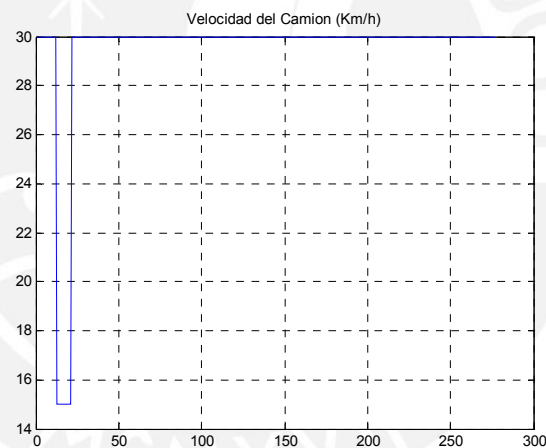


Figura 4.48. Simulación # 3 - Velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

El error de cada variable de salida del camión para ésta interacción, se muestra en la siguiente Tabla 4.14:

Tabla 4.14. Error de variables para la simulación # 3 con controlador neurodifuso para estacionamiento con obstáculos.

	X deseado	X real	Ang. deseado	Ang. real	V deseada	V real
1	50	50.1273	90	89.3276	30	30
2	50	50.2692	90	89.8715	30	30
3	50	50.3478	90	89.6142	30	30
4	50	50.3425	90	90.2049	30	30
5	50	50.3034	90	90.0733	30	30
6	50	50.2188	90	90.3121	30	30
7	50	50.0878	90	90.6035	30	30
8	50	49.9274	90	90.4775	30	30
9	50	49.7665	90	90.5662	30	30
10	50	49.6394	90	90.6353	30	30
X promedio	50.1030	Ang promedio	90.1686	V promedio	30.0000	
X error promedio	0.1030	Ang error promedio	0.1686	V error promedio	0.0000	
X error max	0.3606	Ang error max	0.6724	V error max	0.0000	
X error min	0.3478	Ang error min	0.6353	V error min	0.0000	

Fuente: Elaboración Propia.

4.2.3. CONTROLADOR NEURODIFUSO PARA TRAYECTORIA

A continuación se muestran las simulaciones del controlador neurodifuso para el control por trayectoria, es decir de tramo a tramo, en el cual se desplaza el camión articulado alrededor de la mina Cerro Verde.

Este tipo de interacción es similar al funcionamiento de un sistema GPS, donde se designan 2 puntos en el cual el camión tiene que desplazarse sin problemas. Las rutas en las cuales se simula el controlador, se muestra en la Fig. 4.49, donde se definen rectas y curvas, indicando la pendiente respectiva y las coordenadas iniciales y finales de desplazamiento del camión de dos cuerpos.

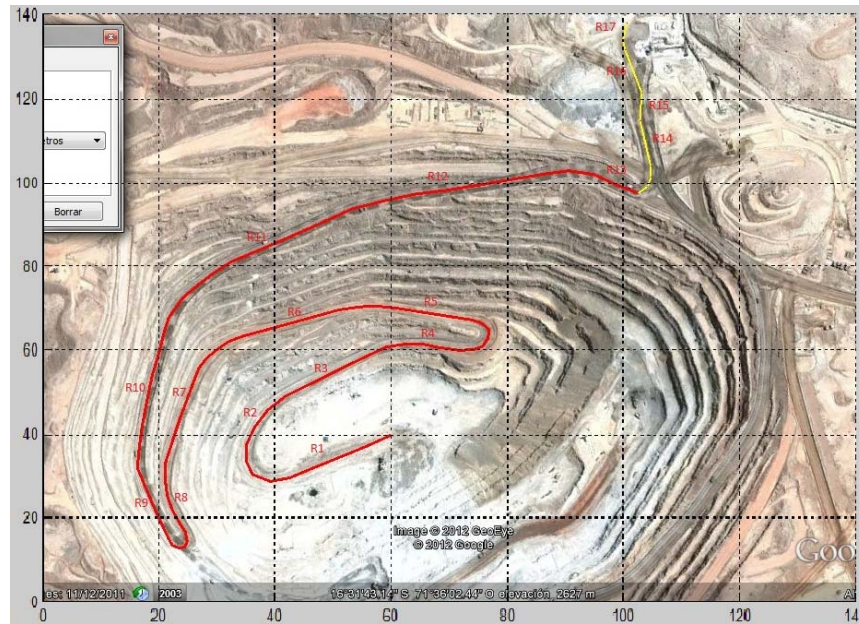


Figura 4.49. Desplazamiento del camión minero de dos cuerpos en la mina Cerro Verde.

Para la primera trayectoria R1 y para valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 105
- Coordenada inicial y : 50
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 90
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 90
- Coordenada final de x [50]: 50

La definición de las variables de entrada en el programa de simulación, para el seguimiento de trayectoria del camión minero articulado con el controlador neurodifuso, se muestra en la siguiente Fig. 4.50:

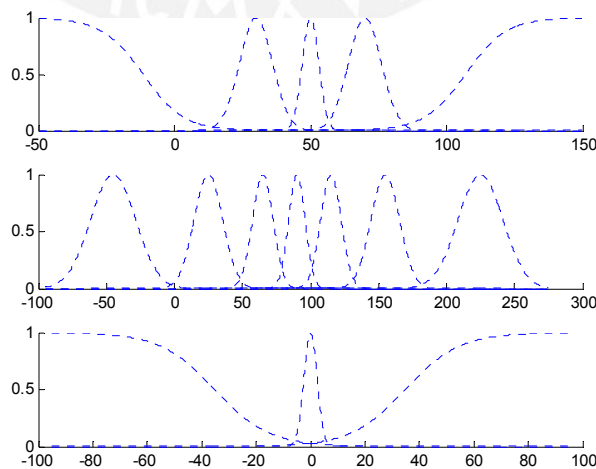


Figura 4.50. Fuzzificación de variables de entrada por programa para el seguimiento de Trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso.

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso tomando la recta R1 de la ruta de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.51. Se observa que el camión converge a la recta y pendiente deseados luego de 50m aprox. de recorrido.

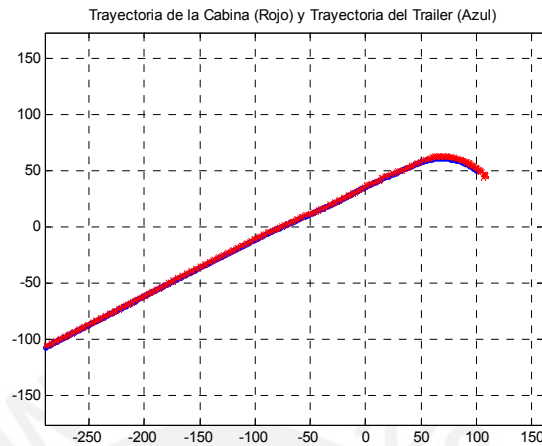


Figura 4.51. Simulación # 1 – Seguimiento de trayectoria R1 del camión minero con el controlador neurodifuso.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el control de trayectoria, se muestra en la Fig. 4.52. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 20° y -20° cuando interactúa con la recta R1.

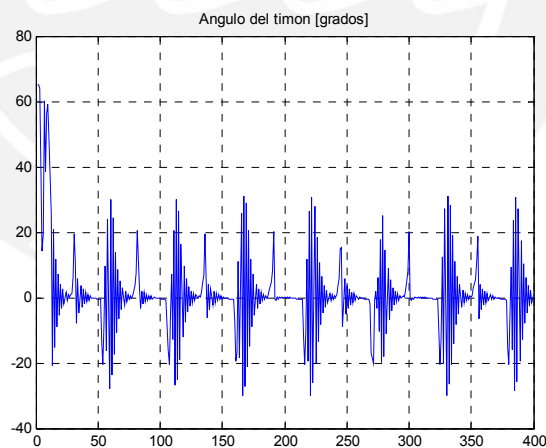


Figura 4.52. Simulación # 1 – Ángulo del timón del camión para el seguimiento de trayectoria R1 del camión minero con el controlador neurodifuso.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para el control por trayectoria para la ruta R1, se mantiene constante a 30Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se muestra en la Fig. 4.53.

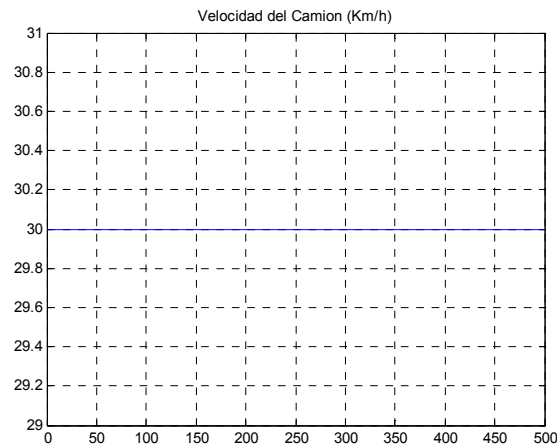


Figura 4.53. Simulación # 1 – Velocidad del camión para el seguimiento de trayectoria R1 del camión minero con el controlador neurodifuso.

Para la sexta recta R6 y para valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 30
- Coordenada inicial y : 60
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 20
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 210
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso tomando la recta R6 de la ruta de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.54. Se observa que el camión converge a la recta y pendiente deseados luego de 50m aprox. de recorrido.

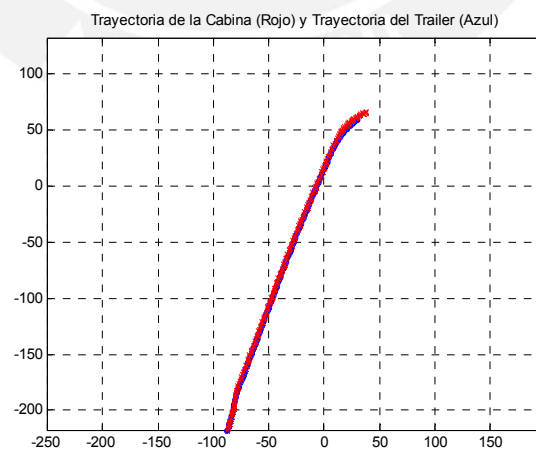


Figura 4.54. Simulación # 2 – Seguimiento de trayectoria R6 del camión minero con el controlador neurodifuso.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el control de trayectoria, se muestra en la Fig. 4.55. Se observa que el camión posee una leve oscilación entre los valores de 9° y -9° cuando interactúa con la recta R6.

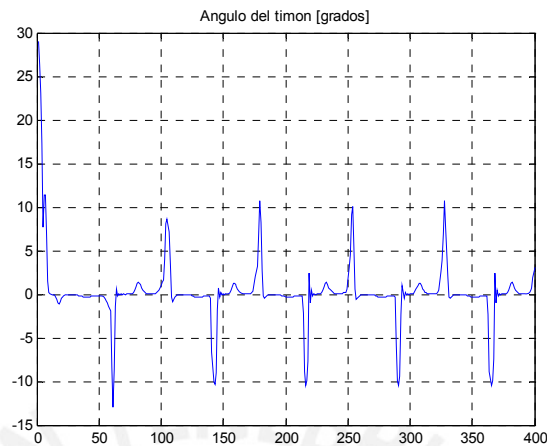


Figura 4.55. Simulación # 2 – Ángulo del timón del camión para el seguimiento de trayectoria R6 del camión minero con el controlador neurodifuso.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para el control por trayectoria para la ruta R6, se mantiene constante a 30Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se muestra en la Fig. 4.56.

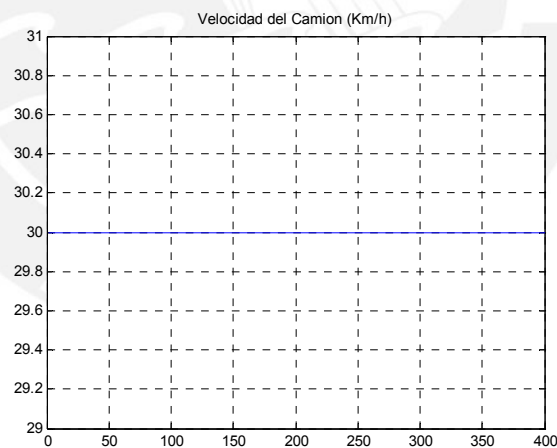


Figura 4.56. Simulación # 2 – Velocidad del camión para el seguimiento de trayectoria R6 del camión minero con el controlador neurodifuso.

Para la décima recta R10 y para valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 15
- Coordenada inicial y : 30
- Ángulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 20
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 80
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso tomando la recta R10 de la ruta de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.57. Se observa que el camión converge a la recta y pendiente deseados luego de 25m aprox. de recorrido.

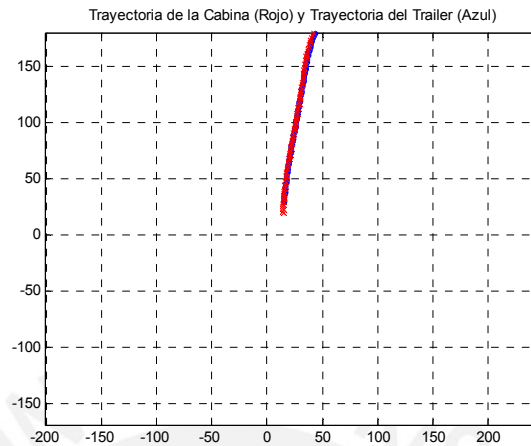


Figura 4.57. Simulación # 3 – Seguimiento de trayectoria R10 del camión minero con el controlador neurodifuso.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el control de trayectoria, se muestra en la Fig. 4.58. Se observa que el camión converge a un valor cercano a cero cuando interactúa con la recta R10.

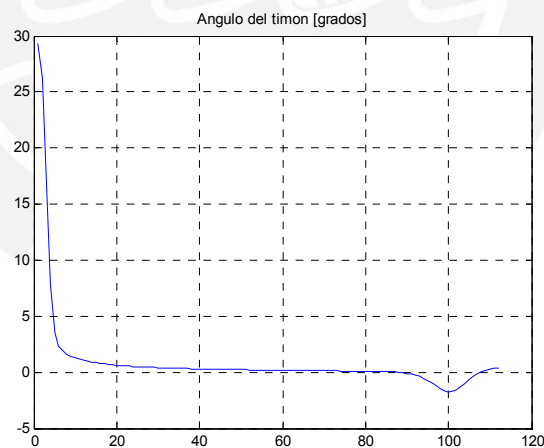


Figura 4.58. Simulación # 3 – Ángulo del timón del camión para el seguimiento de trayectoria R10 del camión minero con el controlador neurodifuso.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para el control por trayectoria para la ruta R10, se mantiene constante a 30Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se muestra en la Fig. 4.59.

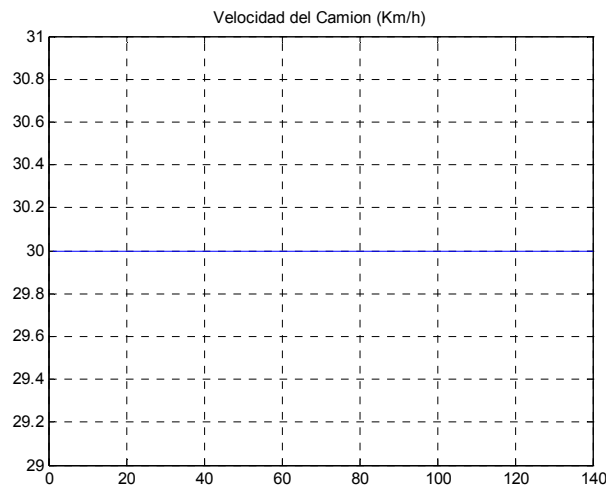


Figura 4.59. Simulación # 3 – Velocidad del camión para el seguimiento de trayectoria R10 del camión minero con el controlador neurodifuso.

Para la onceava recta R11 y para valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 15
- Coordenada inicial y : 70
- Angulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: -70
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 140
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso tomando la recta R11 de la ruta de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.60. Se observa que el camión converge a la recta y pendiente deseados luego de 20m aprox. de recorrido.

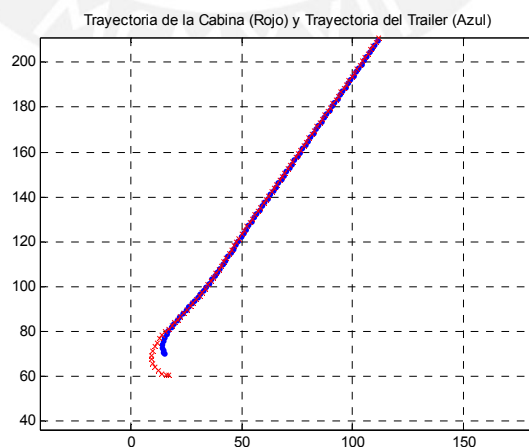


Figura 4.60. Simulación # 4 – Seguimiento de trayectoria R11 del camión minero con el controlador neurodifuso.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el control de trayectoria, se muestra en la Fig. 4.61. Se observa que el camión converge a un valor de cero luego de 40 segundos de interactuar con la recta R11.

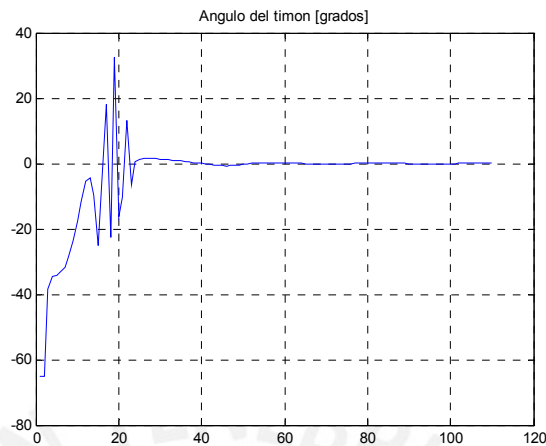


Figura 4.61. Simulación # 4 – Ángulo del timón del camión para el seguimiento de trayectoria R11 del camión minero con el controlador neurodifuso.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para el control por trayectoria para la ruta R11, se mantiene constante a 30Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se muestra en la Fig. 4.62.

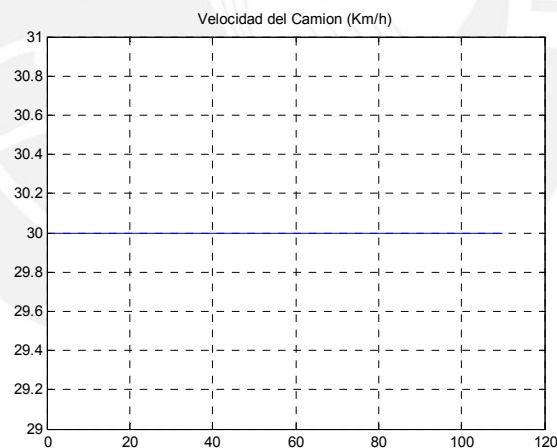


Figura 4.62. Simulación # 4 – Velocidad del camión para el seguimiento de trayectoria R11 del camión minero con el controlador neurodifuso.

Para la catorceava recta R14 y para valores de:

- Coordenada inicial x [0 a 100]: 100
- Coordenada inicial y : 100
- Ángulo entre la cabina y el trailer CT [-90 a 90]: 70
- Inclinación inicial del trailer T [-90 a 270]: 20
- Coordenada final de x [50]: 50

La respuesta de la trayectoria del camión minero con el controlador neurodifuso tomando la recta R14 de la ruta de la mina Cerro Verde, se muestra en la Fig. 4.63. Se observa que el camión converge a la recta y pendiente deseados luego de 30m aprox. de recorrido.

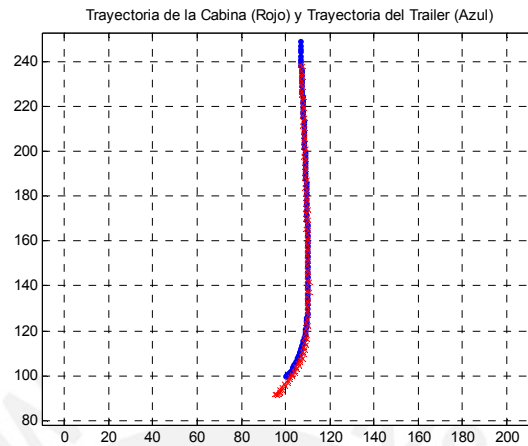


Figura 4.63. Simulación # 5 – Seguimiento de trayectoria R14 del camión minero con el controlador neurodifuso.

El ángulo del camión minero con el controlador neurodifuso para el control de trayectoria, se muestra en la Fig. 4.64. Se observa que el camión converge a un valor cercano a cero cuando interactúa con la recta R14.

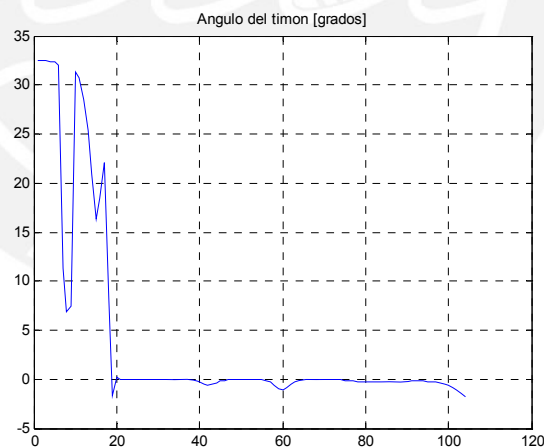


Figura 4.64. Simulación # 5 – Ángulo del timón del camión para el seguimiento de trayectoria R14 del camión minero con el controlador neurodifuso.

La velocidad del camión minero con el controlador neurodifuso para el control por trayectoria para la ruta R14, se mantiene constante a 30Km/h durante todo el recorrido del camión, tal cual se muestra en la Fig. 4.65.

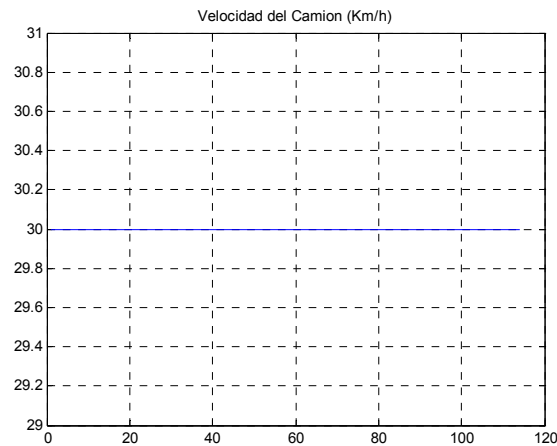


Figura 4.65. Simulación # 5 – Velocidad del camión para el seguimiento de trayectoria R14 del camión minero con el controlador neurodifuso.

4.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE EL CONTROLADOR DIFUSO Y NEURODIFUSO

4.3.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS CONTROLADORES DIFUSO Y NEURODIFUSO PARA EL ESTACIONAMIENTO DEL CAMIÓN MINERO ARTICULADO SIN OBSTÁCULOS

Las simulaciones mostradas en el punto anterior, manifiestan el comportamiento del camión minero de dos cuerpos para el estacionamiento en un lugar estratégico y definido por coordenadas, tan igual como funciona un sistema GPS. Esta interacción del camión con las rutas y lugares de estacionamiento de la mina Cerro Verde, son obtenidas a través del diseño de un controlador difuso y un controlador neurodifuso, con la finalidad de comparar resultados y definir el mejor control para ésta necesidad.

A continuación mostraremos tablas de comparación de resultados (ver de la Tabla 4.15 a la Tabla 4.22) de cada simulación para el estacionamiento sin obstáculos, del camión minero de dos cuerpos mediante un control difuso y un control neurodifuso:

Tabla 4.15. Resultados de simulación # 1 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.2528	Ang promedio	89.8665	V promedio	35.0000
X error promedio	0.2528	Ang error promedio	2.0611	V error promedio	0.0000
X error max	2.1539	Ang error max	3.3763	V error max	0.0000
X error min	2.0870	Ang error min	3.3569	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.16. Resultados de simulación # 1 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.0334	Ang promedio	90.4817	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0334	Ang error promedio	0.4817	V error promedio	0.0000
X error max	0.4858	Ang error max	1.6444	V error max	0.0000
X error min	0.3998	Ang error min	0.8783	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.17. Resultados de simulación # 2 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.3645	Ang promedio	88.9286	V promedio	35.0000
X error promedio	0.3644	Ang error promedio	0.5481	V error promedio	0.0000
X error max	2.0278	Ang error max	3.7901	V error max	0.0000
X error min	2.0164	Ang error min	0.8216	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.18. Resultados de simulación # 2 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	49.8214	Ang promedio	90.1042	V promedio	30.0000
X error promedio	0.1786	Ang error promedio	0.2338	V error promedio	0.0000
X error max	0.3871	Ang error max	1.1013	V error max	0.0000
X error min	0.2922	Ang error min	0.9737	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.19. Resultados de simulación # 3 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.1509	Ang promedio	90.8220	V promedio	35.0000
X error promedio	0.1509	Ang error promedio	4.6935	V error promedio	0.0000
X error max	1.9668	Ang error max	4.6935	V error max	0.0000
X error min	1.1689	Ang error min	2.4991	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.20. Resultados de simulación # 3 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	49.8631	Ang promedio	90.1588	V promedio	30.0000
X error promedio	0.1369	Ang error promedio	0.1588	V error promedio	0.0000
X error max	0.5034	Ang error max	1.8627	V error max	0.0000
X error min	0.2432	Ang error min	0.6475	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.21. Resultados de simulación # 4 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.4687	Ang promedio	89.1098	V promedio	35.0000
X error promedio	0.4687	Ang error promedio	0.8200	V error promedio	0.0000
X error max	2.1978	Ang error max	3.1541	V error max	0.0000
X error min	0.7596	Ang error min	0.9813	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.22. Resultados de simulación # 4 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero sin obstáculos.

X promedio	50.3393	Ang promedio	90.2565	V promedio	30.0000
X error promedio	0.6333	Ang error promedio	0.2565	V error promedio	0.0000
X error max	0.6400	Ang error max	1.5768	V error max	0.0000
X error min	0.0272	Ang error min	0.9289	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LOS CONTROLADORES DIFUSO Y NEURODIFUSO PARA EL ESTACIONAMIENTO DEL CAMIÓN MINERO ARTICULADO CON OBSTÁCULOS

A continuación mostraremos tablas de comparación de resultados (ver de la Tabla 4.23 a la Tabla 4.28) de cada simulación para el estacionamiento con obstáculos, del camión minero de dos cuerpos mediante un control difuso y un control neurodifuso:

Tabla 4.23. Resultados de simulación # 1 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	50.0526	Ang promedio	90.6478	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0526	Ang error promedio	0.6478	V error promedio	0.0000
X error max	1.1016	Ang error max	4.7557	V error max	0.0000
X error min	1.0204	Ang error min	3.5874	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.24. Resultados de simulación # 1 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	50.1426	Ang promedio	90.0605	V promedio	30.0000
X error promedio	0.2285	Ang error promedio	0.0605	V error promedio	0.0000
X error max	0.4667	Ang error max	0.8443	V error max	0.0000
X error min	0.2439	Ang error min	0.5688	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.25. Resultados de simulación # 2 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	49.5901	Ang promedio	90.5368	V promedio	30.0000
X error promedio	0.4099	Ang error promedio	3.5935	V error promedio	0.0000
X error max	1.8153	Ang error max	4.1719	V error max	0.0000
X error min	0.2484	Ang error min	3.5935	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.26. Resultados de simulación # 2 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	49.9218	Ang promedio	90.1328	V promedio	30.0000
X error promedio	0.0782	Ang error promedio	0.1328	V error promedio	0.0000
X error max	0.4767	Ang error max	0.9871	V error max	0.0000
X error min	0.1116	Ang error min	0.6176	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.27. Resultados de simulación # 3 del controlador difuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	50.1939	Ang promedio	90.1955	V promedio	30.0000
X error promedio	0.2531	Ang error promedio	0.1955	V error promedio	0.0000
X error max	1.7346	Ang error max	5.0531	V error max	0.0000
X error min	1.3134	Ang error min	4.2200	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.28. Resultados de simulación # 3 del controlador neurodifuso para el estacionamiento del camión minero con obstáculos.

X promedio	50.1030	Ang promedio	90.1686	V promedio	30.0000
X error promedio	0.1030	Ang error promedio	0.1686	V error promedio	0.0000
X error max	0.3606	Ang error max	0.6724	V error max	0.0000
X error min	0.3478	Ang error min	0.6353	V error min	0.0000

Fuente: Elaboración Propia.

De los resultados mostrados anteriormente, podemos concluir que el controlador neurodifuso presenta menor error en sus variables de salida (posición “x”, ángulo del camión “angT” y velocidad del camión “V”), a comparación de los resultados del controlador difuso.

Es decir, que el camión minero de dos cuerpos presenta un mejor comportamiento con un controlador neurodifuso, lo cual le permite cumplir con los objetivos planteados en esta tesis.

4.4. PROPUESTA DE APLICACIÓN DEL CONTROLADOR NEURODIFUSO DISEÑADO

La detección de obstáculos y puntos de estacionamiento del camión minero 740 Caterpillar será determinado a través de los sensores de ultrasonido, los cuales serán distribuidos en la parte frontal, trasera y lateral del camión.

Existen dos tipos de sensores de ultrasonido: de corto alcance y de largo alcance; este detalle es con la finalidad de obtener un barrido más detallado del lugar de interacción, es decir, objetos o personas que estén cerca y/o lejos del camión minero con la finalidad de evitar accidentes y obtener el mayor beneficio de operación de la maquinaria.

A continuación se muestra la Tabla 4.29, con la relación de los componentes electrónicos necesarios para la implementación del diseño del controlador neurodifuso para la conducción autónoma del camión minero 740 de dos cuerpos, mostrado anteriormente.

Tabla 4.29. Componentes electrónicos distribuidos en el camión articulado 740 Caterpillar para su implementación del controlador neurodifuso.

Componente	Localización en el Plano	Localización en el Camión
Interruptor - Detección de Objeto	D-4	1
Cámara - Frontal	B-6	2
Cámara - Izquierda	B-6	3
Cámara - Posterior	B-6	4
Cámara - Derecha	A-7	5
Controlador - Detección Objetos	C-2	6
Convertidor - 20A	D-2	7
Lámpara - Cámara Izquierda	E-2	8
Lámpara - Cámara Derecha	B-1	9
Sensor Ultrasonido - Frontal Izquierda - Largo Alcance	E-1	10
Sensor Ultrasonido - Frontal Derecha - Largo Alcance	D-1	11
Sensor Ultrasonido - Frontal Izquierda - Corto Alcance	E-1	12
Sensor Ultrasonido - Frontal Derecha - Corto Alcance	D-1	13
Sensor Ultrasonido - Izquierda A - Largo Alcance	E-2	14
Sensor Ultrasonido - Izquierda B - Largo Alcance	E-2	15
Sensor Ultrasonido - Derecha A - Largo Alcance	C-1	16
Sensor Ultrasonido - Derecha B - Largo Alcance	C-1	17
Sensor Ultrasonido - Posterior Izquierda - Largo Alcance	E-7	18
Sensor Ultrasonido - Posterior Derecha - Largo Alcance	D-7	19
Sensor Ultrasonido - Posterior Izquierda - Corto Alcance	E-7	20
Sensor Ultrasonido - Posterior Derecha - Corto Alcance	D-7	21
Relay - Alimentación Principal	C-4	22
Resistencia - Can 1 Term A	C-2	23
Resistencia - Can 1 Term B	E-1	24
Resistencia - Can 2 Term A	C-7	25
Resistencia - Can 2 Term B	B-1	26
Switch - Lámpara de Cámara	C-2	27

Fuente: Elaboración Propia.

La ubicación de los sensores de ultrasonido delanteros, será tal cual se muestra en la Fig. 4.66 en la cual se indica la posición de los 2 sensores de corto alcance y los 2 sensores de largo alcance, con la finalidad de obtener un barrido mayor del área de interacción.

Se recomienda también la instalación de una cámara que estará ubicada en la parte frontal superior del camión de dos cuerpos. Los números indicados en la Fig. 4.66 tienen relación con la tabla 52 mostrada anteriormente.

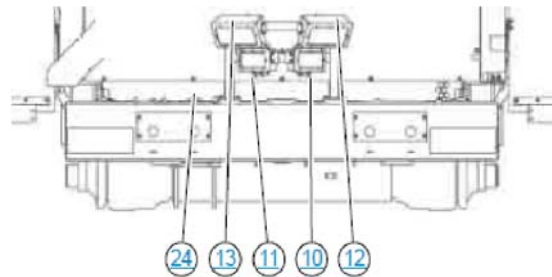


Figura 4.66. Distribución delantera de los sensores de ultrasonido de corto y largo alcance.

La ubicación de los sensores a instalarse en la parte posterior del camión minero, serán 2 de largo alcance y 2 de corto alcance, distribuidos tal como se muestra en la Fig. 4.67. De manera adicional se recomienda la instalación de una cámara que estará conectada hacia un panel que le permitirá ver al conductor sobre obstáculos pequeños, persona u objetos fuera del área de monitoreo de los sensores de ultrasonido. Estas cámaras son consideradas como una herramienta adicional y confiable para el operador del camión, el cual sólo monitoreará el sistema de control diseñado.

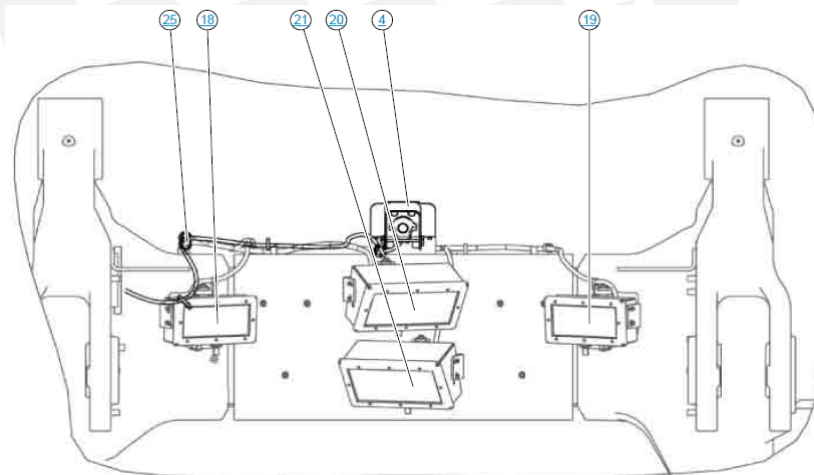


Figura 4.67. Distribución trasera de los sensores de ultrasonido de corto y largo alcance.

La ubicación de los sensores laterales (Fig. 4.68), serán sólo dos de largo alcance por cada lado. Éstos sensores tienen la finalidad de detectar personas cercas a la máquina, es por ello que como un planteamiento opcional se plantea el uso de una cámara y lámpara opcional para observar algunas eventualidades en la parte lateral del camión.

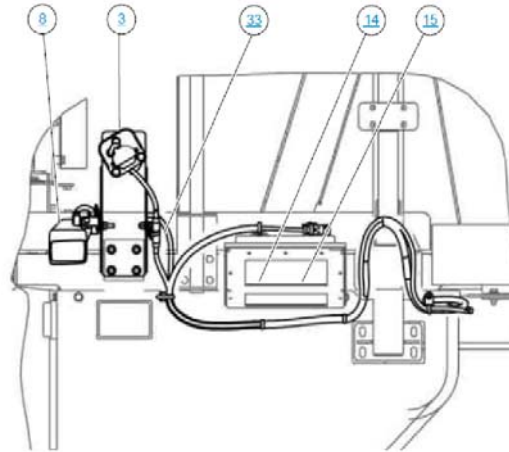


Figura 4.68. Distribución lateral de los sensores de ultrasonido, lámpara y cámara.

En el Anexo 6 se muestra el plano eléctrico de las conexiones de los sensores de ultrasonido, cámaras, lámparas, controlador, y demás componentes electrónicos. Se ha utilizado la mayor parte de cables, conectores y componentes electrónicos de la marca Caterpillar, es por ello que se le ha agregado un número de la siguiente característica xxx-xxxx o xx-xxxx, el cual es el número de parte del objeto (Fig. 4.69).

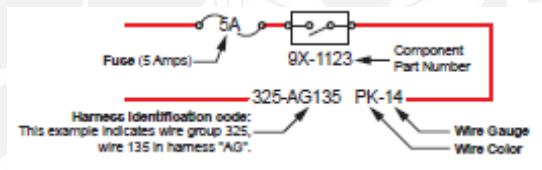










Figura 4.69. Descripción de las conexiones electrónicas, según la nomenclatura utilizada por Caterpillar.

A continuación se muestra la Tabla 4.30 en la cual se describe el tipo de información o señal que transmiten los cables según su color:

Tabla 4.30. Señal de los cables según su color.

WIRE GROUP COLOR DESCRIPTIONS	
	GROUND CIRCUIT
	WIRES THAT HAVE SYSTEM VOLTAGE WHEN THE KEY SWITCH IS OFF
	WIRES THAT HAVE SYSTEM VOLTAGE WHEN THE KEY SWITCH IS ON
	VOLTAGE CONVERTER OUTPUT CIRCUIT
	CAT DATA LINK
	CAN 1 DATA LINK
	CAN 2 DATA LINK
OTHER COLOR DESCRIPTIONS	
	HIGHWAYS

Fuente: Caterpillar.

Después de cada bus de datos se disponen de conectores comunes en los cuales se identifican el tipo de cable a utilizarse. Las tres primeras letras y el color del cable indican la descripción del tipo de circuito, según la Tabla 4.31:

Tabla 4.31. Descripción del número de conexión y color de cable.

Wire Description		
Wire Number	Wire Color	Description
Power Circuits		
109	RD	Main Power Relay
130	GN	Power Obstacle Detection
Ground Circuits		
200	BK	Ground
C234	BK	Sensor Return
Basic Machine Circuits		
308	YL	Key Switch Input
Accessory Circuits		
C569	YL	12V Output
Lighting Circuits		
614	PU	Backlighting
633	BU	Side Floods
Ground Circuits		
F711	GN	Can 1 Data Link +
F712	GY	Can 1 Data Link -
892	BR	Cat Data Link -
893	GN	Cat Data Link +
K900	YL	Can 2 Data Link +
K990	GN	Can 2 Data Link -

Fuente: Caterpillar.

La conexión más importante de la recomendación de la implementación del controlador neurodifuso, es la señal que se envía desde el convertidor a 20A por medio de la conexión 308-CM9 YL-16, hacia un relay de potencia con switch magnético, el cual se mantendrá cerrado por medio de la activación de su electroimán cuando fluya corriente a través de este dispositivo. Esta señal es enviada a través de la conexión 109-CM29 RD-12 hacia un conmutador (20A), el cual permitirá enviar 20A de corriente, que posteriormente es transformado en voltaje por medio de una resistencia, y permite ingresar 24V al convertidor de 20A. Así mismo este voltaje es enviado hacia un switch manual que se dispone físicamente en la cabina del camión y permite activar las lámparas opcionales de manera manual, las cuales fueron recomendadas en la implementación (Fig. 4.70).

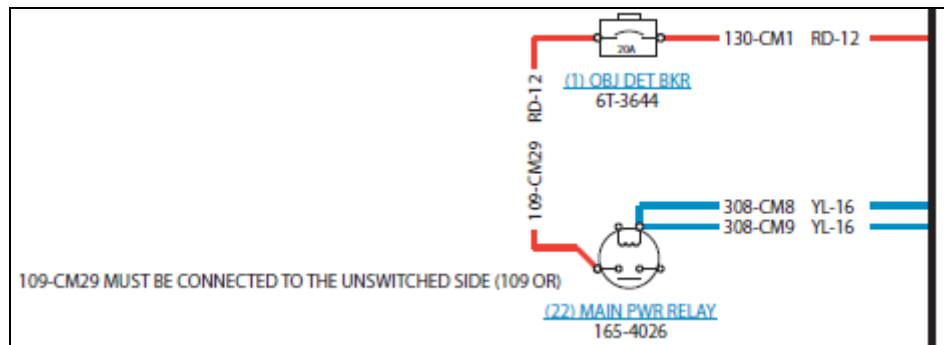


Figura 4.70. Switch magnético de detección de objetos cercanos al camión articulado.

La primera señal de salida del controlador será conectada hacia los solenoides de la transmisión del camión minero (ver Fig. 4.71 y Fig.4.72) para modificar la variable de salida “velocidad”, según lo disponga el controlador neurodifuso.

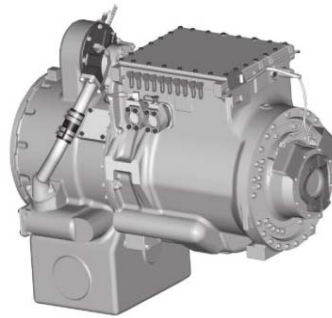


Figura 4.71. Transmisión del camión minero 740.

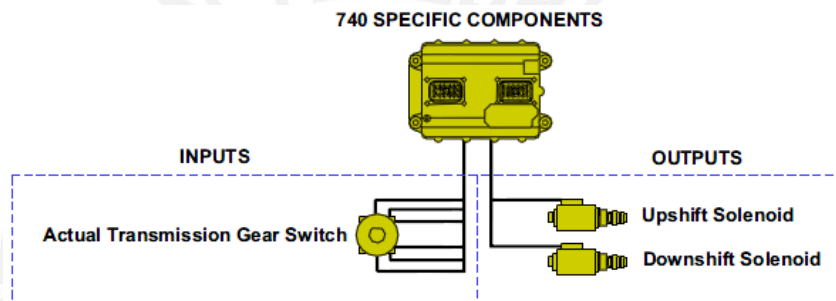


Figura 4.72. Velocidad del camión minero por medio de la comunicación con los solenoides de la transmisión del camión minero 740.

La segunda señal de salida del controlador será conectada hacia el motor acoplado en la cremallera de la dirección del camión minero (Fig. 4.73), con el propósito de variar el ángulo del timón de la maquinaria con el objetivo de obtener la conducción autónoma.

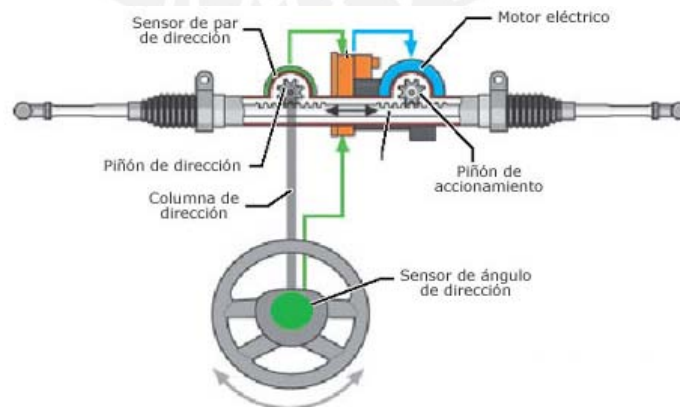


Figura 4.73. Funcionamiento de la salida de giro del timón del camión minero 740.

4.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- Se desarrollaron las ecuaciones del modelo del camión minero de dos cuerpos, tomando como referencia el paper de Seon-Gon Kong and Bart Kosko “*Adaptative Fuzzy Systems for Backing up a Truck-and-Trailer*” [10].
- Se utilizó el método “singleton” para la fuzzificación de las variables de entrada del controlador difuso y neurodifuso.
- Se obtuvo la base de reglas de inferencia del controlador neurodifuso por medio de una entrevista con operadores de la mina Cerro Verde, en la cual manifestaron su experiencia y habilidades para la conducción adecuada de un camión minero de dos cuerpos.
- Se utilizó el método “centroid” (centro de gravedad) para la defuzzificación del controlador difuso y neurodifuso para obtener los variables de salida.
- Se ajustó la base de reglas inicialmente obtenidas por los operadores, con la finalidad de obtener menor error, menor tiempo de establecimiento y mejor comportamiento del camión minero de dos cuerpos.
- El sistema utilizado para el diseño de los controladores difuso y neurodifuso, fue de tipo Mamdani.
- Se limitó el giro entre la cabina del camión y el tráiler, a un valor de $\pm 90^\circ$, para evitar el impacto entre ambas partes del camión articulado y asimilarlo con la realidad, con el objetivo de evitar excesos de giro o jacknife.
- El controlador neurodifuso diseñado es de modelo cooperativo con agrupamiento sustractivo, y no se consideran pesos sinápticos entre sus conexiones. Es decir que el controlador no ha sido entrenado.
- Se estableció un sistema de control en cascada, mediante la conexión de dos controladores neurodifusos que entrarán en contacto con la planta si se desea estacionar el camión articulado en retroceso en los puntos de carga o descarga de material, o si se desea seguir una trayectoria para movilizar el camión articulado de manera frontal de un área a otra.
- Se colocaron obstáculos en el área de estacionamiento en retroceso del camión minero de dos cuerpos, con la finalidad de obtener una respuesta más relacionada con la realidad ante un derrumbe de piedras o vehículos presentes en las rutas del camión articulado.
- En las simulaciones de estacionamiento del camión minero articulado, se consideró como objetivos: la coordenada “x” con valor de 50, el ángulo del tráiler “ φ_t ” con valor de 90° , el ángulo entre la cabina y el tráiler, “ φ_{ct} ” con valor de 0° .
- Se comprobó que el controlador neurodifuso proporciona un menor error, menor tiempo de interacción y mejor comportamiento del camión minero de dos cuerpos en las rutas de la minera Cerro Verde.

- Se comprobó que el controlador difuso obtiene mayor error y no interactúa de manera correcta ante el estacionamiento del camión minero de dos cuerpos con obstáculos en la ruta.
- Se evidenció mediante simulación, que el error máximo presentado por el ángulo del tráiler “ φ_t ” en el controlador difuso, es de 4.6935° cuando el camión articulado se estaciona en retroceso sin obstáculos en ruta y es de 5.0531° cuando el camión articulado se estaciona en retroceso con obstáculos en ruta.
- Se evidenció mediante simulación, que el error máximo presentado por el ángulo del tráiler “ φ_t ” en el controlador neurodifuso, es de 1.8627° cuando el camión articulado se estaciona en retroceso sin obstáculos en ruta y es de 0.9871° cuando el camión articulado se estaciona en retroceso con obstáculos en ruta.
- Se evidenció mediante simulación, que el error máximo presentado por la coordenada final “x” en el controlador difuso, es de 2.1978m cuando el camión articulado se estaciona en retroceso sin obstáculos en ruta y es de 1.8153m cuando el camión articulado se estaciona en retroceso con obstáculos en ruta.
- Se evidenció mediante simulación, que el error máximo presentado por la coordenada final “x” en el controlador neurodifuso, es de 0.6400m cuando el camión articulado se estaciona en retroceso sin obstáculos en ruta y es de 0.4767m cuando el camión articulado se estaciona en retroceso con obstáculos en ruta.
- Se evidenció mediante simulación, que el error de la velocidad del camión articulado “V” en el controlador difuso y neurodifuso, presenta un valor de cero.
- Se comparó el comportamiento y los errores del controlador neurodifuso y del controlador difuso, mediante la interacción del camión minero de dos cuerpos en los sectores de estacionamiento de la mina Cerro Verde, obteniendo un mejor comportamiento mediante el controlador neurodifuso.
- Los dispositivos y conexiones necesarias para la implementación del diseño del controlador neurodifuso para un camión minero articulador 740 de Caterpillar se muestran en la presente tesis, siguiendo el alineamiento de las nomenclaturas de Caterpillar, con el objetivo de un claro entendimiento y ejecución.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio sobre el principio de funcionamiento de los camiones mineros más usados en la actualidad en el sector minero, detallando sus sistemas de control de ambas marcas de vehículos y considerando que los camiones articulados o de dos cuerpos, son más complicados de maniobrar en un ámbito tan difícil como es la mina de tajo abierto, que está sujeta a objetos intempestivos y maquinaria adicional que interactúa con los diferentes puntos de la mina.

Se desarrolló el modelo matemático del camión articulado y se indicó las variables de entrada y salida del controlador, así mismo se definió el ámbito de simulación real al que estará sujeto la planta para observar el desempeño del camión de dos cuerpos, es por ello que se capturó fotografías satelitales de la mina Cerro Verde, y se definió rectas de ruta desde el lugar más bajo del tajo abierto (zona de carga de material) hasta el punto más común de su desplazamiento (área de chancado). Estas rectas se realizaron a través de un mapeo a la ruta planteada, y se definió por coordenadas cada punto que interactuará con el camión. Las coordenadas se definieron de manera similar al funcionamiento de un sistema GPS.

Mediante el uso de las técnicas de control avanzado, se diseñó un sistema de control avanzado que interrelaciona la lógica difusa con redes neuronales, lo cual constituye un control neurodifuso que permitió añadir al diseño la experiencia del conductor sobre el adecuado manejo del vehículo articulado para otorgar respuestas deseadas de conducción. Luego se realizó un ajuste de la base de reglas para obtener una respuesta más adecuada de la planta ante la interacción con obstáculos al momento de estacionarse y para el desplazamiento por las rutas de la mina Cerro Verde.

Como variante alternativa se diseñó un controlador difuso con las mismas variables de entrada y de salida que se usaron para el controlador neurodifuso. Este diseño se realizó con la intención de definir el controlador más apropiado para la conducción del camión minero articulado.

Se realizó una comparación entre ambos controladores basándonos en el comportamiento del camión minero articulado en los lugares de estacionamiento sin obstáculos, puntos de estacionamiento con obstáculos y seguimiento de trayectoria. Se obtuvo gráficas de simulación y valores de las variables de salida, las cuales nos permitió observar el desempeño del camión y conocer la amplitud del error de cada variable. Estas simulaciones y comparaciones fueron desarrolladas en el software Matlab y nos permitió definir al controlador neurodifuso como el diseño más adecuado para la necesidad de conducción del camión minero articulado o de dos cuerpos Caterpillar 740.

Se plasmó la propuesta de implementación del diseño del controlador neurodifuso, con la factibilidad de orientarlo a la aplicación en el camión articulado Caterpillar 740. Se describen los sensores de ultrasonido a utilizar para detectar obstáculos y cercanía del objetivo, los sensores de giro para la dirección del camión y para el giro entre la cabina y el tráiler, cámaras y luz alternativa para observar alrededor del camión cuando un operador este en la cabina del vehículo minero. Así mismo se explica según la terminología de Caterpillar, la conexión eléctrica a la que estarían sujetos estos dispositivos, con la intención que sea fácilmente entendido y aplicable.



RECOMENDACIONES

Se dejan dos posibilidades abiertas para mejorar de manera adicional, los resultados del camión articulado, manipulado de manera autónoma, mediante el controlador neurodifuso.

La primera posibilidad, es la implementación de bases de reglas para un obstáculo en movimiento. Esto permitirá la adopción de un ambiente un poco más real en la interacción del camión minero de dos cuerpos en la mina Cerro Verde.

La segunda posibilidad, es el entrenamiento del controlador mediante la opción de pesos sinápticos en su conexión consecuente. Esto permitirá un menor tiempo de establecimiento, y un error mínimo de las variables de salida.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andrii Riid, Jaakko Ketola and Ennu Rüstern. *Fuzzy Knowledge-Based Control for Backing Multi-Trailer Systems*. IEEE.
- [2] C. Altafini, A. Speranzon, and B. Wahlberg. *A feedback control scheme for reversing a truck and trailer vehicle*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no. 6.
- [3] C. Chen, B. Liu, and J. Tsao (1999). *Adaptive fuzzy logic controller blending the concepts of linguistic hedges and genetic algorithms*. Proc. IEEE Conference on Fuzzy Systems, Seoul, South Korea.
- [4] Cecilia Jamasmie (2008). *Lonely Trucks in a Lonely Place: Autonomous Trucks Debut in Chile's Desert*. Equipment.
- [5] Cornelius T. Leondes (1998). *Fuzzy Logic and Expert Systems Applications*. Vol. 6. Academic Press.
- [6] Claudius Gros (2008). *Complex and Adaptive Dynamical Systems*, 2nd Edition, Springer.
- [7] Edson Ferreira and Marcelo Lamego (1999). *Neurointerfaces for Semi-Autonomous Object Moving Systems*. Stanford University USA.
- [8] Fausett, L. V. (1994). *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms and Applications*. Ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- [9] G. Chen and D. Zhang (1996). *Backing up a truck-trailer with suboptimal distance trajectories*. Proc. IEEE Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, LA.
- [10] Graham J. Eatherley and Emil M Petriu (1995). *A Fuzzy Controller for Vehicle Rendezvous and Docking*, IEEE. Vol. 44 N° 3. June.
- [11] Hagan, Martin T., Demuth, H., Beale, M. (1995). *Neural Network Design*. Ed. Pws Publishing Company.
- [12] Haykin, Simon (1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Ed. Prentice Hall.
- [13] Jang, J.-S.R., Sun, C.T., Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Ed. Prentice Hall.
- [14] J. Godjevac and N. Steele (1996). *Adaptive fuzzy controller for robot navigation*. Proc. IEEE Conference on Fuzzy System, New Orleans, LA.
- [15] Jonathan Roberts and Elliot Duff. *Autonomous Control of Underground Mining Vehicles using Reactive Navigation*. Australia.

- [16] J. Yi, N. Yubazaki, and K. Hirota (2001). *Backing up control of truck-trailer system*. Proc. IEEE Conference on Fuzzy Systems, Melbourne, Australia.
- [17] K. Fujita and M. Mizumoto (1995). *Fuzzy controls of parallel inverted-pendulum under fuzzy singleton-type reasoning method using genetic algorithm*. Proc. 11th Japan Fuzzy System Symposium, Okinawa, Japan.
- [18] K. Tanaka and M. Sano (1994). *A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems.
- [19] L. Wang (1996), *Stable and optimal fuzzy control of linear systems*. Proc. IEEE Conference on Fuzzy Systems, New Orleans, LA.
- [20] M. Maeda, M. Tsubone, and M. Murakami (1993). *Fuzzy learning control with multi-unit controller*. Proc. 9th Japan Fuzzy System Symposium, Sapporo, Japan.
- [21] M. G. Joo and J. S. Lee (2005). *A class of hierarchical fuzzy systems with constraints on the fuzzy rules*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 13, no. 2.
- [22] P.D.C.R Jayarathna, J.V Wijayakulasooriya and S.R Kodituwakku (2011). *Fuzzy Logic and Neural Network Control Systems for Backing up a Truck and a Trailer*, University of Peradeniya. Vol. 2 N° 3 September.
- [23] Robert Woodley and Levent Acar (2004). *Autonomous Control of a Scale Model of a Trailer-Truck Using an Obstacle-Avoidance Path-Planning Hierarchy*. University of Missouri-Rolla.
- [24] Ross, Timothy J. (2004). *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Ed. Wiley.
- [25] Seong-Gon Kong and Bart Kosko (1992). *Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck and Trailer*. IEEE Vol. 3 N° 2. March.
- [26] T. Taniguchi, K. Tanaka, and H. O. Wang (2001). *Model construction, rule reduction, and robust compensation for generalized form of Takagi-Sugeno fuzzy systems*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9.