



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



OPTIMIZACIÓN DEL FRENADO EN AUTOS VW38 UTILIZANDO
UN SISTEMA ANTIBLOQUEO DE RUEDA CON LÓGICA DIFUSA
PARA MEJORAR LA SEGURIDAD VIAL EN LA CIUDAD DE
JULIACA

TESIS

PRESENTADA POR:

OCTAVIO QUISPE YUCRA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

PUNO - PERÚ

2024



OCTAVIO QUISPE YUCRA

OPTIMIZACIÓN DEL FRENADO EN AUTOS VW38 UTILIZANDO UN SISTEMA ANTIBLOQUEO DE RUEDA CON LÓGICA DIFUSA...

 Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid::8254:416219827

Fecha de entrega
14 dic 2024, 7:56 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
14 dic 2024, 8:04 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
OCTAVIO QY final 001.docx

Tamaño de archivo
6.0 MB

158 Páginas

26,625 Palabras

142,109 Caracteres





16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía

Fuentes principales

- 12% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 12% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

- Caracteres reemplazados**
61 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo. Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.



Dr. Jorge Luis Apaza



Miguel E. Valencia Vilca
INGENIERO ELECTRÓNICO
CIP 64614
SUB DIRECTOR DE INVESTIGACION
EPIE





DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por darme la fuerza e iluminar mi camino hacia una de mis metas.

A mi padre que, aunque no está conmigo sé que desde el cielo me cuida y me guía.

A mi madre por su esfuerzo, aliento comprensión y por el apoyo que sé que siempre me ha brindado.

Octavio Quispe Yucra



AGRADECIMIENTOS

Con profunda gratitud deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de alguna manera en la realización de esta tesis.

En primer lugar, a la Universidad Nacional del Altiplano Facultad de Mecánica Eléctrica, Electrónica y Sistemas A los docentes de la escuela profesional de ingeniería electrónica por su invaluable apoyo en mi formación académica.

A mi director/asesor de tesis D. Sc. Jorge Luis Apaza Cruz, por su orientación, paciencia y apoyo las cuales fueron pilares para la culminación de esta investigación. Sus valiosas sugerencias y comentarios han sido fundamentales para lograr los objetivos propuestos

Octavio Quispe Yucra



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
ACRÓNIMOS	
RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
1.2. JUSTIFICACIÓN	19
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
1.3.1. Objetivo general	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	22
1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	22
1.4.1. Hipótesis general	22
1.4.2. Hipótesis específica.....	22
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	22
CAPÍTULO II	
REVISIÓN DE LITERATURA	
2.1. ANTECEDENTES	23



2.1.1. Nivel Internacional.....	23
2.1.2. Nivel Nacional.....	28
2.2. MARCO TEÓRICO	29
2.2.1. Frenado de vehículo	29
2.2.2. Antibloqueo de rueda	37
2.2.3. Control inteligente.....	47
2.2.4. Neumático y cuarto de vehículo.....	66
CAPÍTULO III	
MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1. RECURSOS DE MATERIALES DE LA INVESTIGACIÓN	91
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN	91
3.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	91
3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	91
3.5. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	92
3.6. ÁMBITO DE ESTUDIO	92
3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	92
3.7.1. Población.....	92
3.7.2. Muestra.....	93
3.8. VARIABLES	93
3.8.1 Variables dependientes.....	93
3.8.2. Variable independiente.....	93
3.9. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	93
3.10. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	94
3.10.1. Cuarto de vehículo	95
3.10.2. Desarrollo del bloque ABS	106



3.10.3. Etapa de activación.....	118
3.10.4. Modelo del sistema ABS completo.....	118

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS.....	121
4.1.1 Pruebas	122
4.2. DISCUSIÓN	140
V. CONCLUSIONES.....	142
VI. RECOMENDACIONES.....	144
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	146
ANEXOS.....	150

ÁREA: Automatización e instrumentación

TEMA: Simulación de un sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa.

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 20 de diciembre de 2024



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1	Representación de un freno hidráulico. 32
Figura 2	Componentes del sistema convencional. 33
Figura 3	Partes del freno de disco. 34
Figura 4	Partes de un freno de tambor. 35
Figura 5	Automóvil Volkswagen VW 38 36
Figura 6	Relación del coeficiente de fricción longitudinal y deslizamiento. 38
Figura 7	Antecedentes históricos de los frenos ABS. 40
Figura 8	Desarrollo histórico de la tecnología ABS. 41
Figura 9	Componentes del sistema antibloqueo de ruedas (ABS). 42
Figura 10	Estructura de un sensor de velocidad ABS. 43
Figura 11	ECU y Modulador de presión hidráulicas. 44
Figura 12	Diagrama hidráulico del modulador para ABS 5.3. 45
Figura 13	Diagrama en bloques de un ABS. 46
Figura 14	Ciclos de regulación de variables de un ABS durante un frenado. 47
Figura 15	Aplicaciones que utilizan métodos de lógica difusa. 51
Figura 16	Comparación entre lógica binaria y difusa. 53
Figura 17	Representación conjunto difuso continuo y discreto. 55
Figura 18	Partes de una función de membresía. 56
Figura 19	Funciones de membresía. 56
Figura 20	Operaciones básicas con conjuntos difusos. 58
Figura 21	Representación de una función de membresía. 59
Figura 22	Estructura básica inferencia Mamdani. 63
Figura 23	Base de conocimiento Mamdani. 64
Figura 24	Conjunto recortado y escalado. 64
Figura 25	rocioso Mamdani detallado. 65
Figura 26	Distintos métodos de defusificación. 66
Figura 27	Componentes del neumático. 67
Figura 28	Comparación de adherencia del neumático. 68
Figura 29	Radio del neumático radial en giro libre. 68
Figura 30	Fuerzas que actúan en el neumático. 71



Figura 31	istema de suspensión MacPherson.	74
Figura 32	Representación de un modelo de cuarto de vehículo.	76
Figura 33	Fuerzas en el eje vertical.	76
Figura 34	Fuerzas en el eje horizontal	78
Figura 35	Radio efectivo durante un frenado.	79
Figura 36	Relación del coeficiente de fricción y deslizamiento de rueda.	81
Figura 37	Herramientas Simcenter Tire.....	83
Figura 38	Representación de las fuerzas del modelo SWIFT.....	84
Figura 39	Entradas y salidas del modelo SWIFT.	85
Figura 40	Bloque en simulink de la librería MF-Swift.....	86
Figura 41	Fuerzas y momentos del neumático en el frenado.....	88
Figura 42	Disco de freno y parámetros utilizados.	89
Figura 43	Diagrama del proyecto de investigación	95
Figura 44	Esquema en Simulink que representa la suspensión vertical	96
Figura 45	Bloque del modelo de suspensión vertical	97
Figura 46	Esquema en Simulink para la deflexión de la suspensión horizontal.....	98
Figura 47	Representación de la deflexión de suspensión horizontal modificada	99
Figura 48	Bloque del modelo del desplazamiento horizontal.....	99
Figura 49	Neumático radial 205/60R15.....	100
Figura 50	Superficie de carretera plana	101
Figura 51	Implementación en simulink de la librería MF-Swift	103
Figura 52	Representación en Simulink del modelo neumático y rueda.....	104
Figura 53	Bloque del modelo neumático y rueda	104
Figura 54	Interconexiones entre los subsistemas del cuarto de vehículo y neumático	105
Figura 55	Bloque del modelo completo de cuarto de vehículo	105
Figura 56	Representación en Simulink de MPF	107
Figura 57	Representación en Simulink del deslizamiento.....	109
Figura 58	Procesamiento de señales del controlador.....	110
Figura 59	Bloque del Procesamiento de señales.....	111
Figura 60	Diseño del controlador difuso	112
Figura 61	Funciones de pertenencia del error de deslizamiento.....	113
Figura 62	Funciones de pertenencia de la variación del error	114
Figura 63	Funciones de pertenencia de la variable Vpresion	115
Figura 64	Visor de superficie del controlador difuso	116



Figura 65	Lógica de control de las electroválvulas	117
Figura 66	Los bloques principales del modelo del ABS.....	118
Figura 67	Modelo del vehículo diseñado.....	119
Figura 68	Distancia de frenado sin ABS a 80km/h.....	123
Figura 69	Deslizamiento longitudinal sin ABS a 80 km/h	124
Figura 70	Velocidad del vehículo a 80 km/h sin ABS.....	124
Figura 71	Velocidad angular del neumático a 80 km/h sin ABS.....	125
Figura 72	Distancia de frenado sin ABS a 100km/h.....	126
Figura 73	Deslizamiento longitudinal sin ABS a 100 km/h	126
Figura 74	Velocidad del vehículo a 100 km/h sin ABS.....	127
Figura 75	Velocidad angular del neumático a 100 km/h sin ABS.....	128
Figura 76	Distancia de frenado con ABS a 80km/h	129
Figura 77	Deslizamiento longitudinal con ABS a 80km/h.	129
Figura 78	Velocidad del vehículo a 80 km/h con ABS.....	130
Figura 79	Velocidad angular a 80 km/h con ABS.	131
Figura 80	Distancia de frenado con ABS a 100km/h	132
Figura 81	Deslizamiento longitudinal con ABS a 100km/h	132
Figura 82	Velocidad del vehículo a 100 km/h con ABS.....	133
Figura 83	Velocidad angular del neumático a 100 km/h con ABS.....	134
Figura 84	Error de deslizamiento a 80 Km/h.....	135
Figura 85	Zoom del error de deslizamiento a 80 Km/h	135
Figura 86	Error de deslizamiento a 100 Km/h.....	136
Figura 87	Zoom del error de deslizamiento a 100 Km/h	136
Figura 88	Par de frenado a 80 Km/h.....	137
Figura 89	Zoom del par de frenado a 80 Km/h.....	137
Figura 90	Par de frenado a 100 Km/h.....	138
Figura 91	Zoom del par de frenado a 100 Km/h.....	138
Figura 92	El sistema ABS sin acción de frenado.....	150
Figura 93	El sistema ABS primer ciclo	151
Figura 94	El sistema ABS, manteniendo la presión	151
Figura 95	El sistema ABS, reducción de presión	152
Figura 96	El sistema ABS, mantener presión baja	152
Figura 97	El sistema ABS, aumento de presión de la electrobomba.....	153



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Parámetros del modelo de suspensión vertical	77
Tabla 2 Parámetros del modelo horizontal.....	78
Tabla 3 Valores máximos del coeficiente de fricción de neumáticos/carreteras	82
Tabla 4 Parámetros de las líneas de freno.....	89
Tabla 5 Señales de activación de las electroválvulas.....	106
Tabla 6 Requisitos para el MPF.....	108
Tabla 7 Rangos de la variable error del deslizamiento	113
Tabla 8 Rangos de la variable de variación de error del deslizamiento.....	114
Tabla 9 Rangos de la variable $V_{presion}$	114
Tabla 10 Reglas de control para la variable de salida.....	115
Tabla 11 Datos utilizados para el modelo del neumático y el cuarto de vehículo	119
Tabla 12 Comparación de distancia entre valores de simulación y teórico	139
Tabla 13 Comparación del tiempo entre valores de simulación y teórico	139
Tabla 14 Valores de la investigación	139
Tabla 15 Segunda referencia de valores.....	140
Tabla 16 Valores de la investigación	140



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Regulación del sistema hidráulico.....	150
ANEXO 2: Código Matlab.....	154
ANEXO 3: Declaración jurada de autenticidad de tesis.....	156
ANEXO 4: Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional....	157



ACRÓNIMOS

S.I	Sistema Internacional
ABS	Antilock Braking System
ASR	Anti-Slip Regulation
ESP	Electronic Stability Program
EBD	Electronic Brake Distribution
ECU	Electronic Control Unit
EF	Elementos Finitos
SAE	Society of Automotive Engineers
TSK	Takagi-Sugeno-Kang
IFSA	International Fuzzy Systems Association
LIFE	Laboratory for International Fuzzy Engineering
SOFT	Sociedad para la teoría y sistemas Fuzzy
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
SISO	Single Input-Single Output
MIMO	Multiple Input-Multiple Output
GMP	Modus Ponens Generalizado
MOM	Máximo Central
SOM	Máximo más pequeño
LOM	Máximo más grande
MPF	Modulador de Presión de Freno



RESUMEN

La investigación se enfocó en los vehículos automotrices antiguos popularmente conocidos como “escarabajos”, son autos del modelo VW38 de la marca Volkswagen, poseen un sistema de frenos convencional y actualizar los sistemas de frenos nos permitirá innovar tecnología. El sistema de antibloqueo de rueda fue un gran avance para la seguridad de los vehículos, se caracteriza por evitar que las ruedas se bloqueen durante un frenado manteniendo la relación de deslizamiento de rueda por debajo de un valor óptimo, evitando perder el control de la dirección del vehículo; el avance de la electrónica fue esencial. Este proyecto se apoya en el tipo de investigación Tecnológica y de desarrollo. El objetivo de la investigación es optimizar la distancia de frenado del auto VW38, identificar los parámetros durante el frenado y simular el controlador diseñado. En el proyecto se desarrolló un modelo de cuarto de vehículo, una unidad de modulación de presión de freno y una unidad de procesamiento central (control fuzzy); en la interacción del neumático y carretera, se utilizó una librería desarrollada por Siemens; se utilizó Matlab y los toolbox's Simulink y Fuzzy Logic. Con todo esto se trató de conseguir un adecuado frenado, sin pérdida de control de dirección y una reducción de la distancia y tiempo de parada. Las simulaciones se realizaron para dos tipos de frenado, teniendo en cuenta dos velocidades diferentes. Los resultados demuestran que si es posible optimizar el frenado en autos VW38 utilizando antibloqueo de rueda con lógica difusa. Esto implica que es muy esencial la comprensión de toda la tecnología referida al frenado de vehículos para poder implementar controladores inteligentes, y que las herramientas software nos permiten evaluar un sistema diseñado sin la necesidad de implementarlo en un vehículo real.

Palabras clave: Lógica difusa, Matlab, Modelo de cuarto de vehículo, Sistema antibloqueo de rueda.



ABSTRACT

The research focused on old automotive vehicles popularly known as "beetles", they are VW38 model cars from the Volkswagen brand, they have a conventional brake system and updating the brake systems will allow us to innovate technology. The anti-lock braking system was a great advance for vehicle safety, it is characterized by preventing the wheels from locking during braking by keeping the wheel slip ratio below an optimal value, avoiding losing control of the vehicle's direction; the advancement of electronics was essential. This project is based on the type of technological and development research. The objective of the research is to optimize the braking distance of the VW38 car, identify the parameters during braking and simulate the designed controller. In the project, a vehicle quarter model, a brake pressure modulation unit and a central processing unit (fuzzy control) were developed; in the interaction of the tire and road, a library developed by Siemens was used; Matlab and the Simulink and Fuzzy Logic toolboxes were used. The aim was to achieve adequate braking without loss of steering control and a reduction in stopping distance and time. The simulations were carried out for two types of braking, taking into account two different speeds. The results show that it is possible to optimise braking in VW38 cars using anti-lock braking with fuzzy logic. This implies that it is essential to understand all the technology related to vehicle braking in order to implement intelligent controllers, and that software tools allow us to evaluate a designed system without the need to implement it in a real vehicle.

Keywords: Anti-lock braking system, Fuzzy logic, Matlab, Quarter car model.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En la industria automotriz, se pone énfasis en investigaciones de sistemas de seguridad y los que siempre tuvieron bastante prioridad fueron los sistemas de freno; para reducir el riesgo de un accidente se utiliza técnicas y sistemas de control modernos que existen en la actualidad. El Volkswagen modelo VW38 posee frenos convencionales que en su momento eran los más adecuados; pero, que actualmente perdieron confiabilidad. En la actualidad, todos los vehículos vienen implementados con sistemas avanzados que garantizan no sólo la seguridad del conductor; sino, la seguridad del peatón. En consecuencia, se desea mejorar el sistema de frenos utilizando tecnología y técnicas presentes en la actualidad.

Para entender y desarrollar un tipo de control avanzado o alguna de las técnicas modernas del sistema de frenos; es necesario comprender y analizar las tecnologías que estén asociadas a esta área de conocimiento. Con una vista panorámica del funcionamiento del sistema de frenos se desea desarrollar un sistema de antibloqueo de rueda con lógica difusa, este trabajo de investigación pretende aportar innovación y desarrollo tecnológico para generar beneficios a la sociedad. Desde el panorama del presente trabajo se aspira incentivar a explorar nuevos campos de la ingeniería electrónica.

En la revisión de literatura de distintos trabajos de investigación, se encuentran distintos métodos de control para los sistemas antibloqueo de ruedas, donde se destaca sus dificultades y se ve un resumen de los avances en cada técnica de control (Aly et al., 2011). En la actualidad, el sistema de frenos antibloqueo es un componente importante que está presente en todos los automóviles, cuya función es disminuir posibles accidentes



mediante el control adecuado del frenado; esta técnica evita el bloqueo de rueda lo que permite frenar y maniobrar el vehículo al mismo tiempo. La lógica difusa como técnica de control inteligente es la más adecuada para este tipo de aplicaciones (Martin del Brio & Sanz Molina, 2006), esto porque responde de forma efectiva a las altas no linealidades que se presentan en las ruedas del vehículo y la carretera.

Para optimizar el frenado en autos VW38, primeramente, se tiene que identificar cada uno de los parámetros que están presentes durante un frenado, para luego desarrollar el sistema de frenos antibloqueo; para mejorar el diseño realizado se realiza simulaciones que nos permite ajustar las reglas del controlador difuso permitiendo con ello conseguir un frenado óptimo. Todo esto permitirá un mejor rendimiento del sistema antibloqueo diseñado, lo que mejorará la seguridad vial de los transeúntes de la sociedad.

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El presente trabajo de investigación ha sido desarrollado pensando mejorar el sistema de frenos de los vehículos automotrices antiguos popularmente conocidos como “escarabajos” o “cucarachas” que son autos del modelo VW38 de la marca Volkswagen las cuales fueron fabricados en el año 1960; estos autos aún están en circulación en la ciudad de Juliaca; ya que son vehículos que circulan debido a la capacidad de ahorro de combustible y el recorrido que se logra conseguir. En la actualidad casi todos los vehículos poseen sistemas avanzados que garantizan la seguridad del conductor; los autos del modelo VW38 al ser vehículos antiguos poseen básicamente un sistema de frenos convencional, lo que provocaría posibles accidentes de tránsito en ciertas situaciones extremas, como por ejemplo, un mal estado de la carretera, en épocas de lluvias, granizos e incluso algunas veces nieve, pues en la ciudad de Juliaca por estar en una región que es



proclive a que se presenten estos fenómenos, generaría un posible accidente, y eso es lo que deseamos evitar. Considerando lo anterior se plantea la siguiente pregunta:

¿De qué forma el sistema antibloqueo de rueda (ABS) y la lógica difusa permiten optimizar el sistema de frenos en autos VW38 de la marca Volkswagen en la ciudad de Juliaca?

Al realizar un frenado de emergencia, debido a momentos inesperados; se puede llegar a perder el control del sistema de dirección, pues en un sistema de freno convencional, por lo general se suelen bloquear las ruedas durante un freno en seco; arriesgando así la seguridad del conductor y de los peatones que circulen por esos momentos. Un accidente sucede en cuestión de segundos y a veces un sistema inteligente de frenos resultaría de mucha ayuda, pues evitaría el bloqueo de las ruedas y por ende no se pierda el control de la dirección.

En el siguiente trabajo se va a proponer una versión para poder solucionar este problema.

1.2. JUSTIFICACIÓN

En la industria automotriz, los fabricantes de vehículos invierten bastante dinero en investigaciones de sistemas de seguridad; y los sistemas de freno siempre fueron prioridad en dicho proceso. Los sistemas de frenos antibloqueo fueron diseñados para reducir los accidentes; no obstante, es cierto que ni el mejor sistema de frenos puede prevenir un accidente en ciertas situaciones; como puede ser, en momentos de tensión (pánico) derivados de un mal estado de la carretera o de condiciones climáticas adversas (lluvia, granizo, nieve, etc.); pero, es posible reducir el riesgo de un accidente; usando para ello, los adecuados sistemas y técnicas de control que existen en la actualidad. El Volkswagen VW38 al ser un vehículo antiguo posee un sistema de frenos convencionales



que en su momento fueron los adecuados pero que en la actualidad no son fiables; y por ende se desea mejorar su sistema de frenos mediante un control inteligente. La lógica difusa presenta enormes ventajas y para su implementación no necesita un modelo exacto de la planta a controlar. Este trabajo de investigación se justifica desde los siguientes puntos de vista:

Académico: Actualmente los vehículos presentan distintos tipos de controles avanzados y técnicas mejoradas para los sistemas de frenos; pero es muy importante entender cada tipo de control, el tipo de técnica que se usa para conseguir un fin deseado. El sistema de freno antibloqueo permite una gestión electrónica que se encarga de regular el nivel de presión hidráulica suministrado a los dispositivos de frenado y no perder el control de vehículo. El control Fuzzy destaca en múltiples aplicaciones, una de ellas, es en el sector automotriz, donde “existe un gran número de patentes sobre sistemas de frenado” (Martin del Brio & Sanz Molina, 2006); y es el más adecuado para realizar un frenado, esto debido a que responde de manera efectiva a las altas no linealidades que se presentan en las ruedas del vehículo y la carretera. Una base teórica es muy importante para comprender como funcionan ciertos componentes, aplicar teorías físicas y sacar conclusiones.

Desarrollo tecnológico: Es necesario tener una vista amplia para poder simular este tipo de control, realizar las lecturas de los sensores y adecuarlos para su tratamiento, implementar protocolos de comunicación para evitar la pérdida de datos, diseñar el circuito electrónico de control, etc. Si se tiene una vista panorámica del funcionamiento del sistema, se puede implementar otros tipos de control desde el más sencillo hasta las técnicas de control más avanzados. Desde el punto de vista científico en general, este trabajo constituye un aporte importante a nivel de los procesos de innovación tecnológica. El objetivo de una investigación “es obtener conocimiento útil para resolver un problema



concreto que surge principalmente en las necesidades de la sociedad” (Dean, 2000). Este trabajo de investigación, se basará en la realización de simulaciones, utilizando la tecnología informática, lo que nos permite optimizar la distancia y el tiempo de frenado. Una implementación en hardware resultaría demasiado costosa, en cambio, una simulación abarata enormemente los costos en cuanto a cambios y mejoras que se desea realizar durante un frenado. Este trabajo, pretende analizar ciertas características y leyes físicas que se presentan durante un frenado; para simular a diferentes velocidades, tipos de carretera y mostrar que un sistema ABS es muy importante.

Social: No sólo en la ciudad de Juliaca circulan los autos VW38, están en todo el Perú, debido a que ofrecen ventajas respecto al recorrido y consumo de combustible. Con el paso del tiempo, las técnicas mejoran y evolucionan, los fabricantes de vehículos se vieron en la necesidad de implementar técnicas y sistemas modernos para la seguridad del conductor. Así haya un sólo auto de este tipo que este circulando en la ciudad, frente a situaciones climáticas adversas o el mal estado de las carreteras, originaría posibles accidentes que pueden ser evitables. Lo que se trata de conseguir es reducir un probable accidente (Orozco Cuautle et al., 2018). Las alternativas mencionadas, precisamente están en la capacidad de mejorar no solo la seguridad del conductor y la seguridad vial; sino permitiría un desarrollo tecnológico el cual generaría beneficios en nuestra sociedad.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

- Optimizar la distancia de frenado en autos VW38 utilizando un sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa para mejorar la seguridad vial en la ciudad de Juliaca.



1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los parámetros que actúan durante un frenado para desarrollar el sistema antibloqueo de rueda.
- Realizar la simulación del sistema antibloqueo de rueda con control difuso para observar el mejoramiento del frenado.

1.4. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Hipótesis general

- La optimización de la distancia de frenado en autos VW38 usando un sistema de antibloqueo de rueda con lógica difusa mejorará la seguridad vial en la ciudad de Juliaca.

1.4.2. Hipótesis específica

- La identificación de los parámetros que están presentes en un frenado nos permitirá desarrollar el sistema antibloqueo de rueda.
- La simulación del sistema antibloqueo de rueda con control difuso nos permitirá observar el mejoramiento del frenado.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El trabajo de investigación se centrará principalmente en detener el vehículo; para ello no se consideran fuerzas de tracción producidas por el motor, el vehículo ya se moviliza a una velocidad constante y se desplaza en una superficie plana con alta fricción; se utiliza la cuarta parte del vehículo y para el frenado del vehículo se considera una trayectoria en línea recta.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

El problema que se ha planteado en la primera sección, ha sido abordado desde hace mucho tiempo por diferentes autores, en diferentes artículos:

2.1.1. Nivel Internacional

En (Mauer et al., 1994) muestra las dificultades que se presentan durante el diseño de un controlador ABS, pues deducir las condiciones de la carretera a partir de pocos datos medibles y generar el par de frenado en tiempo real es un completo desafío; toma en cuenta el coeficiente de fricción, la relación de deslizamiento. Para su análisis usa un modelo de cuarto de vehículo y un modelo de suspensión no lineal. El controlador difuso que se diseñó detecta rápidamente el bloqueo de ruedas y evita un deslizamiento desmedido, la salida del controlador es el par de freno modulado. Como conclusión se muestra que el controlador difuso responde favorablemente en comparación a modelos con control adaptativo.

En (Rangelov, 2004), nos indica la importancia de tener un conocimiento sobre la tecnología del frenado de vehículos, interacción de la carretera-neumático, dinámica del vehículo y los componentes del sistema de frenos. Durante el desarrollo de la investigación analiza un modelo de cuarto de vehículo, modelo de neumático y un modelo de un sistema de frenos ABS en el entorno de simulación de Matlab. Usa un toolbox desarrollado por TNO-Automotive y Delf University para el modelamiento del neumático; implementa un modulador de



presión, una unidad de procesamiento y un controlador para evitar posibles bloqueos de rueda. Los resultados de simulación obtenidos son bastante aceptables.

El artículo (Aly et al., 2011), presenta una revisión de los trabajos de investigación referidos a la tecnología ABS y se ve diferentes enfoques de control, donde muestran las dificultades que más resaltan y se resume los desarrollos más recientes. El problema principal es relacionar la fricción y el deslizamiento; las técnicas de control revisadas son: Métodos de control clásico basados en el control PID, métodos de control óptimos basados en el enfoque de Lyapunov, control no lineal basado en el diseño de control de retroceso, control robusto basado en el método de control de modo deslizante y el control inteligente basado en lógica difusa. Como conclusión, el control ABS es un problema altamente no lineal y aún continúa la investigación sobre métodos de control mejorados.

(Xiu-qin et al., 2012) toma como referencia la teoría dinámica y el control de cuerpos múltiples, plantea que para lograr conseguir un rendimiento adecuado durante el frenado de un vehículo con ABS es necesario realizar un experimento y una simulación por computadora o hasta incluso combinarlos. Se desarrolla un modelo virtual en el software ADAMS/Car, que incluye el sistema de suspensión, modelo del neumático, sistema de frenos, el motor, la dirección y el chasis del vehículo; el control del ABS se diseña en el entorno de MatLab/Simulink y tiene como parámetro de entrada la velocidad de la rueda. Los resultados de la simulación se comparan con resultados generales de frenos. Se concluye que realizar experimentos con el ABS es riesgoso, de alto costo y toma un largo periodo de tiempo; en cambio, la simulación por computadora, evita esas



desventajas y resulta un apoyo muy importante para afianzar las bases de experimentación.

En (Pradeep Rohilla et al., 2016) analiza el mecanismo del ABS para minimizar la distancia de frenado, toma como objetivo principal controlar la relación de deslizamiento y la obtención del coeficiente de fricción óptimo para cualquier carretera; realiza un modelo matemático de un cuarto de vehículo, se apoya en leyes de la física para su representación matemática y son implementadas en entorno MatLab/Simulink para poder monitorizar electrónicamente la desaceleración del modelo realizado. Las pruebas realizadas fueron control Proporcional (P), control Proporcional-Integral (PI), control Proporcional-Derivativo (PD) y control Proporcional-Derivativo-Integral (PID) y se analizan los diferentes resultados. Para sintonizar y optimizar las ganancias de cada controlador se utilizó algoritmos genéticos. Luego de realizar una comparación de los resultados de cada controlador; se llega a la conclusión, de que el controlador PID presenta mejores respuestas y una distancia de parada más baja.

(Minh et al., 2016) desarrolló un laboratorio real de un sistema ABS que permite analizar el verdadero desempeño del control ABS, toma en cuenta el avance histórico y tecnológico de controladores ABS; afirma que no es fácil para estudiantes o aficionados realizar experimentos reales de los diferentes controladores ABS, con diferentes tipos de carretera y condiciones de carga. Aconseja revisar y analizar distintas bibliografías para conseguir una adecuada comprensión del sistema ABS. En la implementación se utiliza dos motores que actúan como la carretera y el neumático; hay un análisis matemático de los parámetros para diseñar el ABS. Usa Matlab/Simulink para construir el modelo y sirve de interface para el control de los motores; utiliza controladores PID y lógica



difusa, realiza simulaciones y compara resultados. Como conclusión, se muestra que el controlador Fuzzy presenta mejores y hasta altos desempeños que el control PID.

(Xiao et al., 2016) indica que la seguridad del automóvil toma mayor importancia en la industria automotriz y los dispositivos del sistema de frenos es una parte muy importante, un automóvil está conformado por sistemas de seguridad activos y pasivos; el sistema ABS está dentro del sistema de seguridad activo. En un frenado de emergencia, se trata de evitar que se bloqueen las ruedas, lo que mejora la seguridad del conductor. En el modelamiento del sistema, toma en cuenta el modelo dinámico de una sola rueda, el modelo del neumático de Dugoff y el modelo de diferentes tipos de carretera; durante el diseño del controlador difuso se definen las entradas y salidas, así como la inferencia y las reglas de control; para la simulación utiliza Matlab/Simulink. Como conclusión, la simulación del control difuso, muestra que el ABS puede prevenir eficientemente que las ruedas se bloqueen y frenen de forma más efectiva.

En (Hurel et al., 2017) propone implementar un modelo matemático y un modelo físico de la suspensión de una cuarta parte de un vehículo, debido a que en su mayoría los investigadores utilizan este modelo para tener un buen control de la carga de la rueda, controlar las fuerzas en la suspensión y la simplificación de masas. El sistema de suspensión ayuda al vehículo a tener un desempeño adecuado y permite al neumático tener una buena adherencia; muestra diferentes tipos de sistemas de suspensión, el más conocido y económico utilizado en autos modernos, es el sistema de suspensión pasivo o McPherson, pues permite acumula energía en resortes y atenuarlas a través de los amortiguadores. Los otros tipos de suspensión activa y semi activa, emplean sensores, accionadores y controladores



que le permiten adecuarse a la superficie de la carretera. Realiza una simulación del modelo matemático y físico en el entorno de Simulink y SimMechanics, muestran resultados equivalentes, demostrando con esto que existe distintas formas de simular un sistema de suspensión.

En (Sundaram & Sathyam, 2017) indica que, en la actualidad, los sistemas modernos están conformados por componentes multidominio que integran sistemas eléctricos, mecánicos e hidráulicos; estos sistemas son bastante complejos y realizar un experimento para entender el comportamiento del sistema no es viable, debido al alto costo de la experimentación y el difícil acceso a las entradas y salidas del sistema. En cambio, la realización de un modelo matemático y su respectiva simulación juegan un papel muy importante en el desarrollo de sistemas complejos. En la implementación usa el entorno Dymola para modelar el tren motriz y Simulink para desarrollar el sistema ABS; en un primer momento considera un modelo ABS simple; luego amplía a uno mucho más robusto para condiciones adversas. Se realiza una co-simulación entre Dymola y Simulink, los resultados demuestran la robustez del controlador diseñado.

En (Bauzá Fernández, 2018) tiene por objetivo analizar el sistema de frenado de un vehículo automotriz; indica que la finalidad principal de un freno es detener un vehículo en movimiento en el tiempo más corto posible, el principio de rozamiento de una superficie fija a una móvil y como se disipa esa energía en la atmósfera. Analiza los diferentes tipos de frenos, tales como: Mecánicos, hidráulicos, aire comprimido, servofrenos y eléctricos; aborda los frenos de tambor y de disco, estos últimos son más eficientes. Gracias a la información reunida en este trabajo, se observa que hubo una evolución en los sistemas de frenos, los fabricantes de autos y frenos, actualmente tratan de mejorar la



seguridad del conductor, abaratar costos, y reducir el impacto ambiental. En la actualidad, gracias al avance enorme de la electrónica los sistemas de un automóvil son controlados por sistemas avanzados de control que gestionan la seguridad del conductor.

(Gonzalez San Miguel, 2019) propone un modelo de ABS que consta de: Un modelo matemático que representa el sistema de frenado del vehículo, un modelo de medio vehículo de donde se obtienen las velocidades angulares de las ruedas y la distancia de frenado del vehículo, un modelo del neumático basado en datos experimentales, y un sistema de control donde se implementa dos estrategias de control diferentes para compararlas y ver el desempeño de cada una de ellas. Se implementó un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) y un controlador de lógica difusa; el proceso de creación tanto del modelo del vehículo como de las dos estrategias de control se realiza en los toolbox's de Matlab, Fuzzy Logic y Simulink. Se realizaron simulaciones con dos velocidades y los resultados se muestran en un cuadro comparativo. Concluye que el controlador de lógica difusa es más eficaz, aunque provoca vibraciones durante su actuación.

(Mora et al., 2023) presenta un review bibliográfico cuyo propósito es describir el funcionamiento y la efectividad del sistema antibloqueo de rueda.

2.1.2. Nivel Nacional

(Astocondor Villar, 2018) muestra las características y componentes que actúan dentro de un sistema ABS, resalta que el sistema de frenos ABS es altamente no lineal y se activa en los vehículos automotrices cuando alcanza velocidades altas. Durante el desarrollo, se describe el modelamiento matemático de la rueda, el modelamiento del cuarto de vehículo, las características del



controlador de frenos ABS, así como una breve teoría de lógica difusa. Toma en consideración la fricción de contacto de la rueda del vehículo, el funcionamiento del sistema hidráulico de los frenos; diseña y valida el controlador difuso utilizando el toolbox Fuzzy Logic, utiliza Simulink para la simulación del frenado. Como resultado muestra la efectividad que proporciona el control difuso en sistemas no lineales.

2.2. MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo de investigación se va a utilizar los siguientes conceptos:

2.2.1. Frenado de vehículo

2.2.1.1. Freno

Es un dispositivo que reduce la velocidad de un vehículo o lo detiene, también lo mantiene sin movimiento si ya está detenido (Bosch, 2005). En un automóvil los frenos detienen el giro de la rueda a través de dispositivos de frenado (disco o tambor de freno). La funcionalidad del sistema de frenos se apoya en el conjunto de fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo (Bauzá Fernández, 2018), durante el frenado está presente la conservación de energía.

2.2.1.2. Conservación de energía

En la industria automotriz, un vehículo consigue moverse gracias a la tracción que el motor logra transmitir a las ruedas; este movimiento se conoce como energía cinética. Al realizar un frenado detenemos un vehículo en movimiento y se transforma energía cinética en energía calorífica (Orozco Cuautle et al., 2018).

2.2.1.3. Frenado

El frenado es la acción de utilizar el freno para reducir la velocidad del vehículo hasta detenerlo (Villar Paúl & Rodríguez García, 2017).

2.2.1.4. Tracción

En la industria automotriz, la tracción es la fuerza que genera el motor y es transmitida a las ruedas, permitiendo el movimiento del vehículo (Bauzá Fernández, 2018).

2.2.1.5. Fuerza de fricción

Esta fuerza es muy importante, debido a que permite el movimiento y la detención de un vehículo. La fuerza de fricción se genera entre dos superficies que entran en contacto físico y es la resistencia al movimiento (contrarrestar la energía cinética y detener el movimiento) (Astocondor Villar, 2018). La fuerza de fricción limita el máximo par de tracción, cuando se supera esta fuerza, la rueda deja de girar en base al punto de contacto y ocurre un patinado o deslizamiento (Bosch, 2005). La fuerza de fricción (F_{fr}) es proporcional al coeficiente de fricción (μ) y la fuerza normal ($F_N = mg$). El coeficiente de fricción (μ), es una medida de la fuerza de frenado para detener un vehículo en movimiento.

$$F_{fr} = \mu * F_N \quad (1)$$

2.2.1.6. Eficiencia de frenado

Es la acción de detener un vehículo en movimiento en cuanto a distancia y tiempo; ambos dependen de la velocidad del vehículo al momento de accionar el pedal de freno (Bauzá Fernández, 2018).

2.2.1.7. Distancia de frenado

Es la distancia recorrida por el vehículo desde el momento que se pisa el pedal de freno hasta que se detiene el vehículo (Rangelov, 2004). Para calcular la distancia de frenado se usa la ecuación 2; donde, e es la distancia, V es la velocidad del vehículo, a es la aceleración del vehículo, μ es el coeficiente de fricción y g es la constante de gravedad (Villar Paúl & Rodríguez García, 2017):

$$e = \frac{v^2}{2\mu g} = \frac{v^2}{2a} \quad (2)$$

2.2.1.8. Tiempo de frenado

Es el tiempo (t) que tarda el vehículo en detenerse completamente, después de accionar el pedal de frenos, Para calcular el tiempo de frenado se usa la siguiente ecuación (Villar Paúl & Rodríguez García, 2017):

$$t = \frac{v}{a} \quad (3)$$

2.2.1.9. Presión

Es una magnitud física escalar y se define como la acción que una fuerza (F) ejerce sobre una determinada superficie o área (A) (Serway & Jewett, 2018). Su unidad en el Sistema Internacional (S.I.) es el Pascal ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$).

$$\text{Presión} = \frac{F}{A} \quad (4)$$

2.2.1.10. Circuito hidráulico

Un circuito hidráulico es un sistema o camino conformado por distintos componentes interconectados mediante un conducto o tubería, por donde circula

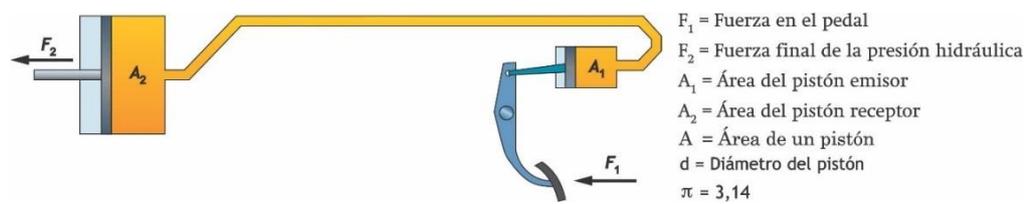
un fluido líquido. El circuito hidráulico permite una distribución uniforme de la presión hidráulica, para un adecuado frenado (Orozco Cuautle et al., 2018).

2.2.1.11. Principio de Pascal

En la física, la ley de Pascal establece: “El incremento de presión aplicada a una superficie de un fluido incompresible (líquido), contenido en un recipiente indeformable, se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo” (Serway & Jewett, 2018). El sistema de frenos se basa en este principio (figura 1).

Figura 1

Representación de un freno hidráulico.



Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

$$F_2 = \frac{F_1}{A_1} \cdot A_2 \quad (5)$$

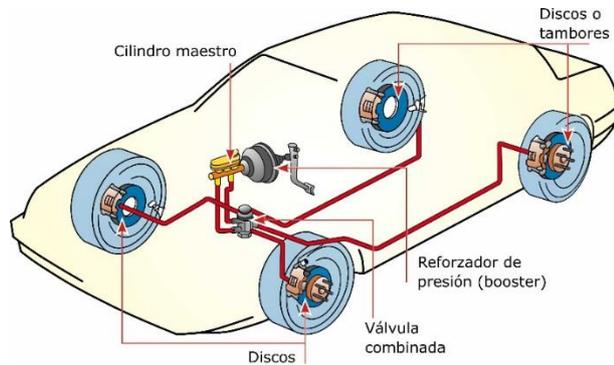
$$A = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (6)$$

2.2.1.12. Sistema de frenos convencional

En un sistema de frenos, cada componente está ubicado de acuerdo a sus características de operación y es importante como se asocian para un adecuado funcionamiento (Bauzá Fernández, 2018). En la figura 2, se puede apreciar los componentes más básicos que actúan durante un frenado para detener un vehículo en movimiento.

Figura 2

Componentes del sistema convencional.



Nota: Orozco Cuautle et al., (2018)

Componentes de activación; por ellos comienzan a funcionar el sistema y se controla la fuerza que se realiza en el frenado.

- **Pedal de frenos.** Es una pieza metálica accionada por el pie, que consiste en un brazo de palanca que transmite al circuito hidráulico la fuerza realizada por el conductor.
- **Líquido de frenos.** Es un fluido hidráulico que facilita la transmisión de la fuerza de presión a los componentes de frenado.

Componentes de distribución; son los que transmiten la presión generada en componentes de activación hacia los componentes de frenado.

- **Cilindro maestro.** Conocida también como la bomba de freno, es la parte principal del sistema hidráulico de frenos, porque convierte la presión mecánica en presión hidráulica, asimismo, suministra y mantiene la presión por todo el circuito hidráulico.
- **Válvulas hidráulicas.** Es un componente del circuito hidráulico cuya función es abrir, cerrar, regular o aislar el paso del líquido de frenos. En el

sistema de frenos existen diferentes tipos de válvulas que realizan diferentes tareas para conseguir un adecuado funcionamiento del sistema.

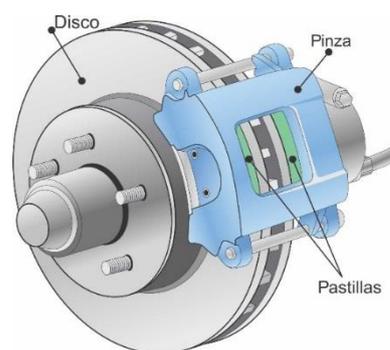
- **Depósito del líquido de frenos y conductos hidráulicos.** El depósito del líquido de frenos almacena el líquido e indica el nivel que existe dentro del sistema de frenos. Los conductos hidráulicos interconectan los componentes del sistema y es por donde circula el líquido de frenos (mangueras o tubos).

Componentes de frenado; son los encargados de reducir y detener el movimiento de las ruedas de un vehículo. Se observa la conservación de energía.

- **Frenos de disco.** Actúan por contracción externa, está conformado por un disco acoplado a la rueda y una mordaza (caliper) que posee pastillas de fricción. El caliper recibe la fuerza hidráulica del cilindro maestro y presiona las caras del disco logrando detener o frenar un vehículo.

Figura 3

Partes del freno de disco.



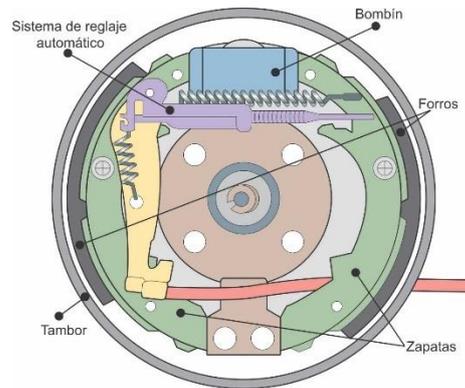
Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

- **Frenos de tambor.** Actúa por expansión interna, está compuesto por un tambor acoplado a la rueda y un conjunto de resortes y balatas. La fricción se causa por la presión de las balatas en el interior del tambor. El cilindro

de rueda es el encargado de recibir la fuerza hidráulica del cilindro maestro y empujar el conjunto de balatas.

Figura 4

Partes de un freno de tambor.



Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

2.2.1.13. VolksWagen escarabajo

El Volkswagen “Tipo 1” o VW38 (figura 5), es un popular automóvil producido en Alemania por el fabricante Volkswagen entre los años de 1938 a 2003, siendo uno de los automóviles más populares del mundo. Posteriormente adopta el popular nombre de Escarabajo. Es un automóvil muy clásico y de bajo costo; fue muy utilizado por su bajo consumo en combustible y su costo en mantenimiento. El automóvil VW38 presentaba excelente diseño, continuas mejoras y fábricas de ensamblaje en distintos países. En los años sesenta llega al Perú para ofrecer economía y confort; la empresa nacional Motor Perú S.A. empieza a ensamblarlos, donde su producción duro desde 1966 a 1987. En México se produjo última unidad del Volkswagen en el año 2003.

Figura 5

Automóvil Volkswagen VW 38



Nota: <https://mx.pinterest.com/pin/400398223135341193/>

Entre sus principales características resaltan: Su mecánica sencilla, su configuración de chasis, carrocería independiente, motor de baja compresión (poca potencia y regímenes de giro bajos), etc.

Descripción técnica; se da una pequeña descripción de las características que posee el automóvil:

- **Motor:** Posee un motor trasero longitudinal de cuatro cilindros, que están refrigerados por aire.
- **Transmisión:** La transmisión es del tipo de propulsión trasera y el cambio es manual de 4 relaciones.
- **Suspensión:** El tipo de suspensión es independiente en sus cuatro ruedas, mediante barras de torsión y amortiguadores de fricción.
- **Frenos:** Los frenos de las ruedas delanteras y posteriores son del tipo freno de tambor.
- **Prestaciones:** La velocidad máxima que puede alcanzar es de 120 km/h.

2.2.2. Antibloqueo de rueda

2.2.2.1. Rueda

Es una pieza mecánica y circular que es instalado en un eje para que pueda girar a su alrededor (Rangelov, 2004).

2.2.2.2. Adherencia a la carretera

Es la fricción que se presenta entre la cantidad de superficie de contacto del neumático (goma) y la carretera, también se puede decir, que es un nivel de agarre que presenta el neumático en la superficie por la que se desplaza; esta característica nos permite acelerar, maniobrar o frenar un vehículo (Blucher, 2005).

2.2.2.3. Deslizamiento

El deslizamiento se origina cuando la velocidad angular o de giro de la rueda no coincide con la velocidad lineal del vehículo (Rangelov, 2004). El deslizamiento del neumático con la carretera se produce cuando se desea transmitir una fuerza, como pueden ser acelerar, frenar o realizar un giro de curva. El deslizamiento es positivo al acelerar y negativo durante el frenado (Orozco Cuautle et al., 2018).

Deslizamiento longitudinal (al acelerar: $\omega > V_x$); definido por la ecuación 7; está limitado por: $0 < \lambda(+) < 1$.

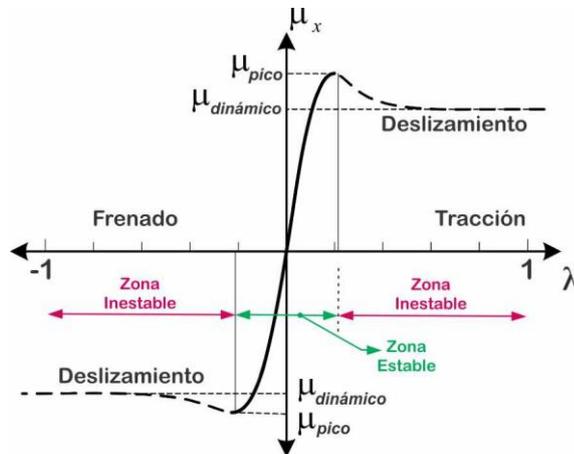
$$\lambda = \frac{\omega \cdot R - V_x}{V_x} \quad (7)$$

Deslizamiento longitudinal (al frenar : $V_x > \omega$); definido por la ecuación 8; está limitado por: $-1 < \lambda(-) < 0$.

$$\lambda = \frac{V_x - \omega \cdot R}{V_x} \quad (8)$$

Figura 6

Relación del coeficiente de fricción longitudinal y deslizamiento.



Nota: Jazar, (2017)

En la figura 6 muestra una curva experimental que nos indica que el coeficiente de fricción longitudinal (μ_x) está en función de la relación de deslizamiento longitudinal (λ); esta curva puede variar de acuerdo a distintas condiciones (tipo de carretera, clima, tipo de neumático, etc.) (Jazar, 2017). La zona estable está conformada por una parte lineal y una parte no lineal, en esta zona el deslizamiento es controlado y nos permite una adherencia adecuada tanto para tracción como para el frenado. La zona inestable produce una baja o por decir ninguna maniobrabilidad en el vehículo y un aumento de deslizamiento produce una reducción del nivel de adherencia; en esta zona al frenar puede ocurrir un bloqueo de la rueda, y al acelerar, en un exceso de tracción la velocidad angular de la rueda aumenta produciendo un patinaje.

2.2.2.4. Bloqueo de rueda

Es cuando se produce un giro excesivamente lento o nulo de la rueda durante el movimiento del vehículo. Al frenar un vehículo, el giro de la rueda es



más despacio con respecto a la velocidad del automóvil (Dominguez & Ferrer, 2012). Por acción del frenado, las ruedas se bloquean, porque el coeficiente de fricción no es lo bastante alto como para proporcionar una adhesión suficiente para que los neumáticos agarren la superficie de la carretera. Al bloquearse las ruedas, no se puede transmitir las fuerzas laterales, lo que origina que se generen pares de fuerza en el vehículo, que originan una pérdida de control de la dirección y orientación del vehículo (Bosch, 2014).

2.2.2.5. Sistema de frenos antibloqueo

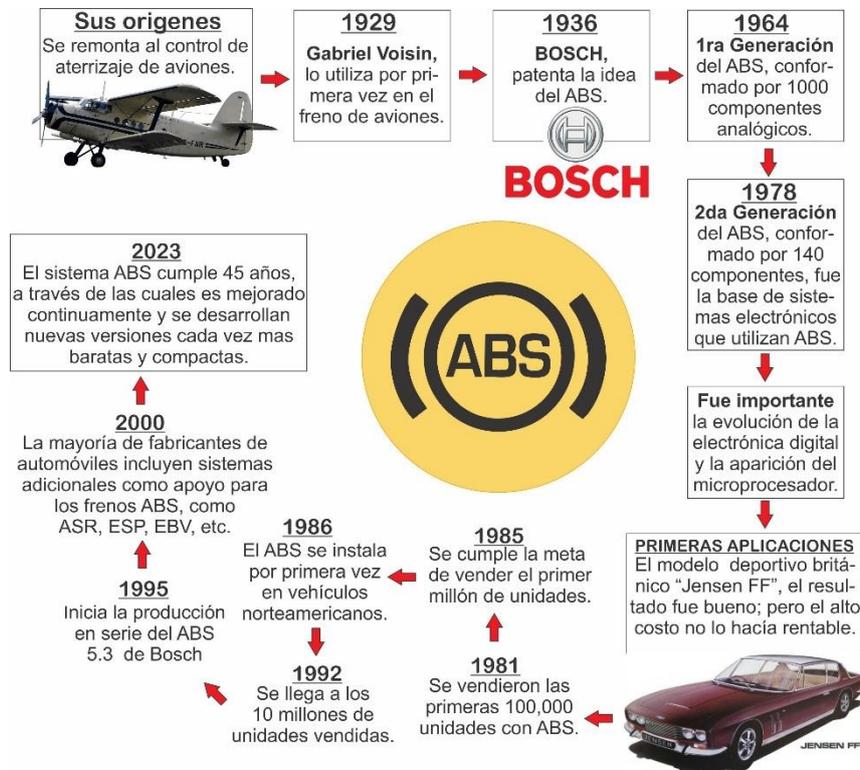
El sistema de frenos antibloqueo o Antilock Braking System (ABS) (siglas en inglés), es un importante componente de seguridad en los vehículos modernos y son dispositivos de regulación de la presión en el sistema de frenos, cuya función es evitar que se bloqueen las ruedas al frenar, manteniendo un mayor control de conducción y la estabilidad del vehículo (Aly et al., 2011).

2.2.2.5.1. Panorama histórico

Por la década de los años 1920 se empezó a idear uno de los sistemas más sobresalientes en la seguridad de los vehículos, el conocido sistema de frenos antibloqueo que evita que se bloquee las ruedas durante un frenado impidiendo una pérdida de control de la dirección del vehículo, fue utilizado por primera vez por Gabriel Voisin en 1929 quien lo desarrolló para el aterrizaje de aviones; posteriormente años más tarde en 1936, la compañía alemana Bosch patentó la idea del ABS. La primera generación del sistema ABS se desarrolló en 1964 y estaba conformado por 1000 componentes analógicos; fue a partir de 1970 con la llegada de la electrónica digital (microprocesadores) que fue posible realizar un sistema eficiente (Rangelov, 2004).

Figura 7

Antecedentes históricos de los frenos ABS.



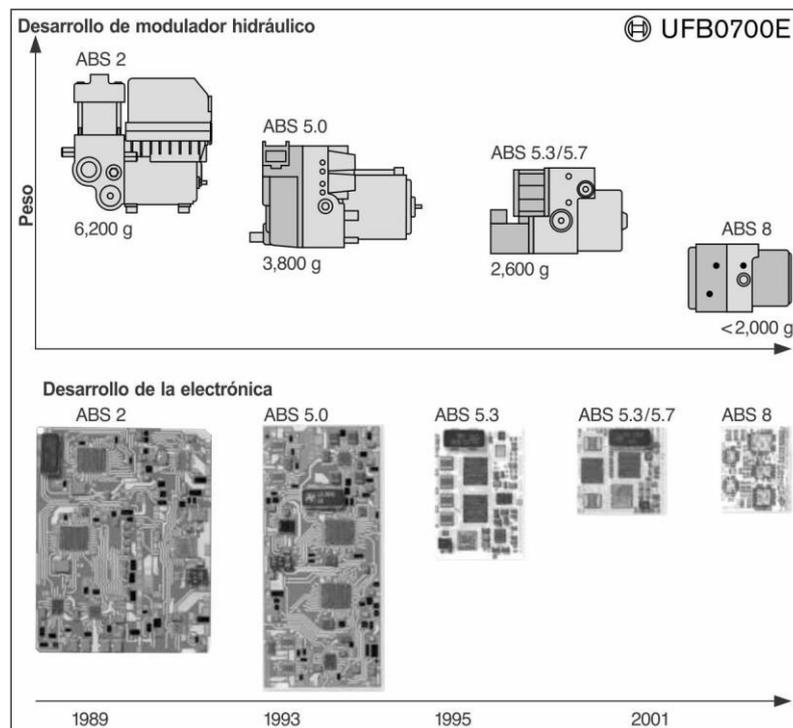
Nota: Elaboración propia

Luego de 14 años se desarrolló la segunda generación del sistema ABS; en 1978 se introdujo la tecnología del primer sistema electrónico de frenos antibloqueo que se convirtió en la base de los sistemas electrónicos que utilizan ABS; en esta oportunidad la cifra de componentes se redujo a 140. Fue a partir de este avance histórico que el ABS continuó con su evolución. Una de las primeras aplicaciones fue el modelo deportivo británico "Jensen FF" con buenos resultados, pero el alto costo lo hacía inviable. En 1986, se instala el ABS en vehículos norteamericanos; para 1999 se llegó a vender 50 millones de unidades. En el año 2000 la mayoría de fabricantes de automóviles incluyen apoyos para los frenos ABS, como el sistema de control de tracción (Anti-Slip Regulation (ASR)), el control electrónico de estabilidad (Electronic Stability Program (ESP)), el sistema

electrónico de reparto de frenada (Electronic Brake Distribution (EBD)) (Astocondor Villar, 2018). En la actualidad el sistema ABS cumplirá 45 años, con el paso de los años ha ido evolucionando y presentando mejoras continuamente (figura 7); las unidades de ABS son cada vez más compactas y baratas (figura 8).

Figura 8

Desarrollo histórico de la tecnología ABS.



Nota: Bosch, (2005)

2.2.2.5.2. Ventajas de los frenos ABS

Existe una gran diferencia entre un vehículo que tiene un sistema antibloqueo y uno que no lo tenga. El ABS brinda una mayor seguridad al vehículo; al pisar a fondo el pedal de freno durante un frenado de emergencia, el dispositivo comienza a funcionar, permitiendo mover el volante y poder esquivar obstáculos de la carretera. El sistema ABS gracias a su gestión electrónica, permite al conductor seguir maniobrando la dirección del vehículo para efectuar un

frenado seguro (Rangelov, 2004). Algunas de sus principales ventajas (Pradeep-Rohilla et al., 2016) que ofrece este sistema son:

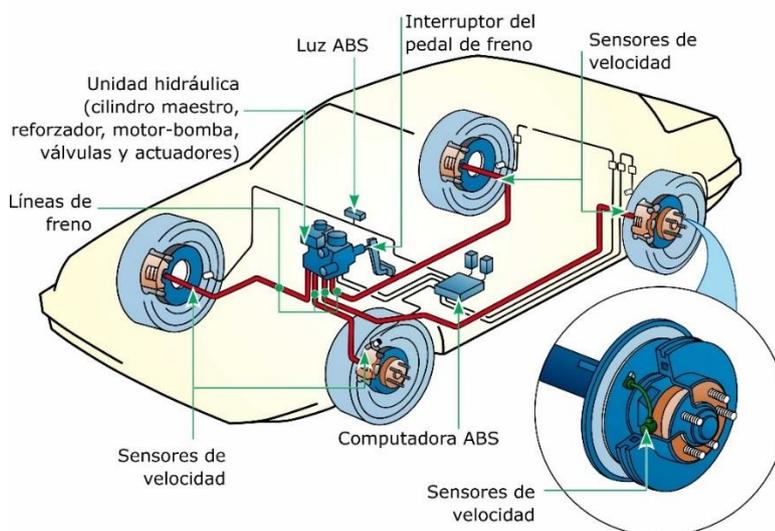
- Reduce altamente la posibilidad de un bloqueo de las ruedas.
- Permite un mayor agarre del neumático sobre la calzada.
- Evita la pérdida de control direccional.
- Permite una mayor estabilidad de marcha.
- Reduce el tiempo y la distancia de frenado.
- Reduce la probabilidad de tener un accidente

2.2.2.5.3. Componentes del sistema de frenos ABS

Un vehículo con ABS (figura 9), conserva los componentes del sistema de frenos convencional y los principios de operación hidráulica, e incluye ciertos componentes de gestión electrónica para realizar un mejor control de la presión hidráulica proporcionada a los dispositivos de frenado (Aly et al., 2011).

Figura 9

Componentes del sistema antibloqueo de ruedas (ABS).

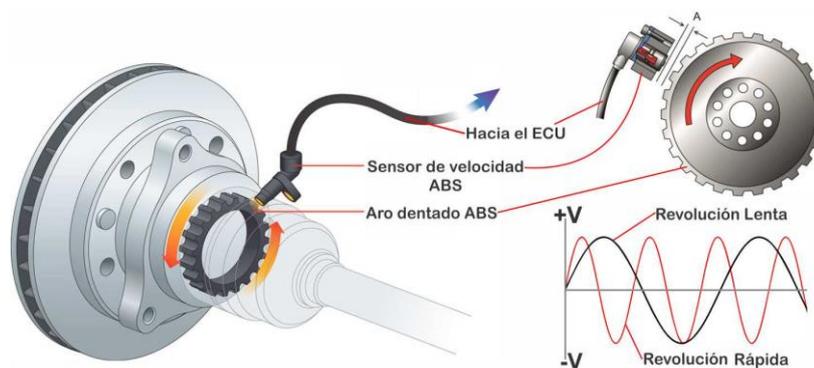


Nota: Orozco Cuautle et al., (2018)

Sensores de velocidad de la rueda. Los sensores del número de revoluciones de las ruedas nos permiten medir la velocidad angular (ω). El sensor trabaja junto a un aro dentado acoplada al eje de la rueda; cuando la rueda gira genera una señal de voltaje que varía con la velocidad de la rueda (proporcional a la rotación de la rueda) (figura 10). La unidad de control utiliza estas variaciones de señal para realizar cálculos necesarios y luego generar la orden para ejercer una presión sobre el sistema de frenos para que no se bloquee la rueda (Rangelov, 2004).

Figura 10

Estructura de un sensor de velocidad ABS.



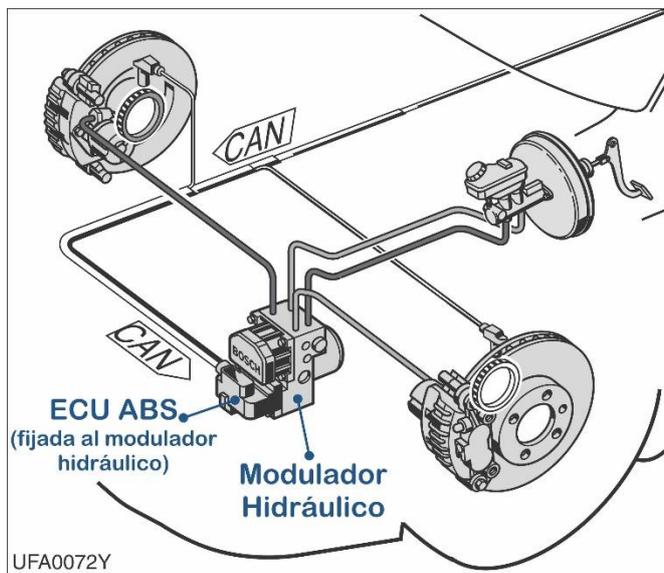
Nota: <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/wp-content/uploads/2020/03/abs-sensor.jpg>

Unidad de control electrónico. La unidad de control electrónico o Electronic Control Unit (ECU) (siglas en inglés), es la unidad o módulo de control electrónico encargada de recibir, amplificar y filtrar la señal que genera el sensor de velocidad; una de sus principales funciones es evitar el bloqueo de las ruedas y controlar el deslizamiento de la rueda durante un frenado de emergencia (Bosch, 2005). La ECU controla tanto la entrada de información, como las señales de salida (figura 11). Se trata de una microcomputadora con la lógica necesaria que nos permite realizar múltiples cálculos por segundo; en base a los cálculos

obtenidos, se envía pulsos de activación al modulador de presión para indicarle si es necesario aumentar, disminuir o mantener la presión hacia los componentes de frenado (González San Miguel, 2019); estos valores dependen si se han superado o no ciertos valores constantemente monitoreados.

Figura 11

ECU y Modulador de presión hidráulicas.



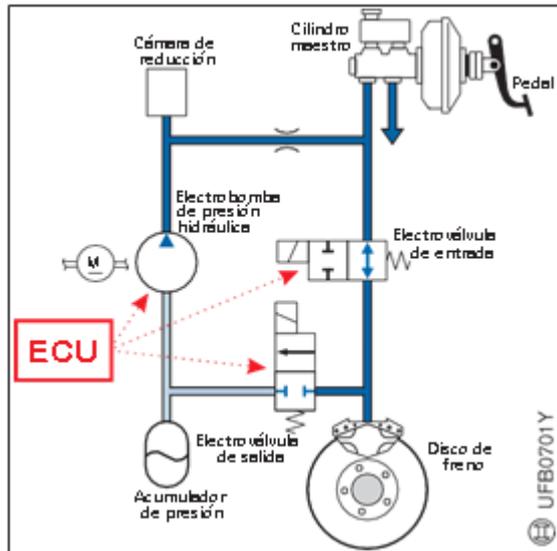
Nota: Bosch, (2005)

Modulador de presión. hidráulica Este componente es un dispositivo electrohidráulico que nos permite modular (acumular, mantener y reducir) la presión sobre los dispositivos de frenado. El modulador hidráulico es la interconexión entre el cilindro maestro y los componentes de freno de la rueda, recibe señales eléctricas de control provenientes de la ECU y utiliza electroválvulas para controlar el nivel de presión en los actuadores de frenado (figura 12). El modulador hidráulico incorpora dos electroválvulas (entrada y salida), una electrobomba de presión, un acumulador de presión y una cámara de reducción de presión. Las electroválvulas poseen dos posiciones de trabajo (Normalmente cerrado y normalmente abierto), la electrobomba en conjunto

posee una válvula de aspiración, una válvula de presión, la bomba y el motor eléctrico que la acciona.

Figura 12

Diagrama hidráulico del modulador para ABS 5.3.



Nota: Bosch, (2014)

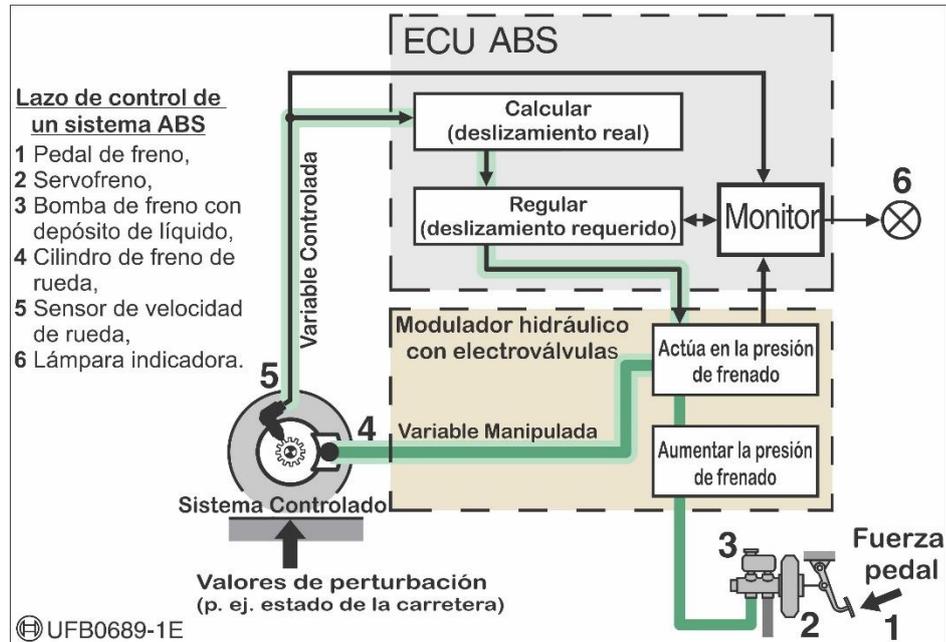
2.2.2.5.4. Funcionamiento del sistema ABS

Conociendo las ventajas que ofrece y los componentes electrónicos que integran el ABS, se verá como entra en funcionamiento este sistema. Para que se active el ABS, es necesario que el vehículo supere mínimamente un umbral de velocidad (15km/h) y que el interruptor del pedal de frenos este presionado; el sistema ABS empieza a entrar en acción cuando se presenta un posible riesgo de bloqueo de rueda, al aplicar una fuerza excesiva en el pedal de freno. Primeramente, se muestra el funcionamiento en bloques de un ABS (figura 13). Consta de: Un sistema controlado (frenos de rueda y fricción neumático-carretera), valores de perturbación, controlador (sensor de velocidad y ECU ABS), variables controladas (velocidad angular, aceleración/desaceleración y

deslizamiento), variable de referencia (fuerza del pedal de freno), variable manipulada (presión de freno) (Rangelov, 2004).

Figura 13

Diagrama en bloques de un ABS.

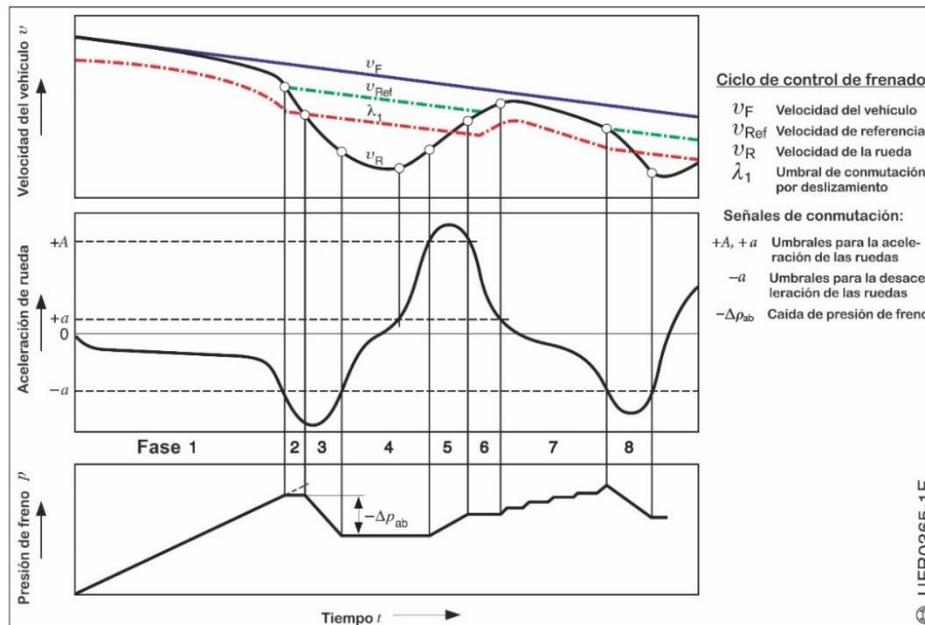


Nota: Bosch, (2005)

Resumiendo, durante la regulación del freno, la estabilidad o inestabilidad del movimiento de la rueda debe detectarse constantemente y mantenerse dentro del rango de deslizamiento con la máxima fuerza de frenado mediante una secuencia de fases de aumento, mantenimiento y reducción de presión; estas secuencias se realizan de 10 a 15 veces por segundo. En consecuencia, el comportamiento de un sistema ABS es una acción cíclica para conseguir una mejor adherencia y conseguir que no se bloquee la rueda (Gonzalez San Miguel, 2019). En la figura 2.14 se observa la evolución de la velocidad del vehículo, la aceleración angular de la rueda, la variación del deslizamiento y la presión del circuito de frenado durante el funcionamiento del ABS.

Figura 14

Ciclos de regulación de variables de un ABS durante un frenado.



Nota: Bosch, (2005)

2.2.3. Control inteligente

2.2.3.1. Estrategia de control

Es un conjunto de algoritmos encargados de ordenar, regular o mantener una variable de un sistema que se desea controlar con el propósito de obtener ciertos resultados dentro de unos rangos aceptables y cumplir tareas que se desean realizar.

2.2.3.2. Lógica difusa

La lógica borrosa o lógica difusa (Fuzzy Logic, en inglés) es una técnica de control inteligente, que nos permite representar un tipo de control que no se fundamenta en ecuaciones físicas; sino, en resultados experimentales y la aplicación de reglas basadas en la lógica. En general, la lógica difusa trata de imitar el pensamiento humano en la toma de decisiones basadas en la experiencia



de un operador (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006). La lógica difusa es una extensión de la lógica convencional (Booleana) para manejar el término de pertenencia parcial. En este tipo de control, no existen afirmaciones totalmente verdaderas o totalmente falsas, solamente existen grados de pertenencia a conjuntos definidos. Para diseñar un controlador difuso es necesario ver la respuesta a diferentes entradas, luego se realizan las reglas para que el proceso funcione como queremos (Ponce Cruz, 2010). La finalidad de la lógica difusa es proporcionar conceptos y técnicas que busca trasladar la experiencia hacia una computadora, para tratar un razonamiento aproximado en lugar de un razonamiento exacto. Por ende, si existe conocimiento de un proceso a controlar, es viable realizar un modelado mediante lógica difusa.

2.2.3.2.1. Historia

Los fundamentos teóricos de la lógica difusa fueron planteados en 1965 por Lofti Asker Zadeh, con la publicación del primer artículo de lógica difusa titulado “Fuzzy Sets” (Zadeh, 1965), donde se da a conocer por primera vez los conceptos y la teoría para trabajar con expresiones imprecisas del razonamiento humano (incertidumbre). Posteriormente en 1973, Lofti A. Zadeh presenta las bases teóricas de los controladores difusos, interpretando los sistemas difusos como computación con palabras (Zadeh, 1973). En un principio su trabajo recibe críticas y no tuvo buena acogida por la comunidad científica; pero también, tras la publicación de su propuesta, algunos investigadores empiezan a desarrollar aplicaciones basadas en ella, consiguiendo bastante éxito; por lo que, la lógica difusa entra en un auge. En 1974 Ebrahim Mamdani aplica los conceptos de lógica difusa en el control de procesos y desarrolla el primer control fuzzy para la regulación de un motor de vapor (Mamdani, 1974); más tarde, en 1985 Takagi y



Sugeno realizan un aporte a la teoría del control difuso, con un nuevo método llamado Takagi-Sugeno-Kang (TSK), como alternativa del método Mamdani (Takagi & Sugeno, 1985). De hecho, donde más aplicaciones se realizaron y donde más éxito lograron los sistemas difusos fue en Japón; en relación a esto, un resumen breve sería (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006):

- 1972: Grupo de trabajo en sistemas Fuzzy (Instituto de Tecnología de Tokio).
- 1974: Primera aplicación de control difuso (método Mamdani).
- 1983: Control Fuzzy para el proceso de purificación de agua (Fuji Elec.& TIT).
- 1984: International Fuzzy Systems Association (IFSA) de Japón; primer symposium anual sobre sistemas difusos.
- 1985: se plantea un nuevo método TSK, alternativo al método Mamdani.
- 1987: Control difuso en el tren metropolitano de Sendai (Japón) por Hitachi.
- 1987: Aparece el “Fuzzy Boom” se comercializa productos en base a lógica difusa.
- 1989-1994: Proyecto: Laboratory for International Fuzzy Engineering (LIFE).
- 1989-1993: Proyecto de investigación en sistemas borrosos.
- 1989: Sociedad para la teoría y sistemas Fuzzy (SOFT).
- 1989: Control Fuzzy en el suministro de agua caliente para uso doméstico, desarrollado por Matsushita.
- 1990: Reunión chino-japonesa sobre conjuntos y sistemas difusos.



- 1990: Conferencia sobre lógica Fuzzy & redes neuronales.
- 1993-2022: “Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)”:
International Conference on Fuzzy Systems.

2.2.3.2.2. Ventajas y desventajas de la lógica difusa

Las ventajas que presenta este tipo de control son (González San Miguel, 2019):

- Fácil de entender, pues sus reglas lógicas están sujetas al lenguaje humano.
- Permite el control de sistemas “Single Input-Single Output (SISO)” y sistemas “Multiple Input- Multiple Output (MIMO)”.
- Se basa fuertemente en la experiencia.
- Es compatible con otros sistemas de control, lo que permite usarse como un control complementario
- No es necesario conocer el modelo matemático que gobierna el funcionamiento del sistema a controlar.
- Da muy buenos resultados frente a procesos no lineales y de una difícil modelación.
- Cálculo rápido, que se refleja en las salidas de una forma veloz y precisa.
- Posee la capacidad de anticiparse a los acontecimientos, brindando así estabilidad al sistema que controla.

No obstante, también posee algunas desventajas:

- Frente a un problema que posee solución mediante un modelo matemático, se obtiene resultados pésimos con lógica Fuzzy.

- Si se diseñan controladores complejos, su implementación puede ser complicada.
- Dificultad para elegir una adecuada función de pertenencia para los conjuntos difusos.
- Frente a funciones mal especificadas, se tendría una falla total del sistema a controlar.

2.2.3.2.3. Aplicaciones de la lógica difusa

Lofti Zadeh no patentó su trabajo, esta generosidad fue esencial para que la lógica difusa obtenga el éxito que alcanzó; el uso de conocimiento experto permite automatizar tareas y proporciona soluciones de muy buena calidad. La combinación de los conceptos de lógica difusa y el área de control de procesos, da lugar a numerosas aplicaciones; esta tecnología no es de futura aplicación, ya están presentes en muchas aplicaciones y en donde más viene evolucionando esta tecnología es en países como Alemania y Japón (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006). Entre las aplicaciones que más destacan y que fueron desarrollados con lógica difusa (figura 15) están:

Figura 15

Aplicaciones que utilizan métodos de lógica difusa.



Nota: González Morcillo, 2011)



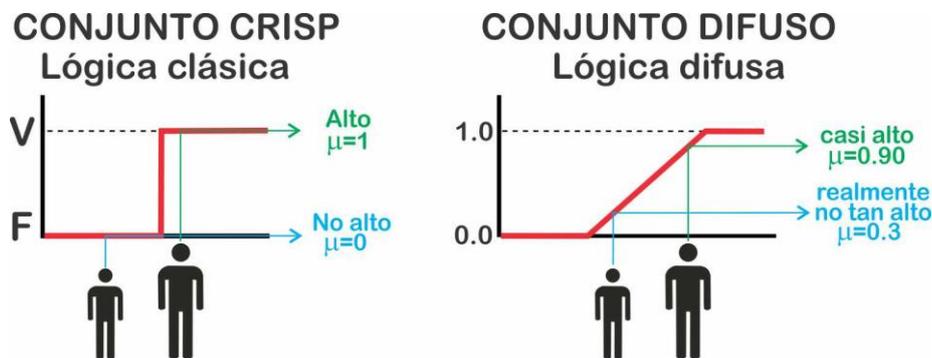
- Aplicaciones de control: Metro de Sendai en Japón, calefacción, aire acondicionado, luminosidad, humedad, etc.
- En la industria, sistemas eléctricos de potencia, análisis de deterioro de tuberías, sistemas neumáticos, etc.
- En sector automotriz: Patentes sobre sistemas de frenado, mejoramiento de la eficiencia del uso de combustible, etc.
- En área médica: Diagnósticos, acupuntura, análisis de ritmos cardiacos, etc.
- En aeronáutica: Control de vuelo, estabilidad, etc.
- Análisis de señales: Tratamiento de imágenes, ajustes de color en TV, reconocimiento de caligrafía, etc.
- En cámaras fotográficas: Sistemas de autoenfoco, etc.
- En aparatos electrodomésticos, están presentes en aspiradoras, lavadoras, refrigeradoras, microondas, tostadoras, etc.

2.2.3.2.4. Comparación entre lógica difusa y lógica binaria

La lógica binaria o lógica clásica, es aquella que trabaja únicamente con dos casos: Un elemento pertenece a un conjunto o no pertenece (veracidad entre 0 y 1); en cambio; la lógica difusa trabaja con valores de pertenencia entre 0.0 y 1.0 (figura 16). Si se tratara de trasladar la experiencia de un operador a una computadora (lógica binaria), no se podría realizar directamente; se tendría que implementar distintas técnicas de codificación, así como, usar otras técnicas de control. La lógica difusa busca acercarse al mundo real mediante la veracidad $[0.0,1.0]$ que no puede representarse con valores lógicos binarios $[0,1]$ (Ponce Cruz, 2010).

Figura 16

Comparación entre lógica binaria y difusa.



Nota: Elaboración propia

Tener en cuenta que la lógica clásica al tomar dos valores fijos permitió la evolución de la computadora, circuitos digitales, microprocesadores y circuitos industriales de activación.

2.2.3.2.5. Universo discurso

El universo discurso se define como un conjunto X que representa todos los posibles valores que puede tomar una variable x (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006).

2.2.3.2.6. Conjuntos difusos

La propuesta de Zadeh amplía la idea de membresía binaria a membresía difusa en donde se obtienen varios grados de membresía en un rango continuo real a diferencia de los conjuntos clásicos. El término clave para comprender como funciona la lógica difusa es el conjunto difuso. Un conjunto difuso o conjunto borroso (fuzzy set en inglés), es una clase de objetos en la que hay una progresión gradual de pertenencia; se caracteriza por una función de pertenencia que asigna a cada objeto un grado de pertenencia que se encuentra en el intervalo entre cero

y uno (Zadeh, 1965). Un conjunto difuso A sobre un universo discurso U, se puede definir como un conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(\mu_{A(x)}, x)/x \in U\} \quad (9)$$

Donde $\mu_{A(x)}$ es el grado de pertenencia. Los conjuntos difusos, se puede representar alternativamente en forma continua o discreta (Ponce Cruz, 2010).

- **Conjunto difuso continuo.** Se define como un conjunto infinito, pues puede tomar cualquier valor dentro de los límites del universo discurso. En la ecuación 10, el símbolo integral (\int) indica unión de todos los elementos en forma continua, a los cuales un valor x le corresponde una función definida $\mu_{(x)}$ (figura 17). Se representa de la siguiente forma:

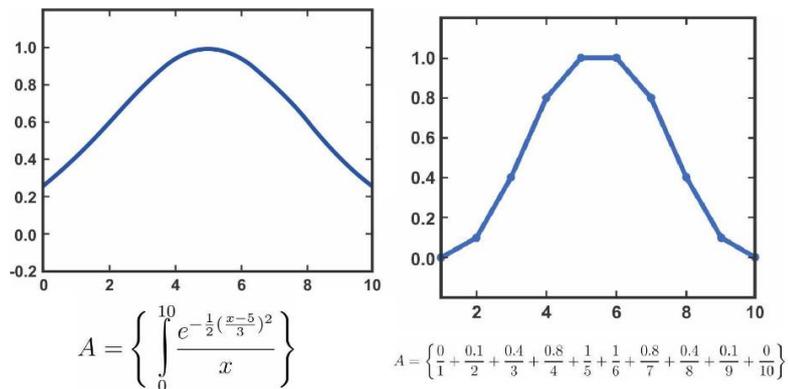
$$A = \left\{ \int \frac{\mu_{A(x)}}{x} \right\} \quad (10)$$

- **Conjunto difuso discreto.** Se define como un conjunto finito, puede tomar sólo valores definidos dentro de los límites del universo discurso. En la ecuación 11, el símbolo sumatorio (\sum) indica unión de todos los valores en forma discreta por lo que hay valores específicos, a los cuales un valor x le corresponde una función definida $\mu_{(x)}$ (figura 17). Esta forma de representación es muy usada en los sistemas digitales (microcontroladores, computadoras, etc.). Se representa de la siguiente forma:

$$A = \left\{ \sum \frac{\mu_{A(x)}}{x} \right\} \quad (11)$$

Figura 17

Representación conjunto difuso continuo y discreto.



Nota: Elaboración propia

En esencia, un conjunto difuso es una función que puede ser continua o discreta, esta función nos indica la relación que existe entre el valor de pertenencia y los elementos del universo discurso, el cual está limitado en un rango.

2.2.3.2.7. Función de Membresía

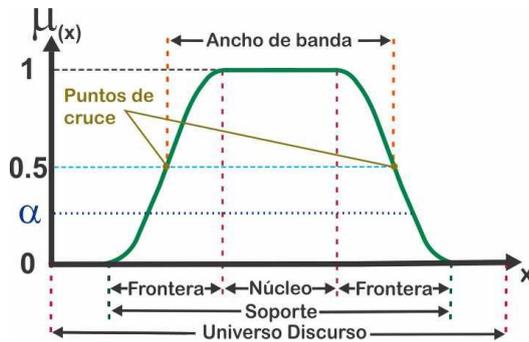
La función de membresía o función de pertenencia (membership function en inglés) representa el grado de pertenencia de los elementos del universo discurso a un subconjunto difuso y que está definido por una etiqueta. La función de membresía $\mu_{A(x)}$ para un subconjunto difuso A, sería: $\mu_{A(x)} \rightarrow [0.0, 1.0]$, cuando:

- $\mu_{A(x)} = 1.0$, x pertenece totalmente al conjunto A.
- $\mu_{A(x)} = 0.0$, x no pertenece totalmente al conjunto A.
- $0 < \mu_{A(x)} < 1.0$, x pertenece parcialmente al conjunto A.

El valor entre 0 y 1 es el rango de valores más utilizado para representar una función de membresía. En la figura 18 se muestra las partes que conforman una función de membresía.

Figura 18

Partes de una función de membresía.

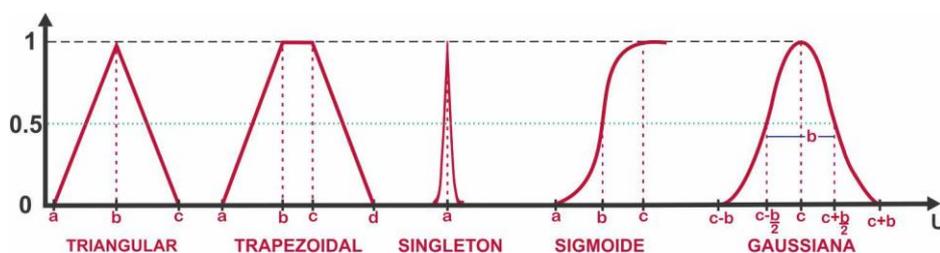


Nota: Ponce Cruz, (2010)

Tipos de funciones de membresía. En un principio cualquier función es aceptada para definir un conjunto difuso; pero, hay funciones que son más usadas que otras; esto debido al costo computacional que conlleva su uso. Los tipos de funciones de membresía más utilizadas (figura 19) son: Triangulares, trapezoidales, singleton, sigmoidea y gaussiana (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006).

Figura 19

Funciones de membresía.



Nota: Elaboración propia

- **Función tipo Triangular:** Esta función como indica su nombre, consta de una parte con pendiente positiva hasta alcanzar la unidad, luego desciende de manera uniforme; está definida en tres puntos. Este tipo de función es



la más adecuada para definir propiedades donde se tiene un valor óptimo central que se va perdiendo según se va alejando de él.

- **Función tipo trapezoidal:** La función tipo trapecio o π , es una generalización de la función triangular. Esta función está definida por cuatro puntos, se utiliza normalmente en sistemas difusos sencillos. Esta función es empleada cuando hay un rango de valores óptimos, donde a su alrededor las condiciones no son adecuadas. Es empleada especialmente en aplicaciones basadas en microprocesador. Al igual que la función triangular, permite definir un conjunto borroso con pocos datos y conseguir un valor de pertenencia con pocos cálculos.
- **Función tipo Singleton:** Es una expresión inglesa de simple, la función hace referencia a que un único valor de pertenencia es igual a uno en un solo punto y el resto es igual a cero.
- **Función tipo Sigmoidea:** La función sigmoidea o tipo S, en esta función el segmento de subida es una curva de segundo orden y que cambia de concavidad en un punto de inflexión dado hasta llegar a 1 y se mantiene en ese valor. Como característica de esta función se observa que el cambio de pertenencia no es tan drástico por lo que representa más al mundo real.
- **Función tipo Gaussiana:** La función Gaussiana o tipo π , tiene forma de la típica campana de Gauss y resulta adecuado para conjuntos definidos en torno a un valor central.

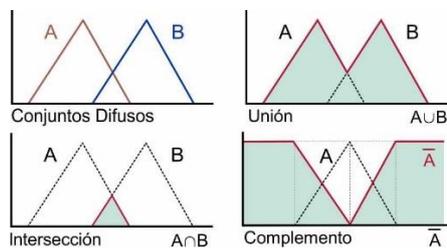
2.2.3.2.8. Operaciones de conjuntos difusos

Las operaciones básicas de los conjuntos difusos se generalizan de las definiciones de conjuntos clásicos. Estas operaciones básicas se pueden expresar en términos de las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos y que pueden

tomar un conjunto de valores continuos entre 0.0 y 1.0; las operaciones están definidas dentro de $[0; 1] \times [0; 1] \rightarrow [0; 1]$. Para profundizar más sobre este tema consultar (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006), (Ponce Cruz, 2010) y (Zadeh, 1965). Las tres operaciones fundamentales (figura 20) son: Unión, intersección y complemento.

Figura 20

Operaciones básicas con conjuntos difusos.



Nota: González Morcillo, (2011)

Unión; la forma generalizada de la unión es la co-norma T (norma S). La unión de dos conjuntos difusos corresponde a los valores máximos de pertenencia de ambos conjuntos (figura 20). Se define como (Zadeh, 1965):

$$A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (12)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (13)$$

Intersección; la forma generalizada de la unión es la norma T. La intersección de dos conjuntos difusos corresponde a aquellos valores que están siempre por debajo del máximo de cada una de las funciones (figura 20). Se define como (Zadeh, 1965):

$$A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (14)$$

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (15)$$

Complemento; el complemento de un conjunto difuso A, se denota por \bar{A} . El complemento difuso es el reflejo de la función original (figura 20). Se define como (Zadeh, 1965):

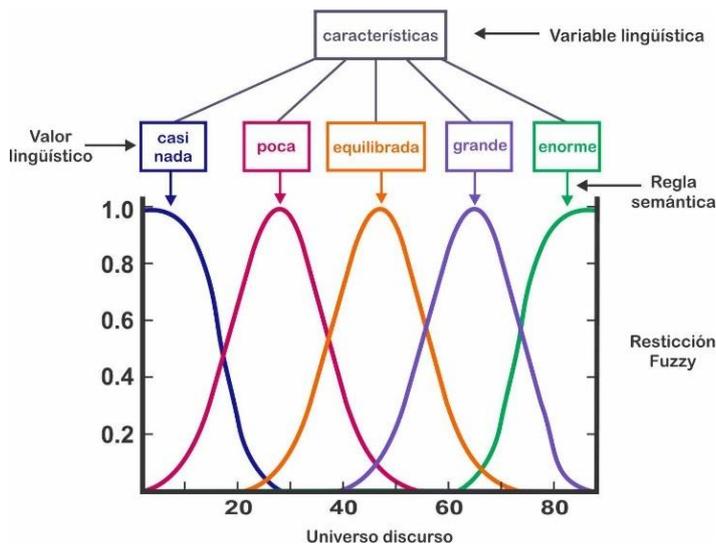
$$\mu_{\bar{A}(x)} = 1 - \mu_{A(x)} \quad \forall x \in X \quad (16)$$

2.2.3.2.9. Variable Lingüística

Una variable lingüística es aquella variable donde sus valores son palabras (lenguaje natural) y se puede representar por un conjunto difuso. La variable lingüística es ambigua y está conformado por etiquetas lingüísticas que nos permite asignar una descripción más detallada acerca de un valor lingüístico (figura 21). En otras palabras, una variable lingüística nos permite representar mediante valores cualquier valor del que no se tenga una definición precisa (Ponce Cruz, 2010).

Figura 21

Representación de una función de membresía.



Nota: Zadeh, (1975a)



En términos más formales, una variable lingüística, está caracterizada por una quintupla (Zadeh, 1975a), (Zadeh, 1975b) $(A, T(A), U, G, M)$, donde:

- **A** es el nombre de la variable lingüística
- **T(A)** es un conjunto de valores lingüísticos (descripciones), es decir, una colección de etiquetas lingüísticas aceptadas por la variable; siempre es un conjunto finito.
- **U** es el universo discurso donde se define $T(A)$.
- **G** es un conjunto de reglas sintácticas (como se escribe) que genera los valores lingüísticos.
- **M** es un conjunto de reglas semánticas (que significa) que asocia cada valor lingüístico con su significado $M(A)$.

Una variable lingüística involucra términos gramaticales como:

- Términos primarios (adjetivos): “Bajo”, “alto”, etc.
- Modificadores (adverbios): “Muy”, “más”, “menos”, “cerca de”.
- Conectores lógicos: Not, and y or.

Analizando la figura 21, primeramente, se define una variable lingüística cuyo nombre es posesión del balón en el contexto de un partido de fútbol y está asociada a valores de un universo discurso de cero a noventa minutos; la posición del balón puede tomar cinco valores lingüísticos (casi nada, poca, equilibrada, grande y enorme). Luego se define una regla sintáctica, es decir, como describir cada valor lingüístico asociado a una regla semántica de que significa cada uno de ellos. Se relaciona los términos de la siguiente manera:

- **A** = Posesión del balón.



- $T(A) = \{\text{casi nada, poca, equilibrada, grande y enorme}\}$.
- $U = [0,90]$ minutos,
 - $M(\text{casi nada}) = \text{Sig}(A; -0.3,17)$,
 - $M(\text{poca}) = \text{Gauss}(A;9,30)$,
 - $M(\text{equilibrada}) = \text{Gauss}(A;9,50)$, $M(\text{grande}) = \text{Gauss}(A;9,67)$,
 - $M(\text{enorme}) = \text{Sig}(A;0.3,74)$.

2.2.3.2.10. Razonamiento aproximado

Al razonamiento aproximado también se le conoce como razonamiento difuso. Se entiende por razonamiento aproximado como la capacidad humana para obtener conclusiones útiles a partir de información con un cierto grado de incertidumbre (información incompleta o imprecisa). L.A. Zadeh introduce conceptos como razonamiento difuso y otros componentes que terminarían siendo el cuerpo de la lógica Fuzzy; en su propuesta plantea utilizar conjuntos difusos para manejar cuantitativamente conceptos cualitativos (Zadeh, 1975a).

2.2.3.2.11. Reglas borrosas

Las reglas borrosas o reglas difusas (Fuzzy rules en inglés) nos permiten expresar el conocimiento experto combinando uno o más conjuntos difusos de entrada (antecedentes o premisas) y se les asocia un conjunto difuso de salida (consecuente o consecuencia). Las reglas difusas utilizan relaciones de las variables lingüísticas y sus respectivos valores lingüísticos para tomar decisiones. Su interpretación matemática es:

- Relación difusa (producto cartesiano): $R = A \times B$.
- Implicancia difusa (definiciones lógicas): $I = A \rightarrow B$.

Para representar el conocimiento de forma completa se establece varias reglas difusas que se agrupan para formar un conjunto de reglas que expresan las relaciones que se conocen entre antecedentes y consecuentes (base de reglas) (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006).

Los conjuntos difusos del antecedente se relacionan mediante conectores lógicos como “y”, “o”, “no”. Las reglas difusas se escriben de la forma IF-THEN (Si-Entonces) y es expresada como:

R: IF <proposición difusa>THEN <proposición difusa>

2.2.3.2.12. Inferencia difusa

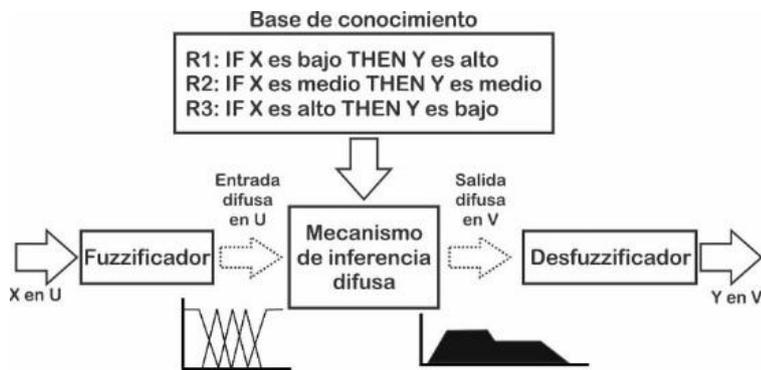
La inferencia difusa es el proceso por el cual se obtiene un valor de salida a partir de datos de entrada y una base de conocimientos (reglas difusas). En la lógica clásica existen dos métodos básicos de inferencia, el Modus Ponens (razonamiento directo) y el Modus Tollens (razonamiento inverso); el Modus Ponens es el más utilizado en aplicaciones de la lógica a la ingeniería, pues conserva la relación causa-efecto. En la lógica difusa el Modus Ponens se extiende al que se llama Modus Ponens Generalizado (GMP) que es la herramienta de razonamiento aproximado más extendida (Martín del Brio & Sanz Molina, 2006).

Las reglas difusas y el razonamiento difuso son la columna vertebral de los sistemas de inferencias difusas, que son la herramienta de modelado más importante basado en la teoría de conjuntos difusos.

Inferencia de Mamdani. Este método de inferencia es el más utilizado, fue propuesto en 1974 por Ebrahim Mamdani (Mamdani, 1974). La figura 22 muestra la configuración básica de este tipo de inferencia.

Figura 22

Estructura básica inferencia Mamdani.



Nota: https://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/Fuzzy.html

Fuzzificador (difusificación): Los valores de entrada de un sistema difuso tipo Mamdani normalmente es un valor crisp (booleano); este valor se convierte a un lenguaje que el mecanismo de inferencia pueda procesar. El fuzzificador, toma los datos de entrada y los convierte en valores lingüísticos (etiquetas de funciones de membresía) para establecer el grado de pertenencia de los valores de entrada a los conjuntos difusos asociados. Para representar información de conjuntos difusos se debe segmentar en un número definido de partes (universo discreto).

Mecanismo de Inferencia: Cuando ya se tiene las diferentes membresías de pertenencias que nos da el fuzzificador, se deben procesar esos datos para generar una salida difusa. El sistema de inferencia toma estos niveles de pertenencia y se sostiene en la base de reglas para producir una salida difusa.

Base de conocimiento: La base de conocimiento contiene toda la información del proceso a controlar; está conformado por una base de datos (definición y manipulación de datos) y una base de reglas lingüísticas (conocimiento lingüístico). La base de reglas tiene la siguiente forma.

Figura 23

Base de conocimiento Mamdani.

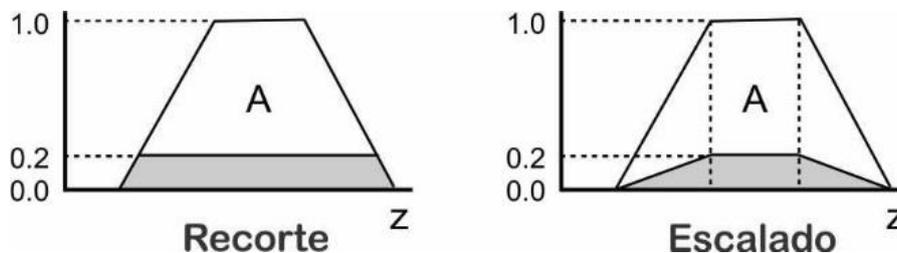


Nota: https://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/Fuzzy.html

El sistema difuso tipo Mamdani las reglas que relacionan el antecedente y el consecuente están dadas por expresiones lingüísticas. En la evaluación de reglas, las entradas se aplican a los antecedentes y se obtiene un valor que se aplica al consecuente. Se utiliza la conorma y norma T estándar, para la evaluación del valor de verdad. El valor obtenido del antecedente se aplica al consecuente, mediante un recorte o escalado (24). El método de recorte (clipping) es el más utilizado.

Figura 24

Conjunto recortado y escalado.

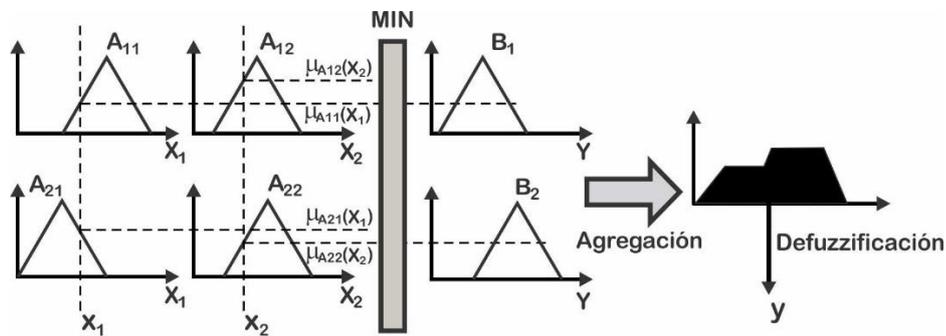


Nota: González Morcilla, (2011)

Agregación. La agregación se encarga de unir las salidas de todas las reglas; combinando funciones de membresías de todos los consecuentes previamente recortados y así conseguir un solo conjunto difuso por cada valor de salida (ver figura 25).

Figura 25

Proceso Mamdani detallado.



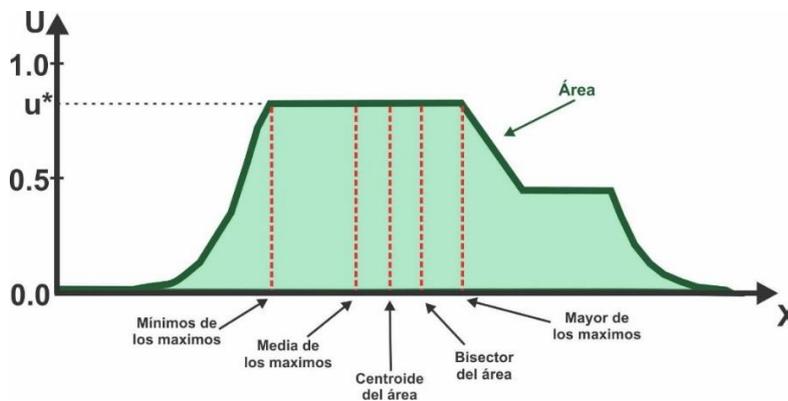
Nota: https://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/Fuzzy.html

Defuzzificador (defusificación) El valor de salida de un sistema difuso tipo Mamdani se expresa con un valor crisp (booleano). Esta etapa toma el conjunto difuso que produjo toda la base de reglas y nos permite obtener un valor resultante de salida (figura 26). El defuzzificador es la herramienta para conseguir la acción de un control clásico a partir de una acción de control difusa. Algunos métodos de defusificación para hallar el valor crisp de salida, son los siguientes:

- Centro de gravedad.
- Máximo Central (MOM).
- Bisectriz de área.
- Máximo más pequeño (SOM).
- Máximo más grande (LOM), etc.

Figura 26

Distintos métodos de defusificación.



Nota: https://members.tripod.com/jesus_alfonso_lopez/Fuzzy.html

El método más utilizado es el centro de gravedad o centroide difuso; esta metodología es sencilla, pues calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas iguales. El centroide difuso se puede representar en forma discreta:

$$Salida = \frac{\sum_{x=a}^b \mu_{A(x)} \cdot x}{\sum_{x=a}^b \mu_{A(x)}} \quad (17)$$

2.2.4. Neumático y cuarto de vehículo

2.2.4.1. Neumático

El neumático es una pieza fabricada a partir de un compuesto basado en caucho y presenta una alta resistencia a la tracción. El neumático es el único componente del vehículo que interactúa con la carretera, pues, optimiza el contacto entre la rueda y la carretera gracias a la adherencia y fricción; además de producir las fuerzas necesarias para la tracción, el frenado y el direccionamiento; asume una función muy importante en la dinámica de frenado (Rangelov, 2004). El sistema ABS es efectivo, sólo porque el neumático lo permite. El neumático realiza una variedad de funciones como:

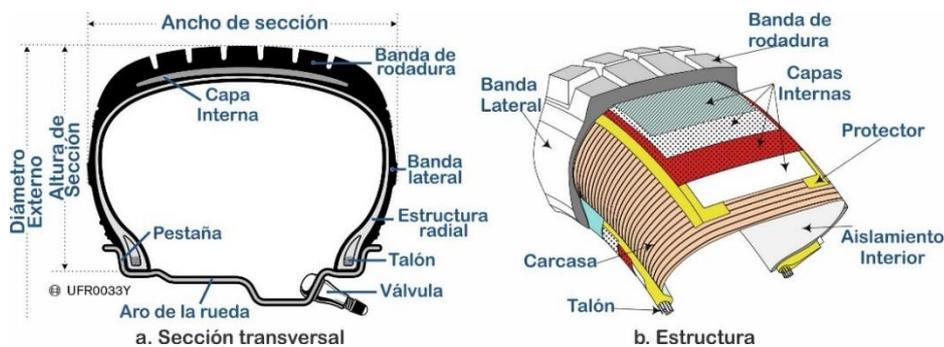
- Soportar la carga del vehículo.
- Transmitir la potencia motriz (tracción).
- Asegurar la dirección del vehículo manteniéndolo en su trayectoria.
- Contribuir a la estabilidad y al frenado.
- Contribuir a mejorar la eficacia de la suspensión.
- Generar y transmitir fuerzas laterales para el giro en curvas.

2.2.4.1.1. Estructura de un neumático

El neumático tiene una forma toroidal con aire comprimido en su interior, su diseño es muy importante y su construcción es compleja (figura 27).

Figura 27

Componentes del neumático.



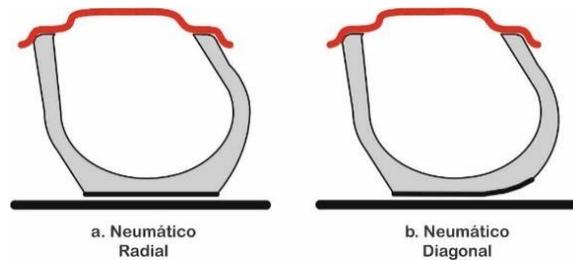
Nota: Jazar, (2017)

Estructuralmente existen neumáticos diagonales y radiales; una diferencia a tomar en cuenta entre ellos es el grado de adherencia a la carretera cuando se presentan fuerzas laterales (figura 28). Los neumáticos radiales son los más utilizados en la actualidad, debido a que entregan una mayor resistencia y estabilidad. Una de las partes importantes, es la banda de rodadura, debido a que es donde se establece y genera las fuerzas en la zona de contacto con la carretera. Otra parte importante es la carcasa, que está compuesto por hilos metálicos

anclados en el talón, y que está fabricado por un conjunto de cables de acero de alta resistencia revestido de caucho que se fija sobre el aro y trasfiere las fuerzas que genera el vehículo (Rangelov, 2004).

Figura 28

Comparación de adherencia del neumático.



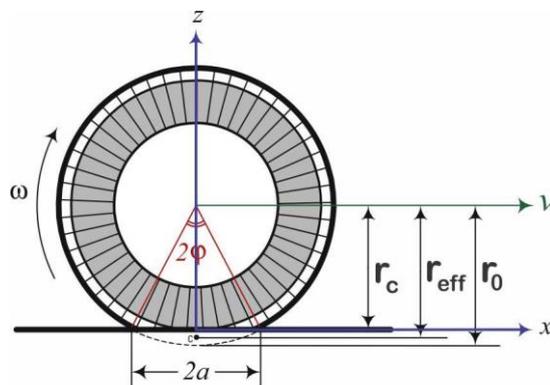
Nota: Jazar, (2017)

2.2.4.1.2. Radios del neumático

El neumático al estar fabricado con material que se deforma bajo carga y operación, presenta tres radios (figura 29) con valores distintos: geométrico, con carga y efectivo. Los radios del neumático nos permiten confirmar las dimensiones óptimas, con el fin de garantizar un buen funcionamiento y adecuado rendimiento.

Figura 29

Radios del neumático radial en giro libre



Nota: Jazar, (2017)



- **Radio sin carga**, también se le conoce como radio geométrico (r_o), es la distancia del centro de la rueda al centro de la banda de rodadura (punto más externo del neumático); este radio siempre debe ser medido en un neumático nuevo y debe estar con presión de aire (inflado).
- **Radio con carga**, también se le conoce como radio cargado (r_c), es la distancia del centro de la rueda al punto de contacto entre el neumático y la carretera; el radio se mide en un neumático que tenga presión de aire que este cargado.
- **Radio dinámico**, también se le conoce como radio efectivo (r_{eff}), es la relación que existe entre la velocidad angular y la velocidad lineal medida en campo de operación; además, depende de distintos factores como, presión de inflado, carga sobre la rueda, desgaste del revestimiento del neumático. La velocidad angular de una rueda no es constante, debido a que entre la rueda y la carretera no hay un punto, sino una superficie de contacto y una deformación del neumático.

Los neumáticos se identifican con un código alfanumérico que se encuentra en su banda lateral (cuatro números y dos letras), a manera de ejemplo 215/65R16 98H nos indica:

- 215: Ancho del neumático en mm (A_n).
- 65: Relación entre altura y ancho del neumático, en este caso 65 % (P_a).
- R: Estructura radial.
- 16: Diámetro del aro en pulgadas (D_c).
- 98: Código de peso máximo que soporta el neumático, en este caso 750 Kg.

- H: Código de velocidad máxima, en este caso 210kph.

La ecuación 18 nos permite aproximar el radio geométrico del neumático (en mm) a partir de los datos de identificación del neumático.

$$r_0 = \frac{A_n \cdot \frac{Pa}{100} \cdot 2 + D_c \cdot 25.4}{2} \quad (18)$$

Para una rueda de material rígido, la relación entre la velocidad lineal radial (V_R) y la velocidad angular radial (ω_R), se representa en la siguiente ecuación:

$$v_R = \omega_R \cdot r_0 \quad (19)$$

La velocidad angular de un neumático es menor que la velocidad angular de una rueda rígida con un mismo radio cargado y la misma velocidad lineal. En la figura 29 se muestra la relación que existe en un giro libre: $r_c < r_{eff} < r_0$; el centro de la rotación de la superficie deformada que es el punto C, se encuentra por debajo de la superficie de rodamiento. Realizando una aproximación tenemos:

$$r_c = r_0 \cdot \cos(\varphi) \quad (20)$$

$$a = r_0 \cdot \sin(\varphi) \quad (21)$$

La ecuación 21 se compara con una rueda rígida y aproximando se obtiene (Jazar, 2017):

$$a = r_0 \cdot \sin(\varphi) = r_{eff} \cdot \varphi \quad (22)$$

Con esto se puede aproximar los radios con carga estática y efectivo, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$r_c \approx 0.92 \cdot r_0 \quad (23)$$

$$r_{eff} \approx 0.98 \cdot r_0 \quad (24)$$

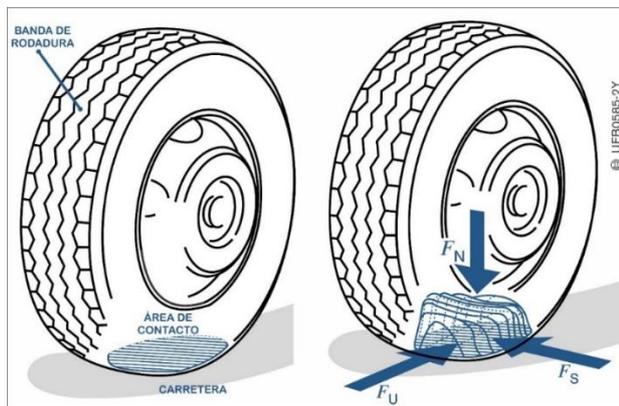
Estas aproximaciones se realizan para un neumático radial (Jazar, 2017).

2.2.4.1.3. Fuerzas en el neumático

Para que un vehículo se mueva, cambie de dirección o se detenga necesita de fuerzas que actúen a través de los neumáticos (Astocondor Villar, 2018); dichas fuerzas se producen o se generan dentro de la zona de contacto del neumático y la carretera (área de contacto o huella). En la figura 30 se muestran las principales fuerzas presentes en un neumático.

Figura 30

Fuerzas que actúan en el neumático.



Nota: Bosch, (2005)

- Fuerza longitudinal (F_U), es producida por transmisión de potencia o frenado. Permite al conductor aumentar la velocidad del vehículo con el acelerador o reducir la velocidad con los frenos. Toma valor positivo cuando actúa la fuerza motriz (tracción) y es negativa cuando hay una fuerza de frenado.



- Fuerza vertical del neumático o fuerza normal (F_N), es la que actúa sobre el neumático y la superficie de la carretera, está determinada por la proporción del peso del vehículo que actúa sobre la rueda en cuestión.
- Fuerza lateral (F_S), es la que actúa sobre la rueda al girar, permiten que el vehículo pueda cambiar de dirección.

2.2.4.1.4. Clasificación del modelamiento numérico de neumáticos

Se desarrollaron modelos para comprender la generación de fuerzas y momentos en el contacto del neumático y carretera; posteriormente los modelos mejoraron para estudiar el efecto que tienen algunos parámetros en el neumático. Finalmente, los modelos fueron adaptados, lo más posible, para aproximar curvas medidas a datos de ensayo. Se enumeran tres categorías de modelos para estudiar el comportamiento de los neumáticos (Pacejka, 2012):

- **Modelos físicos.** Estos modelos están contruidos tomando como referencia las características estructurales del neumático y las propiedades del material. El modelo explica detalladamente el comportamiento del neumático y por lo general es utilizado para el diseño y el análisis de neumáticos. No son los más idóneos para simular la dinámica del vehículo; una desventaja que presenta es el coste computacional. En esta categoría se encuentran los modelos que se apoyan en Elementos Finitos (EF).
- **Modelos analíticos.** Estos modelos cuantifican las fuerzas originadas en el neumático y permiten predecir sus características elásticas por medio de ecuaciones físicas simplificadas. Toman en cuenta: Las propiedades de fricción del contacto neumático-carretera, distribución de presiones verticales en el área de contacto, el comportamiento de la banda de

rodadura y el comportamiento de la carcasa/cinturón. Algunos modelos desarrollados son: Modelo de Dugoff, modelo Brush, modelo de Fiala y modelo Lugre. Tiene como principal inconveniente resolver ecuaciones diferenciales parciales para conocer el comportamiento en régimen transitorio del neumático (difícil si se desea agregar el modelo para el control de un vehículo).

- **Modelos empíricos.** Estos modelos se basan exclusivamente en experimentos sobre neumáticos; explican el comportamiento del neumático por medio de tablas o fórmulas matemáticas que no obedecen a un suceso físico en particular. Los modelos empíricos permiten calcular fuerzas de forma precisa sin necesidad de resolver ecuaciones; se ajustan a una variedad de neumáticos y a distintas condiciones de operación. El modelo que más destaca para la simulación del comportamiento de los neumáticos, es el propuesto por Hans B. Pacejka (conocido como Fórmula Mágica) y tiene como propósito explicar el comportamiento real del neumático de acuerdo a distintos parámetros definidos, un inconveniente es que necesita de datos experimentales del neumático a modelar. La expresión de la Fórmula Mágica para un deslizamiento longitudinal es:

$$y_{(x)} = D \cdot \text{sen}[C \cdot \arctan\{Bx - E \cdot (Bx - \arctan(Bx))\}] \quad (25)$$

Donde B (factor de rigidez), C (factor de forma), D (factor pico) y E (factor de curvatura) son las constantes de ajuste y $y(x)$ es una fuerza resultante de un parámetro longitudinal x .

2.2.4.2 Modelamiento matemático

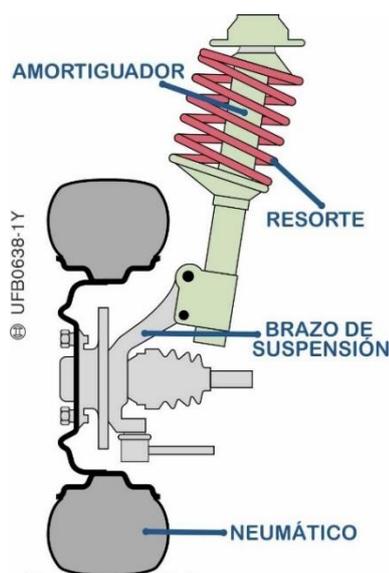
Es una técnica que nos permite resolver problemas reales, mediante la creación de una representación matemática que refleje los componentes y características de un sistema, esta relación nos permite analizar, comprender y evaluar de forma completa el sistema estudiado (Sundaram & Sathyam, 2017).

2.2.4.3. Suspensión del Vehículo

La suspensión está conformada por componentes que conectan la rueda con el chasis de un vehículo; estos componentes almacenan energía en resortes metálicos y la disipan en amortiguadores. La función de la suspensión es atenuar las vibraciones bruscas que se producen en el vehículo a causa de las irregularidades de la carretera; la suspensión tipo MacPherson es la más utilizada en los automóviles modernos (figura 31). La suspensión de un vehículo se clasifica en pasivos, activos y semiactivos (Hurel et al., 2017).

Figura 31

Sistema de suspensión MacPherson.



Nota: Bosch, (2005)

2.2.4.4. Deflexión del neumático

La deflexión es la deformación elástica recuperable que registra un neumático a partir de la aplicación de una fuerza externa; la deformación se presenta en las paredes laterales del neumático (Rangelov, 2004).

2.2.4.5. Dinámica del vehículo

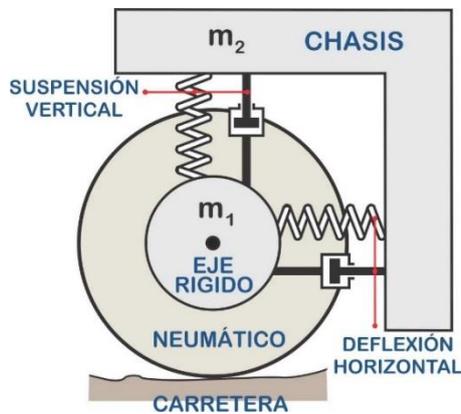
Para comprender el adecuado funcionamiento de los sistemas ABS, se analiza la dinámica del vehículo. La dinámica del vehículo estudia el movimiento del vehículo y los efectos que causan las fuerzas generadas por el contacto entre el neumático y la carretera. Existen distintos modelos para representar un vehículo y la diferencia entre ellos es la precisión y las reducciones que presentan. Algunos modelos son más adecuados que otros, dependiendo de la tarea que se desee realizar (Gonzalez San Miguel, 2019).

2.2.4.6. Modelo de cuarto de vehículo

El modelo de cuarto de automóvil es un modelo bastante utilizado principalmente para analizar la suspensión y la maniobra de frenado del vehículo (Hurel et al., 2017). El modelo asume que el sistema de suspensiones y las ruedas del vehículo pueden dividirse en cuatro partes iguales. Este modelo es muy utilizado para realizar un análisis de sistemas ABS (Gonzalez San Miguel, 2019). El modelo de cuarto de vehículo está conformado por un modelo de suspensión vertical, un modelo de deflexión horizontal y un modelo de neumático (figura 32). La suspensión se modela como un resorte y amortiguador lineal, que conecta al chasis del cuarto de vehículo con masa m_2 y un conjunto de partes móviles conectadas al eje rígido con masa m_1 (Rangelov, 2004).

Figura 32

Representación de un modelo de cuarto de vehículo.



Nota: Gonzalez San Miguel, (2019)

2.2.4.6.1. Modelo de suspensión vertical

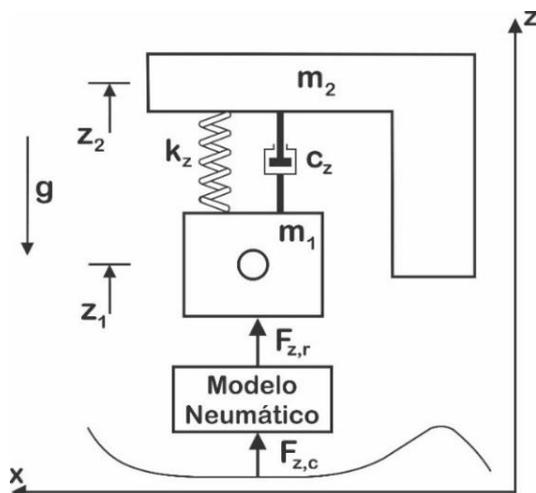
Se consideran todas las fuerzas que actúan en el eje vertical (eje z). Al realizar un análisis en la figura 33, obtenemos las siguientes ecuaciones (Rangelov, 2004):

$$\ddot{z}_1 \cdot m_1 = -k_z \cdot (z_1 - z_2) - c_z \cdot (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - m_1 \cdot g + F_{z,r} \quad (26)$$

$$\ddot{z}_2 \cdot m_2 = -k_z \cdot (z_2 - z_1) - c_z \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - m_2 \cdot g \quad (27)$$

Figura 33

Fuerzas en el eje vertical.



Nota: Rangelov, (2004)

El componente vertical $F_{z,r}$ es la fuerza del neumático sobre la rueda; resulta del modelo de interacción entre neumático y carretera, se ve reflejada por el tipo de carretera, la posición de z_1 y la velocidad \dot{z}_1 .

Para hallar las condiciones iniciales de la posición del eje rígido (z_{10}) y el desplazamiento de la carrocería del cuarto de vehículo (z_{20}), se utilizan las siguientes ecuaciones (Rangelov, 2004):

$$z_{10} = r_0 - g \cdot (m_1 + m_2 + m_{belt})/k_{z,tire} \quad (28)$$

$$z_{20} = z_{10} + l_{z0} - g \cdot m_2/k_z \quad (29)$$

La tabla 1 muestra los parámetros usados en el modelo.

Tabla 1

Parámetros del modelo de suspensión vertical

Parámetros	
Cuarta parte de la masa del vehículo	m_2
Masa del eje y componentes	m_1
Rigidez del resorte de suspensión	k_z
Amortiguación del amortiguador de suspensión	c_z
Constante gravitacional	G
Posición inicial del eje rígido	z_{10}
Desplazamiento inicial de la carrocería del cuarto de vehículo	z_{20}
Radio del neumático sin carga	r_0
Rigidez del modelo del neumático	$k_{z,tire}$
Longitud del resorte sin carga	l_{z0}
Masa del aro de rueda	m_{belt}

Nota: Elaboración propia

2.2.4.6.2. Modelo de deflexión de suspensión horizontal

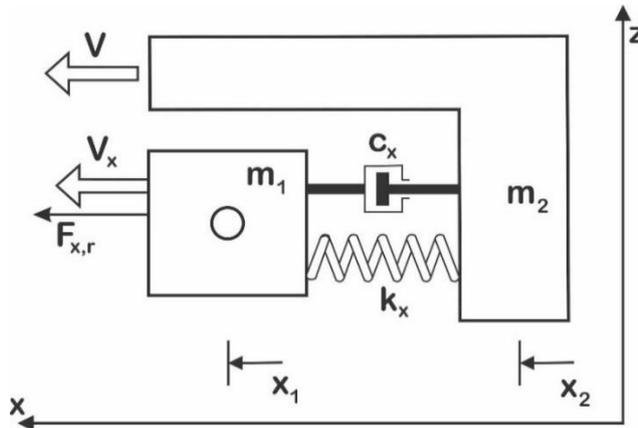
Se consideran todas las fuerzas que actúan en el eje horizontal (eje x). De la figura 34, obtenemos las siguientes ecuaciones de movimiento (Rangelov, 2004):

$$\ddot{x}_1 \cdot m_1 = -k_x \cdot (x_1 - x_2) - c_x \cdot (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + F_{x,r} \quad (30)$$

$$\ddot{x}_2 \cdot m_2 = -k_x \cdot (x_2 - x_1) - c_x \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (31)$$

Figura 34

Fuerzas en el eje horizontal



Nota: Rangelov, (2004)

El componente horizontal $F_{x,r}$ es la fuerza de reacción del neumático; se obtiene del modelo de interacción entre el neumático y la carretera, se fundamenta en la posición horizontal x_1 y la velocidad \dot{x}_1 . La tabla 2 muestra los parámetros usados en el modelo.

Tabla 2

Parámetros del modelo horizontal

Parámetros	
Cuarta parte de la masa del vehículo	m_2
Masa del eje y componentes	m_1
Rigidez del cumplimiento de la suspensión	k_x
Amortiguación del cumplimiento de la suspensión	c_x
Velocidad del vehículo antes de frenar	V

Nota: Elaboración propia

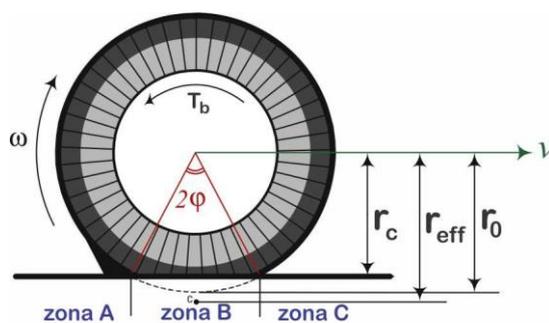
2.2.4.7. El neumático durante el frenado

Es necesario comprender las características de los neumáticos para diseñar un adecuado sistema de frenos. Las fuerzas de frenado y de dirección que se

generan dentro del área de contacto entre el neumático y la carretera son fundamentales para el comportamiento del neumático. Las propiedades dinámicas de los neumáticos (inercia y rigidez) cumplen un rol importante en el diseño de estrategias de control de los sistemas de freno antibloqueo (Rangelov, 2004). Analizando la figura 35, cuando se aplica un momento o par de frenado (T_b) la banda de rodadura se estira en la zona A, y en la zona C la banda de rodadura se comprime (aún más que en un giro libre), con la presencia de deslizamiento después de cierto rango en la zona B, que dependerá de la intensidad del torque de frenado. El radio efectivo crece en comparación al radio geométrico e incluso para grandes torques puede superarlo. Al aplicar el freno, las zapatas de freno presionan contra los tambores de freno o las pastillas de freno presionan contra los discos. Esto genera fuerzas de fricción, cuyo nivel es controlado por el modulador hidráulico, el producto de las fuerzas de fricción y la distancia a la que actúan del eje de rotación de la rueda es el T_b .

Figura 35

Radio efectivo durante un frenado.



Nota: Jazar, (2017)

2.2.4.7.1. Relación de deslizamiento durante el freno

La relación de deslizamiento (λ) mide el deslizamiento de las ruedas del vehículo; nos permite comprender la relación que se presenta entre la deformación

de la rueda y la fuerza longitudinal. La relación de deslizamiento es un parámetro de gran importancia en el sistema de frenos antibloqueo y la dinámica del vehículo. Cuando una rueda gira bajo efecto del frenado, se originan procesos físicos complejos en el área de contacto entre el neumático y carretera (presentan una relación no lineal), se presenta un momento en el que la velocidad angular del neumático y la velocidad longitudinal del vehículo no son las mismas (Aly et al., 2011). Esta diferencia de velocidad expresada en porcentaje se conoce como coeficiente de deslizamiento longitudinal, este coeficiente cumple un desempeño crucial en la generación de fuerzas del neumático (Gonzalez San Miguel, 2019).

El deslizamiento longitudinal durante el frenado, es definida por la Society of Automotive Engineers (SAE) como:

$$\lambda(-) = \frac{V_{sx}}{V_x} \Rightarrow \lambda = -\frac{V_{sx}}{V_x} = -\frac{(V_x - \omega \cdot r_{eff})}{V_x} \quad (32)$$

$$\lambda = -\frac{V_x - \omega \cdot r_{eff}}{V_x} = \frac{\omega \cdot r_{eff}}{V_x} - 1 \quad (33)$$

Donde:

- λ es la relación de deslizamiento.
- V_{sx} es la velocidad de deslizamiento longitudinal.
- V_x es la velocidad longitudinal del vehículo.
- ω es la velocidad angular de la rueda.
- r_{eff} es el radio efectivo del neumático.

Por lo tanto, cuando $\lambda = 0$, es una característica del movimiento libre de la rueda ($\omega \neq 0$). Durante un frenado de emergencia, es común tener $\omega = 0$, y por consecuencia, $\lambda = -1$, lo que indica que la rueda está bloqueada. La ecuación 33

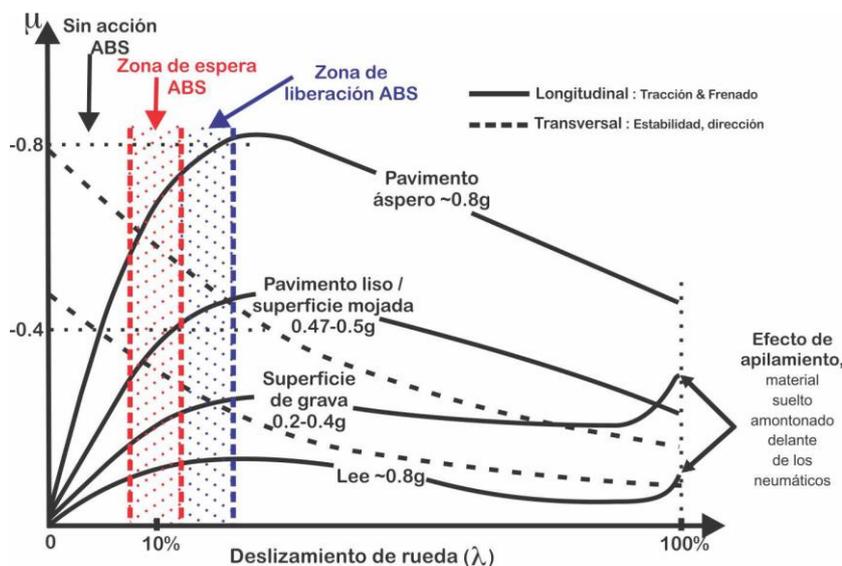
plantea que el deslizamiento durante el freno, ocurre ni bien la rueda gira más lento de lo que normalmente necesitaría la velocidad del vehículo en carretera; y que solo bajo esta condición se consigue transmitir fuerzas de aceleración o fuerzas de frenado (Aly et al., 2011).

Analizando la ecuación 33, en condiciones normales de manejo, cuando el vehículo se desplaza libremente (relación entre V_x y ω):

$$V_x = \omega \cdot r_{eff} \quad (34)$$

Figura 36

Relación del coeficiente de fricción y deslizamiento de rueda.



Nota: Aly et al, (2011)

La figura 36 muestra la relación que existe entre el coeficiente de frenos y el deslizamiento de rueda; se observa que los valores deslizantes para la fuerza de frenado/tracción son más altos que los valores para la fuerza de estabilidad/dirección. Cuando el deslizamiento está en 0 %, la rueda gira libremente; y cuando está al 100 % la rueda está totalmente bloqueada. Una rueda bloqueada en carretera genera una fuerza de manejo baja y una fuerza de dirección

mínima. La zona de color rojo indica que el ABS está en espera y la zona de color azul es cuando entra en acción el ABS. Un deslizamiento óptimo se encuentra dentro del rango de 10 % al 25 % del deslizamiento de rueda, y es donde se consigue un valor de frenado máximo.

2.2.4.7.2. Fuerzas y momentos

Cuando se aplica el par de freno en la rueda, se genera una fuerza de frenado (F_b) entre el neumático y la superficie de carretera. El coeficiente de fricción es una función no lineal del deslizamiento (ecuación 35), además depende de la naturaleza de superficie de carretera, estado del neumático, velocidad del vehículo en carretera y las condiciones climatológicas (tabla 3). El coeficiente de fricción determina el grado en que el par de frenado es realmente efectivo, de la ecuación 1 obtenemos:

$$F_x = u_x \cdot F_{z,c} \rightarrow u_x = f(F_{z,c}, \lambda) \quad (35)$$

Tabla 3

Valores máximos del coeficiente de fricción de neumáticos/carreteras

Superficie	Condiciones climáticas	Coefficientes de fricción
Asfalto y concreto	Seco	0.8 – 0.9
Superficie	Condiciones climáticas	Coefficientes de fricción
Concreto	húmedo	0.8
Asfalto	húmedo	0.5 – 0.6
Camino de tierra	seco	0.7
Camino de tierra	húmedo	0.5 – 0.6
Nieve	duro	0.3
Hielo		0.1

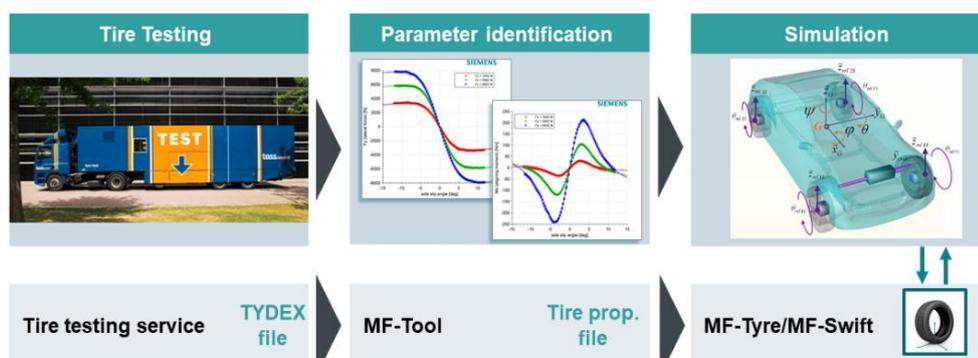
Nota: Rangelov, (2004)

2.2.4.8. Modelo del neumático MF-Tire/MF-Swift

El modelo adoptado para la dinámica del neumático y la interacción neumático-carretera es el modelo de neumático MF-Tire/MF-Swift que proporciona Simcenter Tire perteneciente a la marca Siemens (figura 37); este modelo fue evolucionando con el paso de los años, desde su primera versión “Delft-Tire” en 1987 (TNO Automotive y Delft University of Technology - Holanda) hasta la actualidad con su versión “MF-Tire/MF-Swift 2306” (Siemens). La interacción neumático-carretera proporciona una descripción de los fenómenos de contacto y la influencia del neumático sobre el vehículo, toda esta información es utilizada para que el vehículo pueda ser conducido con seguridad y tenga una comodidad frente a cualquier situación. La librería se basa en el estándar mundial conocida como Fórmula Mágica y la teoría de modelado de neumáticos, ambos fueron ampliamente desarrollados por el profesor Pacejka (Pacejka, 2012); lo que permite modelar el comportamiento altamente no lineal del neumático. El sistema de unidades que utiliza el modelo del neumático es el S.I., permite las siguientes unidades: metro, Newton, radianes, kilogramo, segundo y Kelvin.

Figura 37

Herramientas Simcenter Tire.

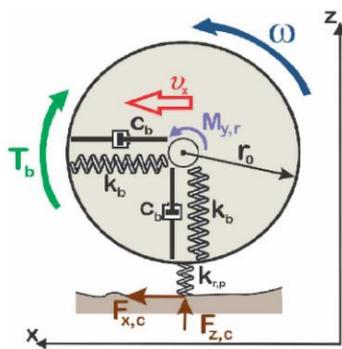


Nota: O'Neill y Melvin, (2022)

En este modelo la banda de rodadura del neumático se modela como un anillo rígido que está suspendido en el aro de la rueda por resortes k_b y amortiguadores c_b (representan las paredes del neumático y el aire presurizado). El modelo usa un resorte con rigidez $k_{r,p}$ que permite generar la fuerza vertical en el área de contacto (figura 38).

Figura 38

Representación de las fuerzas del modelo SWIFT.



Nota: Rangelov, (2004)

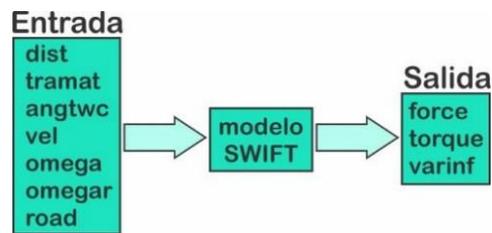
En la interacción entre la carretera y el neumático, el modelo del neumático proporciona fuerzas que son indicadas con el subíndice c. Las fuerzas que se utilizarán como entrada para el modelo de cuarto de vehículo son resultado del modelo del neumático y se indican con el subíndice r. De la figura 38, se puede apreciar el par de fuerza ejercido por el neumático $M_{y,r}$ actúa sobre el aro en dirección positiva (sentido anti horario); también, se observa el par de freno T_b generado por los frenos, que actúa sobre el aro en sentido opuesto a $M_{y,r}$.

2.2.4.8.1. Parámetros del modelo MF-Swift

En la figura 39, el modelo SWIFT requiere señales de entrada para generar las señales de salida (fuerzas y momentos).

Figura 39

Entradas y salidas del modelo SWIFT.



Nota: Siemens, (2023)

Señales de entrada:

- **dist** - un vector con las coordenadas x, y, z del eje de la rueda en el sistema de coordenadas global [3 elementos].
- **trammat** - un vector que especifica la transformación del sistema de coordenadas, fijado al soporte de la rueda, al sistema de coordenadas global [9 elementos].
- **angtwc** - ángulo de rotación ϕ de la rueda con respecto al soporte de la rueda sobre el eje de giro de la rueda ($\phi' = \omega$) [1 elemento].
- **vel** - un vector con las tres componentes de la velocidad global del centro de la rueda expresada en el marco local del soporte de la rueda [3 elementos].
- **omega** - un vector con las tres componentes de la velocidad angular global del centro de la rueda [3 elementos].
- **omegar** - velocidad angular relativa de la rueda con respecto al soporte de la rueda sobre el eje de giro de la rueda (ω) [1 elemento].
- **road** (carretera) - ajustes para el perfil de la carretera [20 elementos].

Señales de salida:

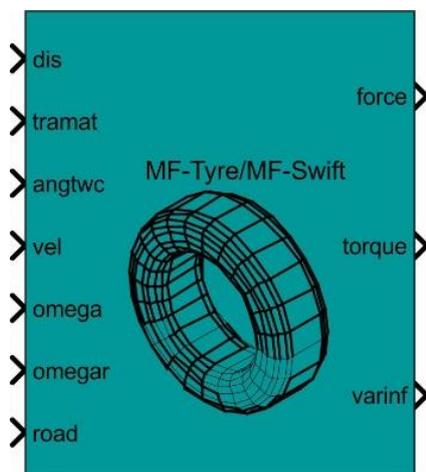
- **force** (fuerzas) - componentes de la fuerza, aplicada por el neumático sobre la llanta en el centro de la rueda.
- **torque** (momentos) - componentes del torque, aplicado por el neumático en el aro en el centro de la rueda.
- **varinf** - matriz que contiene el valor de 55 variables de salida adicionales sobre el comportamiento del neumático.

La interfaz del neumático y carretera que utiliza el modelo MF-Tyre/MF-Swift en Simulink fue elaborado por Simcenter Tire de Siemens (MathWorks, 2023), donde el bloque principal de simulación es MF-Swift (figura 40), esta librería permite representar el comportamiento del neumático de manera eficiente; con el fin de aproximar con cierto grado de precisión ciertas características típicas que se presentan en un neumático cuando interactúa con la carretera.

Para que el modelo de neumático genere fuerzas y momentos, necesita información del modo de funcionamiento:

Figura 40

Bloque en simulink de la librería MF-Swift



Nota: MathWorks, 2023)



- Método de carretera, indica el tipo de carretera (superficie) por donde circulará el neumático.
- Lado del neumático, se establece como izquierdo o derecho y es definido en el archivo de propiedades del neumático
- Método de contacto, es donde el neumático obtiene información de la superficie de carretera.
- Método dinámico, utiliza las propiedades dinámicas para determinar la respuesta transitoria del neumático.
- Método fuerzas de deslizamiento, permite seleccionar los componentes de fuerza y momentos que se utilizará en la simulación.

Otro parámetro importante es el archivo donde se almacena un conjunto de parámetros del neumático (Tire Property File), este archivo de propiedades tiene la extensión *.**tir** y son obtenidos experimentalmente. Para obtener más información sobre el modelo de neumático MF-Tire/MF-Swift consultar con el manual de usuario (Siemens, 2023).

2.2.4.9. Dinámica de las ruedas

Se necesita los siguientes conceptos: Desplazamiento angular, velocidad angular, aceleración angular y torque angular. Desplazamiento angular (θ), es la diferencia entre una posición angular inicial y final alrededor de un eje de referencia, su unidad en S.I. es rad (radianes), el radian es un ángulo de giro que se usa para el movimiento rotacional. Velocidad angular ($\omega = \dot{\theta}$), es la variación del desplazamiento angular con respecto al tiempo, su unidad en S.I. es rad/s. Aceleración angular ($\dot{\omega}$), es la variación del desplazamiento angular con respecto al tiempo, su unidad en S.I. es rad/s². El par o torque, es una magnitud vectorial

que mide el efecto de giro de una fuerza que se aplica a un objeto, su unidad en S.I. es $N \cdot m$. El momento angular es una magnitud vectorial, se define por el producto de la velocidad angular y la inercia rotacional, su unidad en S.I. es $kg \cdot m^2/s$ (Serway & Jewett, 2018).

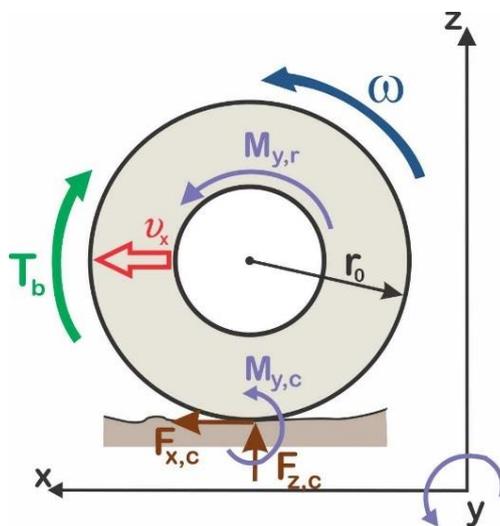
Se utiliza las ecuaciones fundamentales de la dinámica rotacional; se relaciona los pares alrededor del eje Y, se toman en cuenta la aceleración angular del neumático ($\dot{\omega}$), el momento de inercia del neumático-rueda I_p y los momentos presentes durante un freno en la rueda (figura 41), se puede representar mediante la siguiente ecuación (Rangelov, 2004):

$$I_p \cdot \dot{\omega} = \sum \tau_i \quad (36)$$

$$I_p \cdot \dot{\omega} = M_{y,r} - T_b \quad \text{si} \quad \omega \neq 0 \quad (37)$$

Figura 41

Fuerzas y momentos del neumático en el frenado



Nota: Rangelov, (2004)

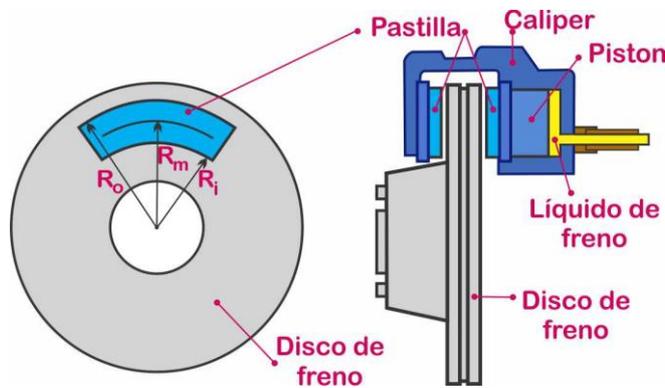
La ecuación 37 se cumple solo para una rueda que este girando ($\omega \neq 0$). Si $\omega = 0$ y $V_x = 0$ nos indica que la rueda está bloqueada ($\lambda = -1$) y esto es lo que se trata de evitar.

2.2.4.10. Líneas del sistema de freno

En las líneas del sistema de frenos se cumple el principio de Pascal. Es importante representar la dinámica que se presenta dentro de las líneas del sistema de frenado, desde el momento que el conductor aplica una fuerza al pedal de freno hasta que las ruedas reciben el par de frenado. La figura 42, muestra un diagrama esquemático de un freno de disco.

Figura 42

Disco de freno y parámetros utilizados.



Nota: Gonzalez San Miguel, (2019)

El par de frenado en la rueda, se obtiene de las siguientes ecuaciones (Gonzalez San Miguel, 2019) y cuyos parámetros se ve en la tabla 4:

$$P_L = \frac{F_d}{A_m} \quad (38)$$

$$T_b = 2 \cdot u_b \cdot P_L \cdot A_c \cdot r_{eff} \cdot n \quad (39)$$

Tabla 4

Parámetros de las líneas de freno

Parámetros	
Par de frenado	T_b
Coefficiente de fricción de las pastillas	μ_b
Presión en la línea	P_L



Parámetros

Radio efectivo del disco de freno	r_{eff}
Número de pistones de la abrazadera en un lado	N
Fuerza del conductor sobre el pedal del freno	F_d
Relación del pedal de freno	R
Área del cilindro maestro	A_m
Área del pistón de la abrazadera	A_c
Constante de proporcionalidad	C_p

Nota: Elaboración propia

Se reduce la ecuación 39 y se representa el par de frenado de la siguiente forma:

$$T_b = c_p \cdot P_L \quad (40)$$

De la ecuación 40 se deduce que el par de frenado que se ejerce en el disco de freno es una variación o modulación de T_b :



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. RECURSOS DE MATERIALES DE LA INVESTIGACIÓN

Los recursos de materiales utilizados son los siguientes:

- Dispositivos:
 - Computadora personal.
- Herramientas computacionales:
 - Matlab.
 - Toolbox's de matlab: Simulink y Fuzzy Logic.
 - Paquete MF-tire/MF-Swift de Siemens.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo se apoya en el tipo de investigación tecnológica y de desarrollo, ya que los conceptos aplicados en este proyecto surgen de conocimientos e investigaciones realizadas anteriormente (Muñoz Razo, 2011).

3.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

El alcance de la investigación es descriptiva y explicativa, porque nos centramos en describir y explicar las causas o razones que provocan un fenómeno (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Los estudios de una simulación en escenarios virtuales nos permiten conocer el comportamiento del objeto en estudio; de acuerdo a esto, el diseño de la investigación es



experimental de clasificación cuasi-experimental por ser una simulación (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.5. ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de la investigación es optimizar el frenado del auto, para ello es importante la variable distancia de parada que es un número. El enfoque de investigación es cuantitativo, porque nos permite controlar fenómenos a través de datos numéricos (Hernández Sampieri et al., 2014).

3.6. ÁMBITO DE ESTUDIO

El lugar de estudio se encuentra ubicado en:

- Departamento: Puno.
- Provincia: San Román.
- Distrito: Juliaca.

3.7. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.7.1. Población

En este caso de investigación sobre la “Optimización del frenado en autos VW38 utilizando un sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa para mejorar la seguridad vial en la ciudad de Juliaca”, la población es definida como los datos de movimiento del auto, que se obtuvieron en la simulación del modelo desarrollado; se hicieron 10 pasos de simulación, teniendo siempre los mismos resultados. Estas variables son importantes porque influyen en el frenado del auto. Estas variables de interés son el par de frenado (T_b), la velocidad angular (ω), la velocidad del vehículo (\dot{x}_2) y el deslizamiento (λ). Los datos de las variables son



recolectados a través del bloque **to workspace** que nos permite registrar los datos de la simulación de la variable manipulada.

Los datos registrados muestran como varía el frenado durante la simulación. Para conseguir un frenado óptimo se necesita mejorar la distancia de parada y en consecuencia el tiempo de parada.

3.7.2. Muestra

La muestra es el subgrupo de variables que son parte de la población (Hernández Sampieri et al., 2014); estas variables incluidas en la muestra son el par de frenado (T_b), la velocidad angular (ω), la velocidad del vehículo (\dot{x}_2) y el deslizamiento (λ), ya que influyen en el frenado del auto.

Los datos obtenidos fueron procesados y analizados para optimizar el frenado en autos VW38. Al igual que en la población, se hicieron 10 pasos de simulación, obteniendo los mismos resultados.

3.8. VARIABLES

3.8.1 Variables dependientes

- Distancia de frenado.

3.8.2. Variable independiente

- Antibloqueo de rueda.
- Lógica Difusa.

3.9. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La investigación se dividió de acuerdo a los objetivos específicos:



- En la identificación de parámetros durante el frenado, se analizó un modelo de cuarto de vehículo; los elementos que conforman el cuarto de vehículo son el sistema de suspensión y el neumático (Rangelov, 2004). Para el sistema antibloqueo de rueda se desarrolló un el modulador de presión y una unida de control (ECU); para la unidad de control se diseña un controlador fuzzy (Gonzalez San Miguel, 2019). Estos componentes unificados permiten optimizar el frenado de autos VW38, además de que nos permitió recolectar datos que influyen directamente en el frenado.
- En la realización de la simulación del sistema antibloqueo de rueda con control difuso; se utilizan los parámetros planteados en Pacejka, (2012) y Rangelov, (2004), esto permite utilizar datos confiables de anteriores investigaciones, durante las simulaciones se consiguió hacer ajustes para un mejor desempeño del controlador, se realizó la simulación a dos velocidades iniciales diferentes. Para observar el mejoramiento del frenado, se comparó los valores de la distancia de parada, obtenidos en las simulaciones realizadas con ABS y sin ABS (Gonzalez San Miguel, 2019).

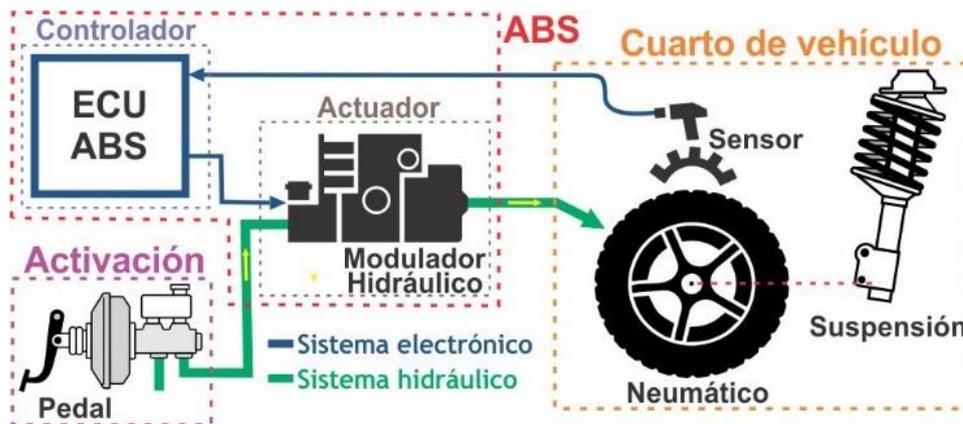
3.10. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

Un motor genera energía cinética y en consecuencia se produce el movimiento del vehículo (por tracción en las ruedas). En la investigación se considerará el par de motor igual a cero y que el vehículo ya fue acelerado y posee una velocidad constante; además, como se desea analizar el frenado de un automóvil, se considerarán sólo las fuerzas y pares presentes durante el frenado. En la figura 43 se muestra un diagrama de bloques del proyecto de investigación; donde se aprecia que el trabajo de investigación está organizado en tres partes y se presenta de la siguiente manera:

- Cuarto de vehículo.
- El ABS y
- La activación.

Figura 43

Diagrama del proyecto de investigación



Nota: Elaboración propia

3.10.1. Cuarto de vehículo

Se empezó por desarrollar la primera parte, el bloque del cuarto de vehículo; este bloque consta de la suspensión del vehículo (vertical y horizontal) y el modelo del neumático. Primeramente, se analizó la suspensión del vehículo, se sabe que el modelo VW38 posee una suspensión de barras de torsión y amortiguadores; para conseguir una considerable mejora en la adherencia del neumático, se usa una suspensión tipo MacPherson, ya que es la más utilizada en la actualidad y las más económica (Hurel et al., 2017); esta suspensión será independiente en cada rueda del vehículo. Se utiliza el modelo de cuarto de vehículo porque es ampliamente utilizado en el análisis de sistemas ABS (Gonzalez San Miguel, 2019); para facilitar los cálculos se despreciará la masa del resorte y la inercia del amortiguador.

Se empezó por desarrollar la construcción del modelo de cuarto de vehículo de acuerdo a las ecuaciones 26 y 27 planteadas por Rangellov, (2004), que representan la suspensión vertical del cuarto de vehículo. Despejando y dando forma se obtuvo lo siguiente:

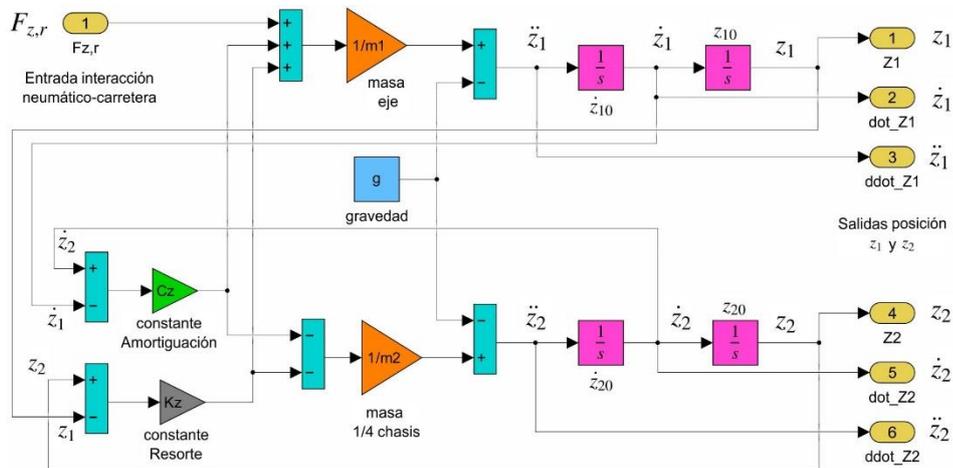
$$\ddot{z}_1 = \frac{1}{m_1} \cdot [k_z \cdot (z_2 - z_1) + c_z \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + F_{z,r}] - g \quad (41)$$

$$\ddot{z}_2 = \frac{1}{m_2} \cdot [-k_z \cdot (z_2 - z_1) - c_z \cdot (\dot{z}_2 - \dot{z}_1)] - g \quad (42)$$

El componente vertical $F_{z,r}$ se obtiene de la interfaz entre neumático y carretera, representa a la fuerza vertical del neumático sobre la rueda. Las ecuaciones 41 y 42 fueron implementadas en Simulink (figura 44) y representa el modelo de la suspensión vertical del cuarto de vehículo.

Figura 44

Esquema en Simulink que representa la suspensión vertical



Nota: Elaboración propia

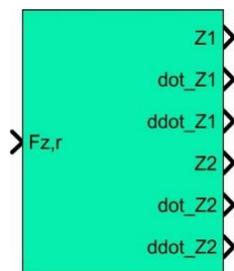
Antes de aplicar el freno, la suspensión vertical está en reposo y las condiciones iniciales de \dot{z}_{10} y \dot{z}_{20} son iguales a 0; las condiciones iniciales de la posición del eje rígido (z_{10}) y el desplazamiento de la carrocería del cuarto de

vehículo (z_{20}) resultan de las ecuaciones 28 y 29, las que son definidas en los bloques **integrator** (\dot{z}_{10} y \dot{z}_{20}).

Luego de realizar la representación de la suspensión vertical, se crea un subsistema (figura 45) que nos permite simplificar el esquema del modelo para ser utilizado como un bloque con una entrada y seis salidas.

Figura 45

Bloque del modelo de suspensión vertical



Nota: Elaboración propia

Se continuó con la construcción del modelo de cuarto de vehículo de acuerdo a las ecuaciones 30 y 31 planteadas por Rangelov, (2004), que representan la deflexión horizontal del cuarto de vehículo. Despejando y dando forma se obtuvo lo siguiente:

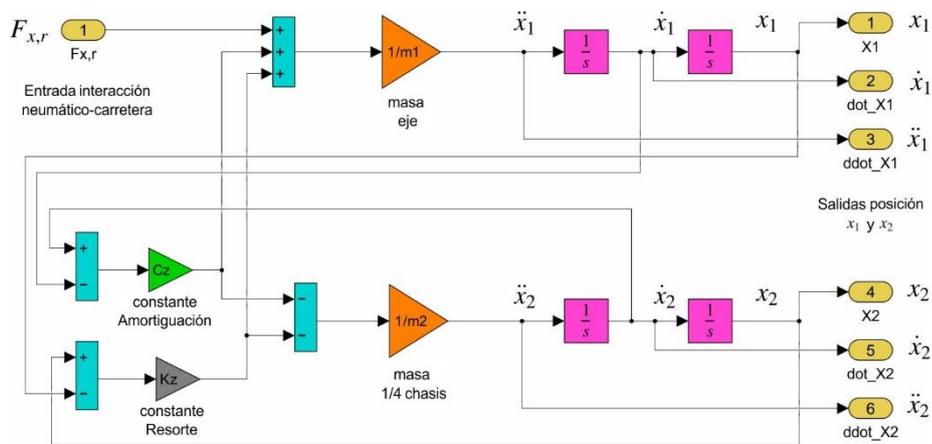
$$\ddot{x}_1 = \frac{1}{m_1} \cdot [k_x \cdot (x_2 - x_1) + c_x \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + F_{x,r}] \quad (43)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{1}{m_2} \cdot [-k_x \cdot (x_2 - x_1) - c_x \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1)] \quad (44)$$

La fuerza horizontal $F_{x,r}$ representa la reacción del neumático y se obtiene de la interfaz entre neumático y carretera. Las ecuaciones 43 y 44, fueron implementadas en Simulink (figura 46) y representa el modelo de desplazamiento horizontal del cuarto de vehículo.

Figura 46

Esquema en Simulink para la deflexión de la suspensión horizontal



Nota: Elaboración propia

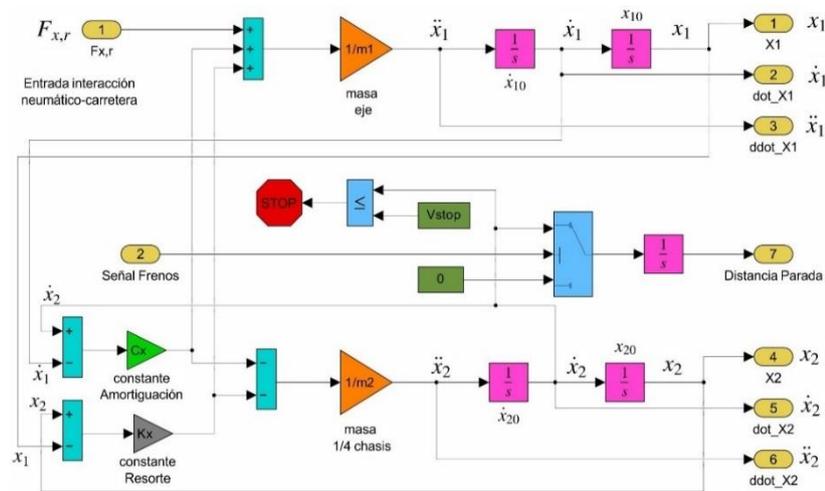
Al esquema de la figura 46 se adiciona unos bloques necesarios para la simulación, se usan los bloques **stop** y **relational operator**, esta combinación nos permite detener la simulación; el bloque **relational operator** compara dos señales de entrada y obtiene como salida un valor booleano (1 ó 0); las señales de entrada son la velocidad del vehículo y un valor de velocidad preestablecido (V_{stop}) que es la velocidad mínima permitida; si la velocidad del vehículo es menor o igual al valor preestablecido se detendrá la simulación. Simultáneamente, se implementa otra combinación de bloques para obtener la distancia de parada del vehículo, se usa los bloques **switch** e **integrator**; el bloque **switch** representa una condición if-else, la entrada de control realiza la pregunta lógica para activar el paso de una de las señales (≥ 0.1), la señal que activa la condición del bloque **switch** es la que proviene de la orden de aplicar los frenos (la activación se establece con un uno lógico (“1”)); a la salida del bloque **switch** se adiciona el bloque **integrator** lo que nos permite obtener la distancia de frenado del vehículo.

Como el vehículo está en movimiento y se desea detenerlo, se asume que posee una velocidad inicial constante V_{in} y se establece las condiciones iniciales

en los correspondientes bloques **integrator** (\dot{x}_{10} y \dot{x}_{20}). La posición inicial del valor del desplazamiento de la carrocería del vehículo (x_2) es igual a 0 ($x_{20} = 0$), el valor de la posición inicial del punto de contacto del neumático (x_1) es igual a 0 ($x_{10} = 0$) y la condición inicial del integrador restante es igual a 0 (ver figura 47).

Figura 47

Representación de la deflexión de suspensión horizontal modificada

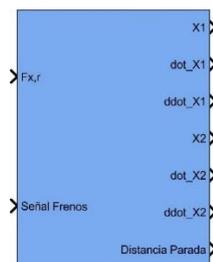


Nota: Elaboración propia

Luego de realizar la representación de la suspensión horizontal, se crea otro subsistema (figura 48) que nos muestra un bloque simplificado con dos entradas y siete salidas.

Figura 48

Bloque del modelo del desplazamiento horizontal

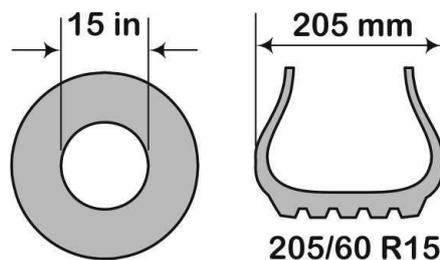


Nota: Elaboración propia

Se continuó con el desarrollo de la interacción entre el vehículo y la carretera: el neumático. Se sabe que el rendimiento de un vehículo está influenciado por las características de los neumáticos; estos afectan directamente el frenado de un vehículo (Rangelov, 2004). En la interacción de neumático y carretera se generan las fuerzas longitudinales, verticales y laterales (Astocondor Villar, 2018). Se escogió un neumático de estructura radial debido a su mejor adherencia, mayor estabilidad y que actualmente son los más utilizados; el modelo de neumático que se utilizó es el neumático estándar para un vehículo ligero de pasajeros (Jazar, 2017) del tipo 205/60R15 (ver figura 49).

Figura 49

Neumático radial 205/60R15



Nota: Elaboración propia

Para calcular el radio geométrico se utilizó la ecuación 18, planteado por Jazar,(2017):

$$r_0 = \frac{205 \cdot \frac{60}{100} \cdot 2 + 15 \cdot 25.4}{2} = 0.3135\text{m} \quad (45)$$

Para calcular el radio con carga se utilizó la ecuación 23:

$$r_c \approx 0.92 \cdot 0.3135 = 0.2884 \text{ m} \quad (46)$$

Para calcular el radio efectivo se utilizó la ecuación 24:

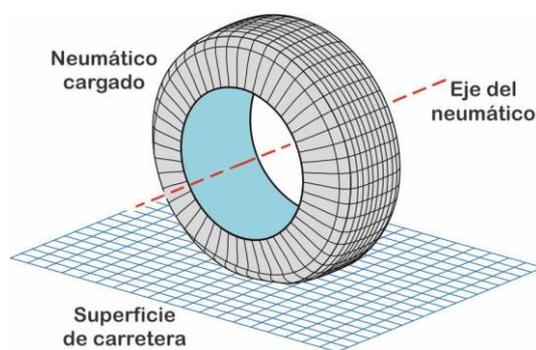
$$r_{\text{eff}} \approx 0.98 \cdot 0.3135 = 0.3072\text{m} \quad (47)$$

En la investigación se utilizó para la interfaz entre el neumático y carretera la librería para Simulink del modelo de neumático MF-Tyre/MF-Swift elaborado por Simcenter Tire de Siemens (figura 40). Se configuró los parámetros del bloque de la siguiente manera:

- La identificación del neumático (**Tire ID**) se estableció en 1.
- El archivo de propiedades del neumático, lo proporciona Siemens y posee el siguiente nombre: “**Siemens_car205_60R15.tir**”, este archivo determina el comportamiento dinámico del vehículo.
- Para el método de carretera se estableció en superficie de carretera plana predeterminada (**Default Flat Road**), donde la altura de la carretera es constante ($Z = 0m$) y los coeficientes de fricción de la superficie también son constantes ($\mu_{fr} = 1$) (figura 50).

Figura 50

Superficie de carretera plana



Nota: Jazar, 2017

- El lado del neumático se estableció en izquierdo (**left**), esto debido a que en el archivo de propiedades del neumático nos indica que los datos se obtuvieron en ese lado.
- El método de contacto se estableció en contacto suave de carretera (**smooth road**), debido a que en esta configuración sólo considera al eje z que puede

tener valores a una altura específica (road(3)) y los valores de fricción (road(19,20)). La combinación del método de contacto y el método de carretera define la respuesta del modelo del neumático.

- El método dinámico se estableció en el modo transitorio lineal (**relaxation behaviour**), porque esta configuración permite el uso de longitudes de relajación del modelo de neumático que fueron determinados empíricamente.
- El método deslizamiento de fuerzas se estableció en solo componentes longitudinales (longitudinal), porque se necesita analizar tres componentes que son necesarios en la simulación.
- El modelo de T&V (temperatura) se estableció en desactivado (**Disabled**), porque este parámetro no es necesario en la simulación.
- Se utilizó el parámetro ISWITCH para configurar el modo de funcionamiento del modelo (ISWITCH=11121).

Luego de definir los parámetros en el bloque MF-Swift, se procedió a analizar los momentos (torques) que actúan en la rueda; para ello, se utilizó la ecuación 2.40 planteado por Rangelov, (2004), despejando y dando forma se obtuvo lo siguiente:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_p} \cdot (M_{y,r} - T_b) \quad \text{si} \quad \omega \neq 0 \quad (48)$$

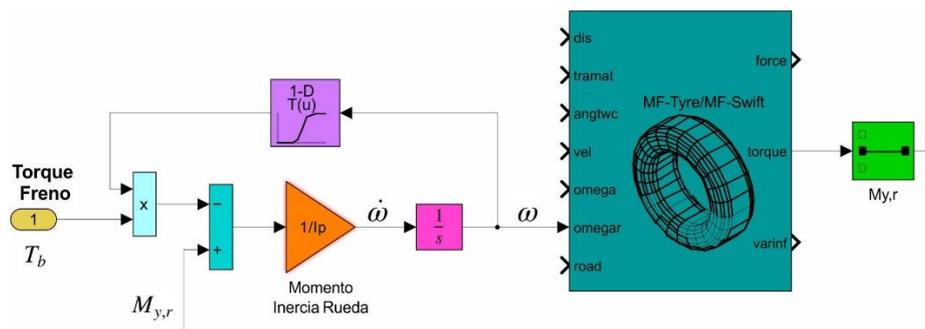
Para asegurar que T_b este en el sentido contrario a la velocidad angular, se adicionó $\text{sign}(\omega)$ a la ecuación 48, lo que garantiza que el frenado sea en una sola dirección.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{I_p} \cdot (M_{y,r} - T_b) \quad \text{si} \quad \omega \neq 0 \quad (49)$$

La ecuación 49 es implementó en Simulink junto con el bloque MF-Swift. El bloque **1-d look up table** se configuró de la siguiente forma, los valores del vector de entrada (Breakpoints 1) lecturan $[-10 : 0.1 : 10]$ y los valores del vector de salida (Table data) lecturan $\tanh(0.5 * (\text{Breakpoints}))$ (Rangelov, 2004).

Figura 51

Implementación en simulink de la librería MF-Swift

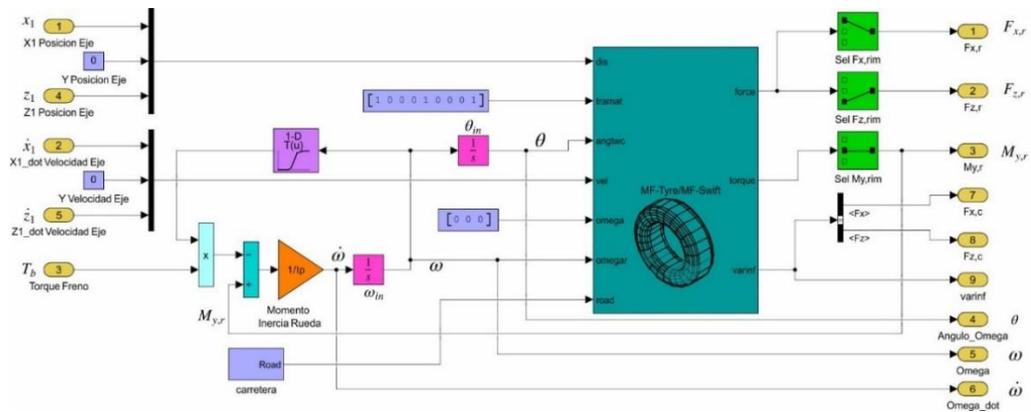


Nota: Elaboración propia

Al esquema de la figura 51 se adicionó algunos bloques necesarios para un correcto funcionamiento de la librería MF-Swift. Los componentes utilizados son los bloques **selector**, **mux**, **bus selector** y **constant**. Luego de crear la librería (figura 52), se asume que ya está en movimiento (V_{in}), las condiciones iniciales son establecidas en los bloques **integrator** (ω_{in} y θ_{in}). La posición inicial del ángulo de rotación es igual a 0 ($\theta_{in} = 0$) y la velocidad angular inicial (ω_{in}) se obtuvo a partir de la ecuación 34.

Figura 52

Representación en Simulink del modelo neumático y rueda



Nota: Elaboración propia

Luego de representar el modelo del neumático y rueda, se creó un subsistema (figura 53) donde se muestra un bloque simplificado con cinco entradas y nueve salidas.

Figura53

Bloque del modelo neumático y rueda



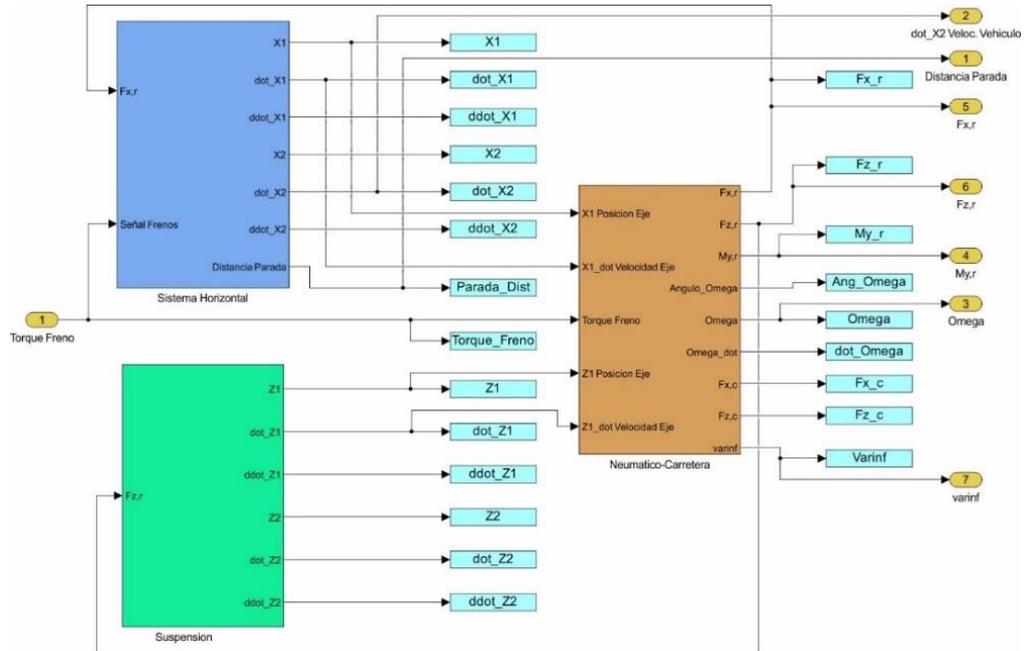
Nota: Elaboración propia

Para finalizar esta parte, se realiza una interconexión entre los tres subsistemas que se muestran en las figuras 45, 48 y 53; se procedió a la construcción del modelo completo de cuarto de vehículo y el modelo del neumático (figura 54). Se adicionó el bloque **To Workspace** que permite enviar datos registrados de una variable desde Simulink hacia el espacio de trabajo de

Matlab (**workspace**) para procesar estas señales de acuerdo a las necesidades que se presenten.

Figura 54

Interconexiones entre los subsistemas del cuarto de vehículo y neumático



Nota: Elaboración propia

Se creó un subsistema (figura 55) donde se muestra un bloque de simulink simplificado con una entrada y siete salidas; lo que representa al modelo de cuarto de vehículo.

Figura 55

Bloque del modelo completo de cuarto de vehículo



Nota: Elaboración propia

3.10.2. Desarrollo del bloque ABS

Se continuó con el desarrollo de la segunda parte: El bloque ABS (ver figura 43). Este bloque está conformado por un modulador de presión y la unidad de control (ECU). Primeramente, se empezó realizando el modulador de presión, el Modulador de Presión de Freno (MPF) que se modela tiene dos electroválvulas que permitirán aumentar, disminuir y mantener el nivel de presión del sistema hidráulico de acuerdo a las señales de control provenientes de la unidad ECU. Al analizar las figuras del **anexo 1** se realiza la tabla 5 con todas las posibles combinaciones, que nos indica el encendido y apagado de las electroválvulas para modificar el nivel de presión hidráulica; estas combinaciones vienen a ser los requisitos que se deben cumplir para modular el par de frenado, en una condición inicial, cuando no hay acción de frenado; se considera la electroválvula de entrada (EV_{in}) como normalmente cerrada y la electroválvula de salida (EV_{out}) como normalmente abierta; en esta configuración el sistema de frenos actúa con la bomba de freno convencional.

Tabla 5

Señales de activación de las electroválvulas

EV_{in}	EV_{out}	EV_{in}	EV_{out}	PRESIÓN
OFF	OFF	0	0	Aumenta
OFF	ON	0	1	Sin Acción
ON	OFF	1	0	Mantiene
ON	ON	1	1	Reduce

Nota: Elaboración propia

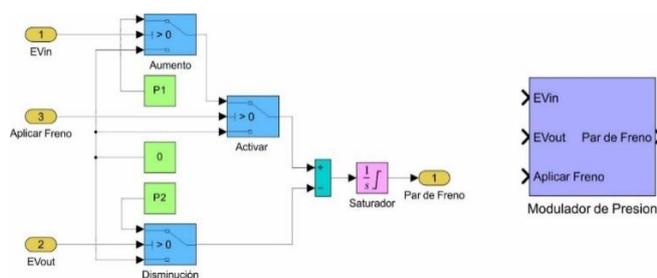
Las señales de activación son nivel lógico alto (encendido o booleano “1”) y nivel lógico bajo (apagado o booleano “0”). Por la teoría realizada, se sabe que el par de frenado máximo ($T_{b,max}$) es proporcional a la presión de frenado

(Rangelov, 2004), por lo que, modular la presión de frenado es semejante a modular el par de frenado (ecuación 40) planteado por Rangelov,(2004).

De acuerdo a la tabla 5 se implementó en Simulink una aproximación del funcionamiento de un MPF, en la figura 56 se muestra el esquema y su bloque reducido; se usó los bloques Simulink de **switch**, **constant**, **add** e **integrator limited**; la combinación de estos bloques nos permitirá simular el funcionamiento del MPF. Para activar el subsistema se aplica una señal booleana “1 lógico” al bloque **Activar**, cuando éste bloque esta activado se inicia el proceso de frenado; de acuerdo a los pulsos enviados a las entradas de EV_{in} y EV_{out} se consigue modular el par de frenado de acuerdo a las órdenes provenientes del ECU, los bloques **Aumento** y **Disminución** permiten switchear dos posibles valores, los valores asignados al bloque Aumento son P1 ($P1 = T_{b,max}$) y 0, de igual forma los valores asignados al bloque Disminución son P2 y 0, donde **P1** y **P2** representan el par de frenado de aumento y disminución respectivamente; los valores permitidos por cada bloque se suman en el bloque **add**, este valor se conecta al bloque **Saturador** que integra y limita el valor del par conseguido a dos niveles de saturación, la salida que se consigue se mantiene hasta que se cambie las entradas en EV_{in} y EV_{out} .

Figura 56

Representación en Simulink de MPF



Nota: Elaboración propia

Los valores de par de frenado de P1 y P2 son constantes ajustables; los dos niveles del saturador son: El nivel de saturación inferior es igual a cero, que es el valor mínimo en el par de frenado y el nivel de saturación superior es establecido como el par de frenado máximo (P_{nivel}) que puede realizar el sistema de frenos. La tabla 6 muestra las condiciones que debe cumplir el MPF para su correcto funcionamiento; al recibir la orden de freno del ABS, en un primer momento las entradas de EV_{in} y EV_{out} están apagadas (0 lógico), que viene a ser la condición de inicio del MPF, ya que el ABS es un sistema cíclico las condiciones de acumulación, mantenimiento y reducción del par de frenado se repite constantemente.

Tabla 6

Requisitos para el MPF

EVin	EVout	Condición	Descripción
OFF=0	OFF=0	Aumento	Aumenta par de frenado con valor P1.
ON=1	OFF=0	Mantener	Mantiene el nivel del par de frenado
ON=1	ON=1	Mantener	Disminuye par de frenado con valor P2.

Nota: Elaboración propia

Continuando, se desarrolló la unidad de control del ABS (ECU). A la unidad ECU ingresa la señal (ω) proveniente del sensor de velocidad, esta señal de entrada tiene que ser ajustada para generar valores del deslizamiento; el motivo para analizar este parámetro es porque nos permite detectar posibles bloqueos de rueda (Aly et al., 2011); con este valor se realiza operaciones dentro de la estrategia de control del ECU, para después enviar señales de control hacia el MPH (Rangelov, 2004). Para calcular el deslizamiento de rueda se utilizó la ecuación 33; antes de implementar esta ecuación en Simulink se observa en la figura 6, que los valores del deslizamiento varían desde un valor mínimo a un valor alto [-1; 0], entonces los valores de deslizamiento durante el frenado son

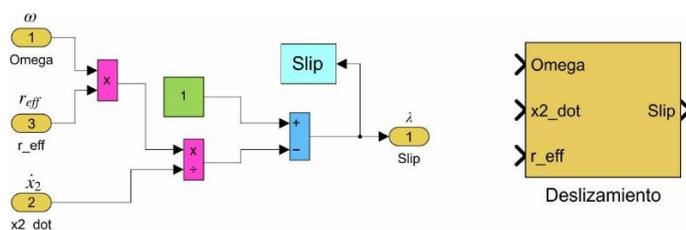
negativos; para evitar posibles errores en los cálculos durante las comparaciones con otras señales, se adecúa la ecuación 33 a la siguiente forma:

$$\lambda = 1 - \frac{\omega \cdot r_{eff}}{V_x} \quad (50)$$

Con esta modificación se consiguen valores positivos para el deslizamiento; ahora los valores mínimo y máximo del deslizamiento durante el frenado varían de 0 a 1. Se implementó la ecuación 50 y se muestra en la figura 57; se usaron los bloques **product**, **divide**, **add**, **constant** y **to workspace**; la combinación de los bloques nos permite calcular el deslizamiento de la rueda. Tiene por entradas la velocidad angular de la rueda, el radio efectivo del neumático y la velocidad del vehículo, los valores de la velocidad angular y la velocidad del vehículo tienen una relación proporcional; la salida es el valor calculado del deslizamiento. Luego, se realizó un subsistema donde se muestra un bloque simplificado con tres entradas y una salida.

Figura 57

Representación en Simulink del deslizamiento



Nota: Elaboración propia

La estrategia de control que se implementó en el ECU, fue un controlador de lógica difusa, este controlador por su versatilidad es la más adecuada para esta aplicación, además de que permite evaluar distintas variables en la entrada y salida (Mauer et al., 1994). La variable que se consideró primordial fue el deslizamiento de rueda, porque nos permite detectar un bloqueo de rueda; analizando la figura

2.36, se consideró mantener el deslizamiento a un valor establecido de 0.25 ($\lambda = 25\%$) donde está la zona estable para controlar el ABS, cuando se supera este valor la rueda empieza a bloquearse; entonces, el objetivo del controlador es mantener el deslizamiento por debajo de este valor. El error de relación del deslizamiento de rueda se consigue de una comparación entre el deslizamiento calculado con el deslizamiento deseado.

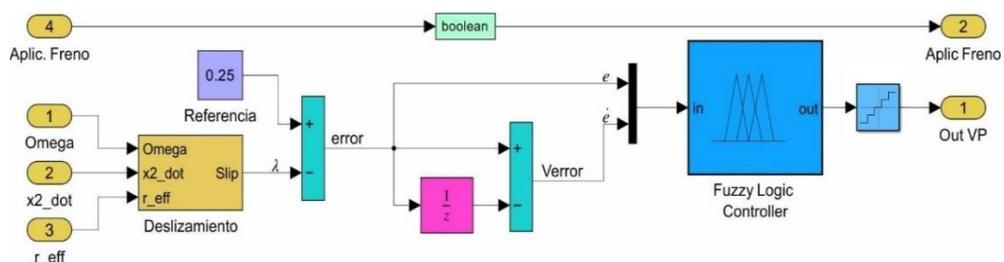
$$\text{Error} = \text{referencia} - \text{deslizamiento real}$$

$$\text{error} = 0.25 - \lambda \quad (51)$$

Se sabe que la empresa BOSCH posee la patente de la tecnología ABS y nos muestra en la figura 14 las señales que usa para controlar el ABS. En el diseño de este controlador difuso, se eligió dos variables de entrada y una variable de salida; las variables de entrada son el error de deslizamiento (**error**) y la variación del error de deslizamiento (**Verror**), estas variables fueron utilizadas bastante durante los últimos años en esta área de estudio (ver antecedentes de la investigación); la variable de salida es una variación de presión (V_{presion}) que sirve de corrección para evitar el bloqueo de rueda. En la figura 58 se muestra el deslizamiento calculado, el error de deslizamiento y el controlador Fuzzy.

Figura 58

Procesamiento de señales del controlador



Nota: Elaboración propia

Luego de representar el modelo del procesamiento de señales del controlador, se creó un subsistema (figura 59) donde se muestra un bloque simplificado con cuatro entradas y dos salidas.

Figura 59

Bloque del Procesamiento de señales

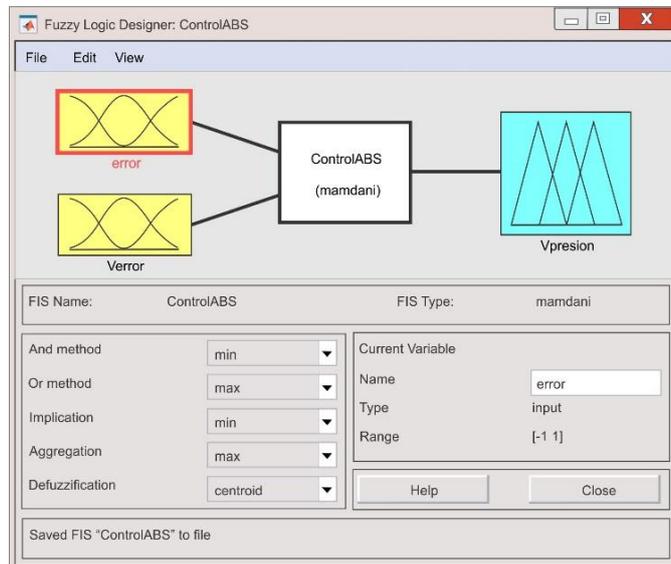


Nota: Elaboración propia

Para el diseño del controlador difuso, se construyeron funciones de membresía para la entrada y salida; las funciones de membresía utilizadas fueron del tipo Triangular y Trapezoidal, debido a su respuesta progresiva y su alta sensibilidad (Xiao et al., 2016). Las variables de control fueron limitadas dentro de un rango de trabajo, a la vez, ese rango fue dividido en subconjuntos. Para facilitar el diseño del controlador difuso, se utilizó el Toolbox de Matlab denominado Fuzzy Logic, esta herramienta ofrece funciones de línea de comandos de Matlab y un bloque Simulink que permite diseñar, analizar y simular aplicaciones de lógica difusa; se puede configurar y establecer las entradas, funciones de pertenencia, regla de inferencia y la salida del sistema difuso.

Figura 60

Diseño del controlador difuso



Nota: Elaboración propia

En la figura 60, se muestra la estructura general del controlador difuso dentro del Fuzzy Logic Designer; el controlador difuso diseñado (dos entradas y una salida) fue configurado de la siguiente forma: El tipo de sistema de inferencia difusa a usar es el modelo de **Mamdani**, en el operador T- norma (**método AND**) se elige el mínimo (**min**), en el operador T-conorma (**método OR**) se usa el máximo (**max**), para la implicación se utiliza el mínimo (**min**), asimismo para la agregación se utiliza el máximo (**max**) y por último para defuzificar se utiliza el método del **centroide**.

Se crea la primera variable de entrada (error de relación de deslizamiento “**error**”), se delimita en un rango de -1 a 1; se subdivide el rango de la variable en 5 subconjuntos, tal como se muestra en la tabla 7. Las funciones de membresía se aprecian en la figura 61.

Tabla 7

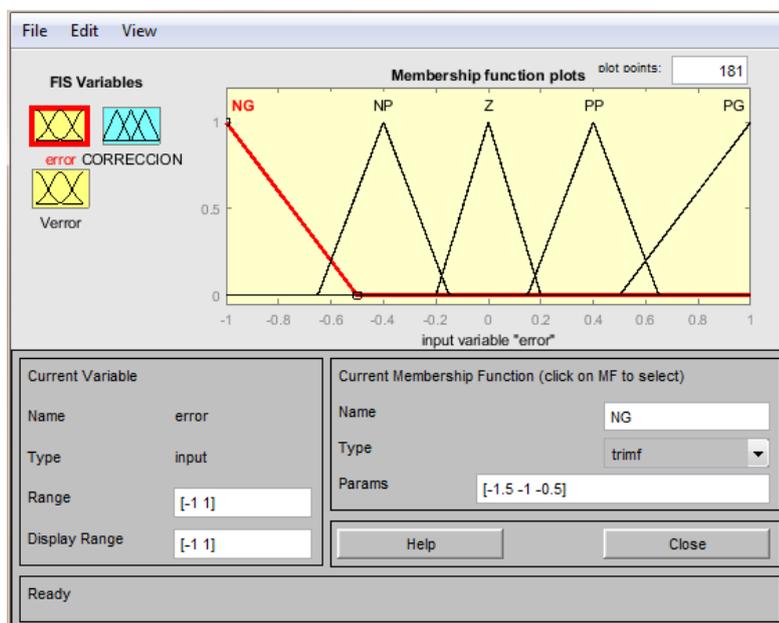
Rangos de la variable error del deslizamiento

Rango	Error	Parámetros
[-1, -0.5]	Negativo Grande (NG)	[-1.5 -1 -0.5]
[-0.65, -0.15]	Negativo Pequeño (NP)	[-0.65 -0.4 -0.15]
[-0.2, 0.2]	Cero (Z)	[-0.2 0 0.2]
[0.15, 0.65]	Positivo Pequeño (PP)	[0.15 0.4 0.65]
[0.5, 1]	Positivo Grande (PG)	[0.5 1 1.5]

Nota: Elaboración propia

Figura 61

Funciones de pertenencia del error de deslizamiento



Nota: Elaboración propia

Se continúa con crear la segunda variable de entrada (variación del error de deslizamiento “**Verror**”), se delimita en un rango de -1 a 1; también, se subdivide el rango de la variable en 3 subconjuntos, tal como se muestra en la tabla 8; mientras que las funciones de membresía se pueden apreciar en la figura 62.

Tabla 8

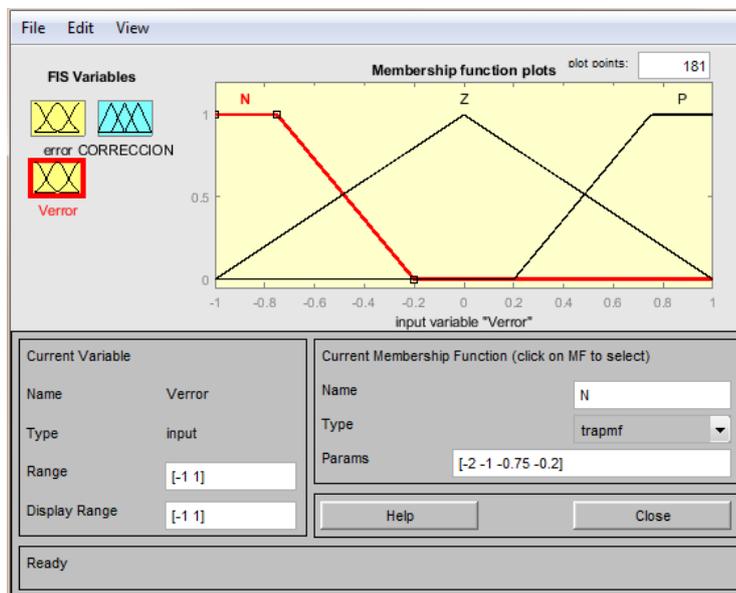
Rangos de la variable de variación de error del deslizamiento

Rango	Verror	Parámetros
[-1, -0.2]	Negativo (N)	[-2 -1 -0.75 -0.2]
[-0.5, 0.5]	Zero (Z)	[-0.5 0 0.5]
[0.2, 1]	Positivo (P)	[0.2 0.75 1 2]

Nota: Elaboración propia

Figura 62

Funciones de pertenencia de la variación del error



Nota: Elaboración propia

Finalmente, la variable de salida (variación de presión “**Vpresion**”), se delimita en un rango de -2 a 2; esta variable se divide en subconjuntos, tal como se muestra en la tabla 9; las funciones de membresía se observan en la figura 63.

Tabla 9

Rangos de la variable Vpresion

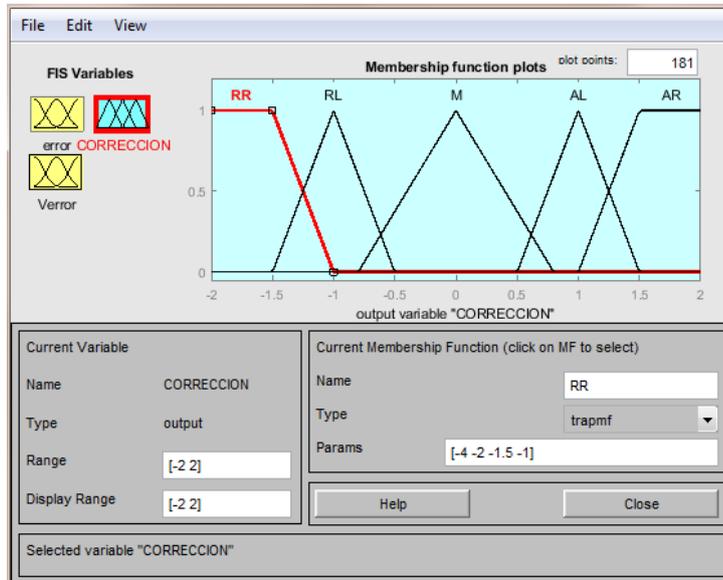
Rango	Vpresion	Parámetros
[-2, -1]	Reducción Rápida (RR)	[-4 -2 -1.5 -1]
[-1.5, -0.5]	Reducción Lenta (RL)	[-1.5 -1 -0.5]
[-0.8, 0.8]	Mantener (M)	[-0.8 0 0.8]
[0.5, 1.5]	Aumento Lento (AL)	[0.5 1 1.5]

Rango	Vpresion	Parámetros
[1, 2]	Aumento Rápido (AR)	[1 1.5 2 4]

Nota: Elaboración propia

Figura 63

Funciones de pertenencia de la variable Vpresion



Nota: Elaboración propia

Una vez definidas las variables de entrada, salida y sus respectivos rangos, se planteó el sistema de reglas lógicas que nos permite conseguir los valores óptimos de la variable de salida (Vpresion). En un momento determinado, para cada valor de las dos variables de entrada, el controlador difuso asigna un valor a la variable de salida lo que permite una variación de presión en el circuito; el sistema de reglas se muestra en la tabla 10.

Tabla 10

Reglas de control para la variable de salida

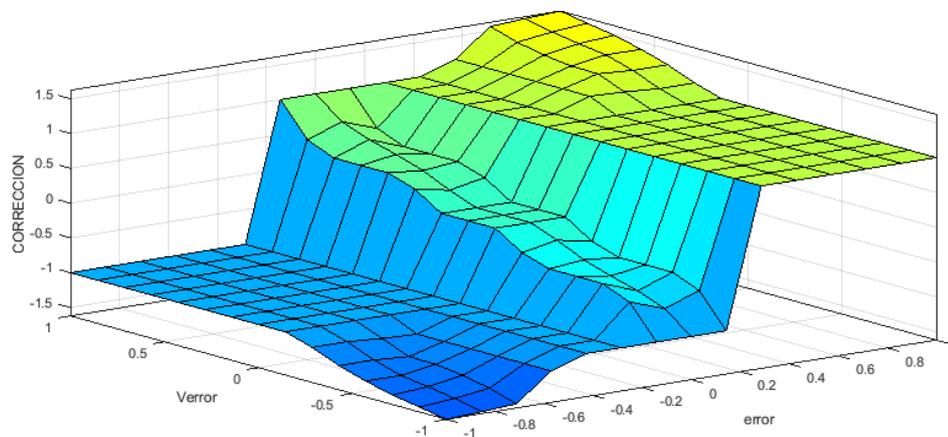
	NG	NP	Z	PP	PG
N	RR	RL	RL	AL	AL
Z	RL	RL	M	AL	AL
P	RL	RL	AL	AL	AR

Nota: Elaboración propia

Para observar el comportamiento del controlador difuso diseñado, se usó el visor de reglas que permite ver una muestra del mapeo de ruta de todo el proceso de inferencia difusa; es en el visor de reglas donde se puede realizar variaciones en las variables de entrada (error, Verror) para poder verificar la respuesta en la variable de salida (Vpresion). Pero, es en el visor de superficie del controlador Fuzzy que se observa una curva tridimensional no lineal que muestra el mapeo entero en un solo gráfico de las tres variables (dos entradas y una salida). Además, en el visor de superficie se puede apreciar de forma compacta toda la información que posee el controlador difuso. El visor de superficie del controlador difuso se muestra en la figura 64.

Figura 64

Visor de superficie del controlador difuso



Nota: Elaboración propia

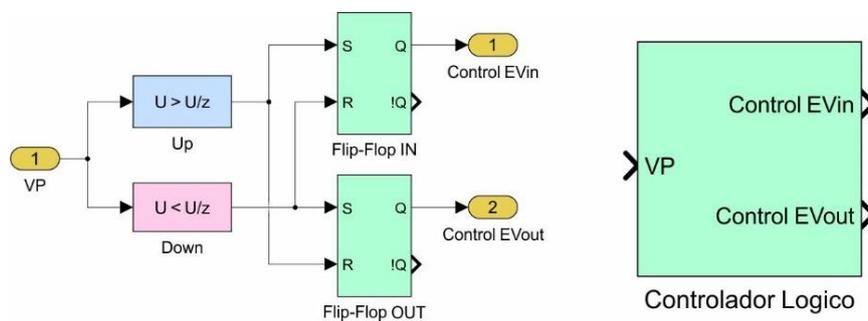
En la salida del controlador difuso, se tiene una sola variable; con este valor se necesita apagar o encender las electroválvulas para variar el par de frenado a un valor óptimo evitando un bloqueo de rueda. La configuración del ABS 5.3 consta de dos electrobombas para aumentar, mantener o reducir el nivel de presión del circuito hidráulico, tal como fue diseñado el MPF. Las electrobombas se apagan y encienden para cumplir este objetivo. Para este

propósito se adaptó un controlador lógico, que permite un correcto funcionamiento del bloque MPF.

En la figura 65 se utilizó flip-flop's del tipo SR y además muestra su bloque reducido; se escogió este flip-flop porque en simulink no necesita señal de reloj, lo que facilita la simulación.

Figura 65

Lógica de control de las electroválvulas



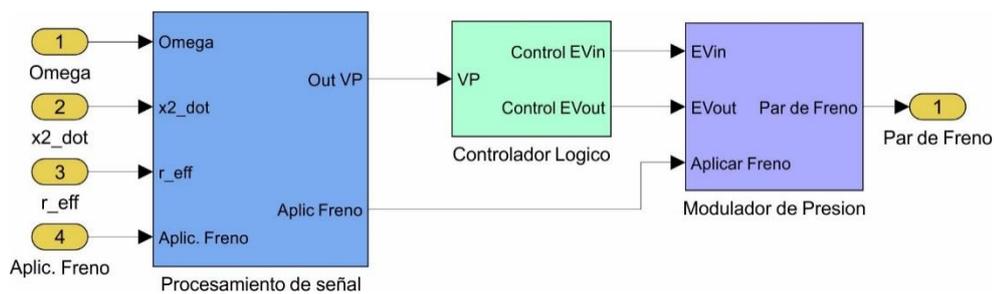
Nota: Elaboración propia

El Flip-Flop IN controla la Electroválvula de entrada (EVin), cuando se establece (S="1") la EVin se abre y cuando se restablece (R="1") la EVin se cierra. El Flip-Flop OUT controla la Electroválvula de salida (EVout), cuando se establece (S="1") la EVout se cierra y cuando se restablece (R="1") se la EVout se abre. Las condiciones iniciales de los flip-flop's se estableció en 0, debido a que en esa condición la presión del sistema está en aumento, pues para que el ABS entre en funcionamiento se debió antes frenar y como consecuencia la presión aumente.

Finalizando la parte del ABS, se procedió a realizar la interconexión de los subsistemas de las figuras 56, 59 y 65; se procedió a la construcción del modelo del bloque ABS. En la figura 66, se representa el bloque ABS diseñado y por comodidad se muestra su bloque simplificado.

Figura 66

Los bloques principales del modelo del ABS



Nota: Elaboración propia

3.10.3. Etapa de activación

Se continuó con el desarrollo de la tercera parte: El bloque de activación; por lo realizado en el marco teórico (sistema de frenos antibloqueo), se sabe que el sistema ABS se activa cuando el vehículo se encuentra a una velocidad considerablemente alta y se presenta un frenado de emergencia. Cuando el sistema ABS está activado y se desea detener el vehículo, el sistema de frenos actúa para detener el vehículo de forma óptima. Al momento de pisar el pedal de freno y teniendo las condiciones para que actúe el sistema ABS, se activa un interruptor para preparar al sistema ABS. Por facilidad se utilizó el bloque **step** de Simulink para representar la activación del sistema ABS y la orden de frenado del vehículo.

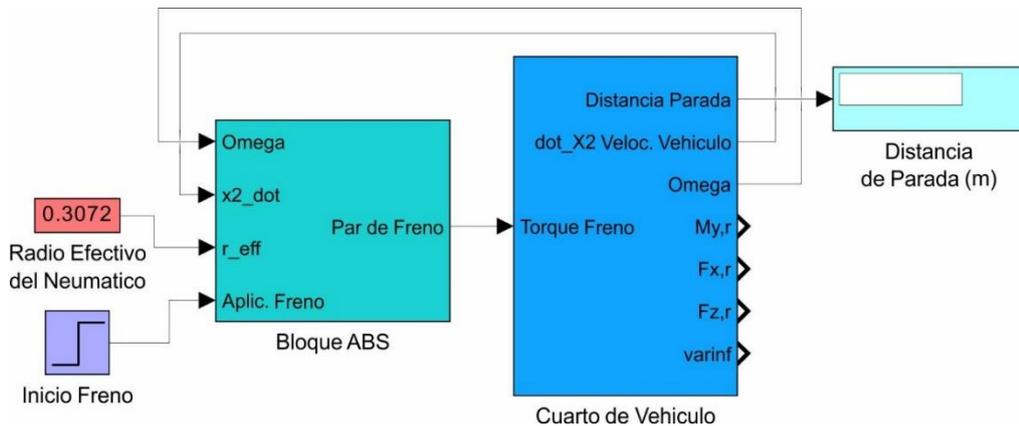
3.10.4. Modelo del sistema ABS completo

Se representó el modelo del proyecto a simular conectando el modelo completo de cuarto de vehículo (figura 55), el modelo del bloque ABS diseñado (figura 66) y el bloque **step** que representa la activación del bloque ABS (orden de inicio del frenado)). También se utilizaron los bloques **constant** y **display**. Para ingresar datos al modelo, se usa el radio efectivo del neumático (r_{eff}); como salida se muestra la distancia de parada del vehículo. La figura 67 muestra el modelo del

sistema ABS diseñado, representado e interconectado por sus bloques más importantes.

Figura 67

Modelo del vehículo diseñado



Nota: Elaboración propia

Los parámetros que se utilizaron para el cuarto de vehículo se muestran en la tabla 11 y se obtuvieron de Pacejka, (2012) y Rangelov, (2004).

Tabla 11

Datos utilizados para el modelo del neumático y el cuarto de vehículo

Parámetros		Valor	Dimension
Cuarta parte de la masa del vehículo	m_2	300	Kg
Masa del eje y componentes	m_1	35	Kg
Rigidez del resorte de suspensión eje Z	k_z	20,000	N/m
Amortiguación de suspensión eje Z	c_z	2,000	N/m
Rigidez del modelo del neumático	$k_{z,tire}$	200,000	N/m
Constante gravitacional	G	9.7722	m/s^2
Longitud del resorte sin carga	l_{z0}	0	m
Masa del cinturón	m_{belt}	7.247	Kg
Radio del neumático sin carga	r_0	0.3135	m
Radio efectivo del neumático	r_{eff}	0.3072	m
Rigidez de la suspensión eje X	k_x	100,000	N/m



Parámetros		Valor	Dimension
Amortiguación de la suspensión eje X	c_x	2,000	N/m
Momento polar de inercia	I_p	1.04	Kg m ²
Posición inicial del eje rígido	z_{10}	0.2968	m
Desplazamiento inicial de la carrocería	z_{20}	0.1502	m
Velocidad antes del frenado	V_{in}	variable	m/s
Velocidad considerado detenido	V_{stop}	1	m/s
Tasa de aumento del par de frenado	P1	19,000	Nm/s
Tasa de disminución del par de frenado	P2	19,000	Nm/s
Tasa del par de freno modulado	P_{nivel}	2,533	Nm/s

Nota: Valores de referencia



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

El objetivo general de la investigación, es optimizar el frenado en autos VW38 utilizando un sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa, para mejorar la seguridad vial en la ciudad de Juliaca. Uno de los parámetros importantes es la distancia de frenado que es consecuencia de usar el freno del vehículo de forma adecuada. La utilización del sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa resultó ser una tecnología adecuada para optimizar el frenado del auto VW38, se consigue una mejora significativa en referencia al frenado convencional. Se logró identificar los parámetros presentes durante un frenado lo que permitió desarrollar un sistema antibloqueo de rueda y la simulación realizada permitió observar las mejoras en el frenado del vehículo.

Se consiguió identificar los parámetros presentes durante un frenado para desarrollar un sistema antibloqueo de rueda, cumpliendo el primer objetivo específico; se realizó el desarrollo del modelo del cuarto de vehículo, a partir de ecuaciones planteadas con leyes físicas se implementó el sistema de suspensión, se adecuó la librería que sirve de interface entre el neumático y la carretera de acuerdo a ecuaciones planteadas; donde se consiguió las variables que influyen en el frenado del vehículo. Para el desarrollo del antibloqueo de rueda se necesitó una comprensión completa de la tecnología, se planteó un modulador de presión y se diseñó un controlador fuzzy. Este diseño unificado se consiguió gracias a la identificación de los parámetros que actúan durante el frenado del vehículo.



Se consiguió el segundo objetivo de realizar la simulación del sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa, durante el proceso se realizó variaciones en la velocidad de inicio, también se consiguió hacer ajustes en las reglas del controlador fuzzy y mantener la referencia del deslizamiento en un valor óptimo. Se observó el mejoramiento del frenado cuando se hizo la comparación de los valores de la distancia de parada, que se realizó durante las simulaciones con el uso de un frenado convencional y un frenado con ABS.

4.1.1 Pruebas

Para evaluar el rendimiento del modelo que se implementó en Matlab, se han realizado simulaciones ajustando parámetros para realizar un análisis más adecuado (ver tabla 11). La simulación realizada fue durante un frenado en línea recta, donde el vehículo se está desplazando a una determinada velocidad inicial. Las simulaciones de frenado que se realizó fueron a velocidades iniciales (V_{in}) de 80 y 100 km/h en una superficie de alta fricción. También se han realizado simulaciones sin usar ningún controlador para ver el efecto del sistema ABS. Las variables observadas en las simulaciones fueron la distancia de frenado y como consecuencia el tiempo de parada. Del mismo modo, se realizó una comparación entre la velocidad del vehículo y la velocidad angular de la rueda en cada una de las simulaciones.

4.1.1.1. Resultados sin ABS

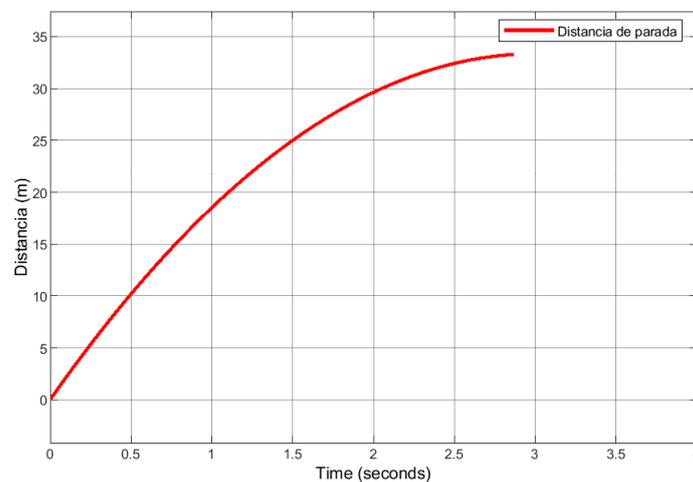
Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la simulación del vehículo cuando funciona el sistema de frenos convencional. El par de frenado que se aplicó al sistema fue de 2533 N•m/s.

4.1.1.1.1. Velocidad a 80 km/h

Durante el frenado de emergencia a una velocidad inicial predefinida (22.22 m/s) en la figura 68 se observa cómo evoluciona la distancia recorrida por el vehículo; el gráfico muestra como el vehículo frena de forma gradual hasta detenerse por completo. El vehículo se detiene en un tiempo de 2.86 segundos y tiene como espacio de recorrido de 33.28 metros.

Figura 68

Distancia de frenado sin ABS a 80km/h

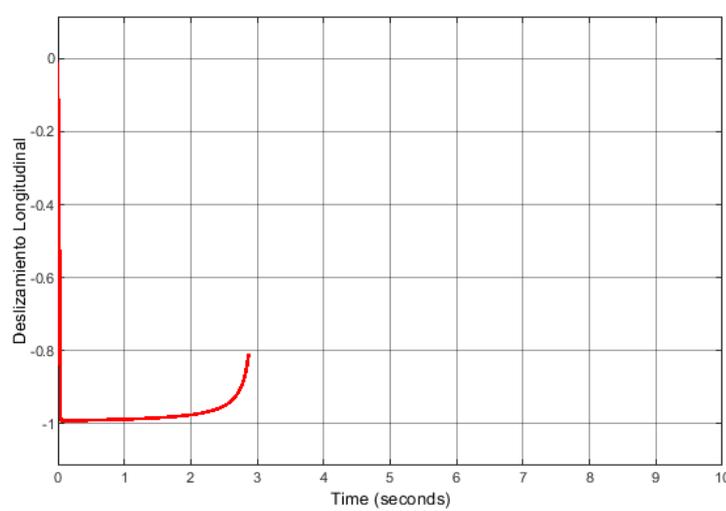


Nota: Elaboración propia

En la figura 69 se muestra el comportamiento del deslizamiento longitudinal, se puede observar que cuando se realizó el frenado de emergencia la rueda se bloquea automáticamente ocasionando que la rueda resbale produciendo una mayor distancia de frenado; esto ocurre debido a que se aplicó mucha presión, reflejándose en un par de frenado excesivo. El deslizamiento longitudinal alcanza su máximo valor instantáneamente y al momento en que se detiene el vehículo registra un valor de -0.8083.

Figura 69

Deslizamiento longitudinal sin ABS a 80 km/h

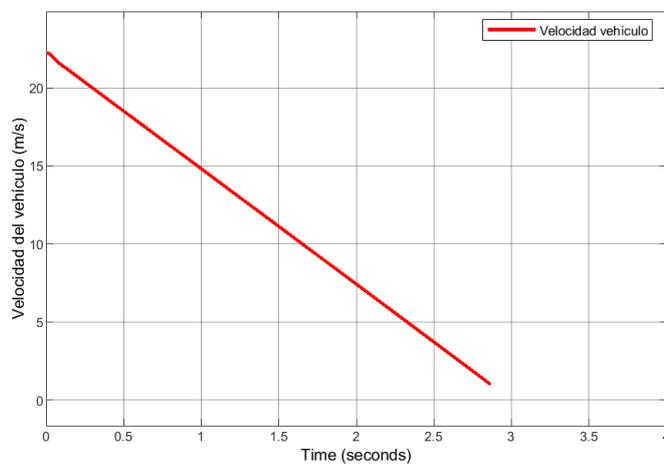


Nota: Elaboración propia

La figura 70 muestra la variación de la velocidad del vehículo al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se aprecia como la velocidad va disminuyendo progresivamente desde una velocidad inicial de 80 km/h (22.22 m/s) hasta llegar a una velocidad final de 1 m/s, que es cuando el vehículo se detiene completamente.

Figura 70

Velocidad del vehículo a 80 km/h sin ABS

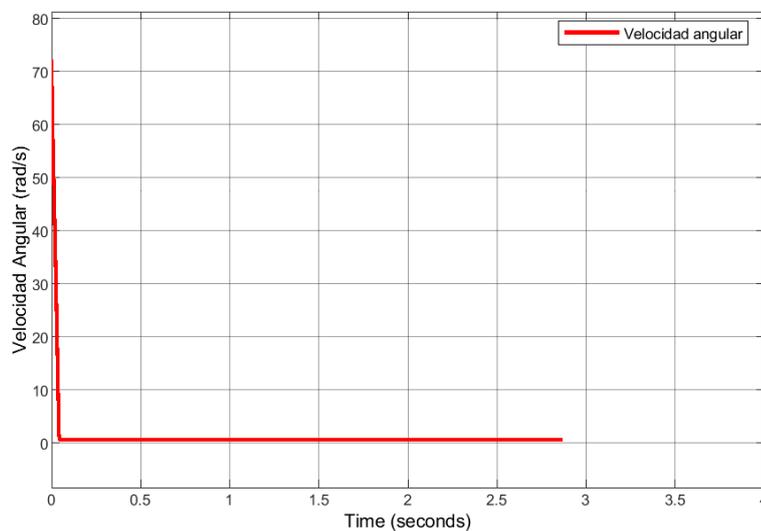


Nota: Elaboración propia

La figura 71 muestra los cambios de la velocidad angular de la rueda al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad angular presenta un cambio abrupto en 0.045 segundos, este cambio nos indica que inicia el bloqueo de rueda; la velocidad angular a partir de ese tiempo es de 0.6 rad/s y se mantiene dentro de un rango de variación muy pequeña hasta que el vehículo se detiene en su totalidad.

Figura 71

Velocidad angular del neumático a 80 km/h sin ABS



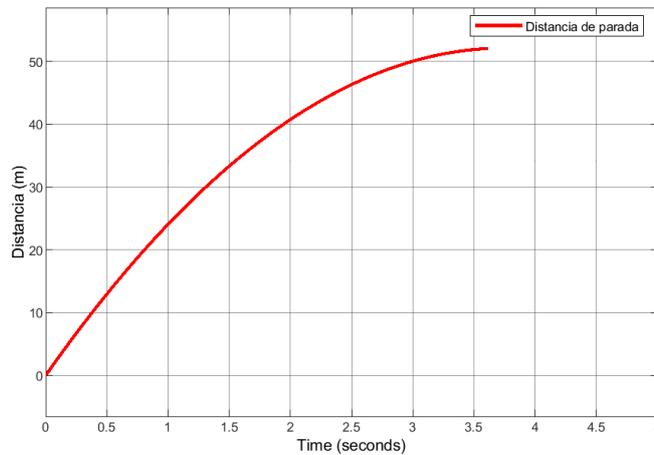
Nota: Elaboración propia

4.1.1.1.2 Velocidad a 100 km/h

Durante el frenado de emergencia a una velocidad inicial predefinida (27.7778 m/s) se observa en la figura 72 cómo evoluciona la distancia recorrida por el vehículo; el gráfico muestra como el vehículo frena de forma gradual hasta detenerse por completo. El vehículo se detiene en un tiempo de 3.617 segundos y tiene como espacio de recorrido de 52.04 metros.

Figura 72

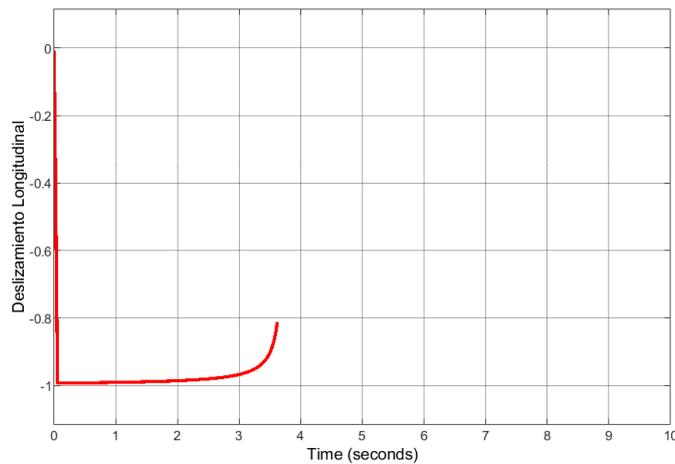
Distancia de frenado sin ABS a 100km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 73

Deslizamiento longitudinal sin ABS a 100 km/h



Nota: Elaboración propia

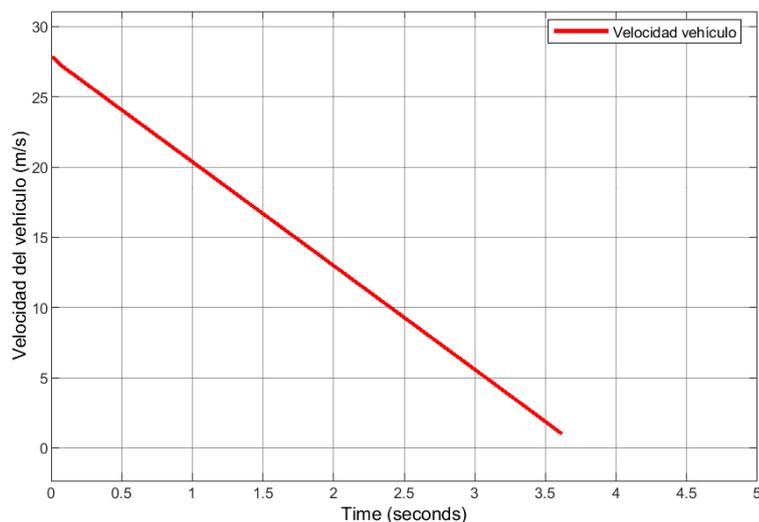
En la figura 73 se muestra el comportamiento del deslizamiento longitudinal, se puede observar que cuando se realizó el frenado de emergencia la rueda se bloquea automáticamente ocasionando que la rueda resbale produciendo una mayor distancia de frenado; esto ocurre debido a que se aplicó mucha presión, reflejándose en un par de frenado excesivo. El deslizamiento longitudinal alcanza

su máximo valor instantáneamente y al momento en que se detiene el vehículo registra un valor de -0.8125 .

La figura 74 muestra la variación de la velocidad del vehículo al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se aprecia como la velocidad va disminuyendo progresivamente desde una velocidad inicial de 100 km/h (27.77 m/s) hasta llegar a una velocidad final de 1 m/s , que es cuando el vehículo se detiene completamente.

Figura 74

Velocidad del vehículo a 100 km/h sin ABS

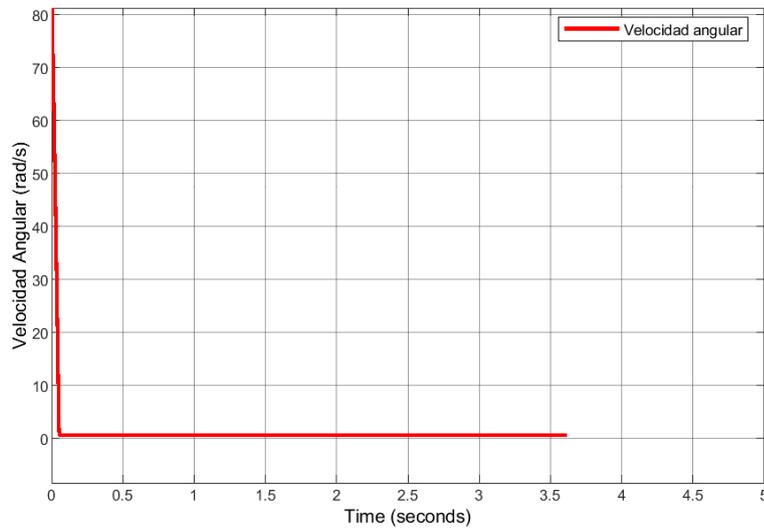


Nota: Elaboración propia

La figura 75 muestra los cambios de la velocidad angular de la rueda al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad angular presenta un cambio abrupto en 0.05 segundos, este cambio nos indica que inicia el bloqueo de rueda; la velocidad angular a partir de ese tiempo es de 0.59 rad/s y se mantiene dentro de un rango de variación muy pequeña hasta que el vehículo se detiene en su totalidad.

Figura 75

Velocidad angular del neumático a 100 km/h sin ABS



Nota: Elaboración propia

4.1.1.2. Resultados con ABS

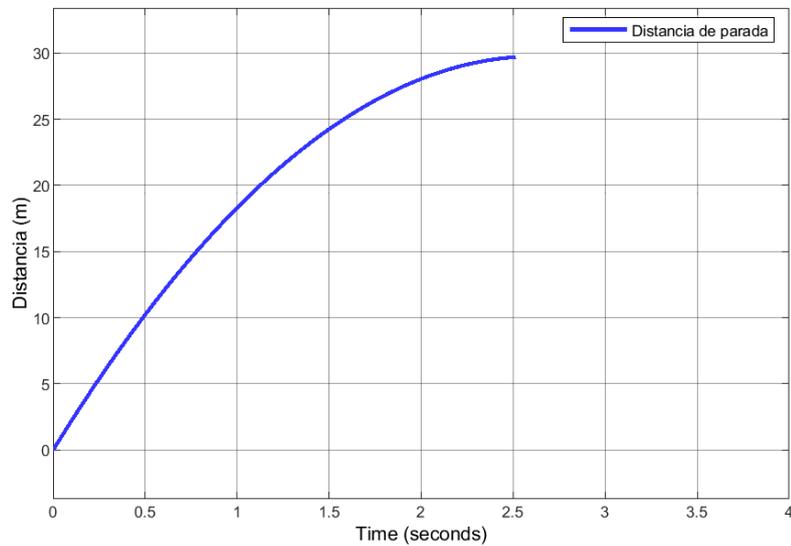
Los resultados que se muestran a continuación corresponden a la simulación del vehículo cuando el sistema ABS está activo; el valor de la referencia para el deslizamiento que se consideró fue 0.25, esto porque en las simulaciones con este valor se obtuvo mejores resultados. La estrategia de control que se implementó para el ABS es el controlador difuso.

4.1.1.2.1 Velocidad a 80 km/h

Durante el frenado de emergencia a una velocidad inicial predefinida (22.22 m/s) se observa en la figura 76 cómo evoluciona la distancia recorrida por el vehículo cuando actúa el sistema ABS; el gráfico muestra como el vehículo frena de forma gradual hasta detenerse por completo. El vehículo se detiene en un tiempo de 2.52 segundos y tiene un espacio de recorrido de 26.69 metros.

Figura 76

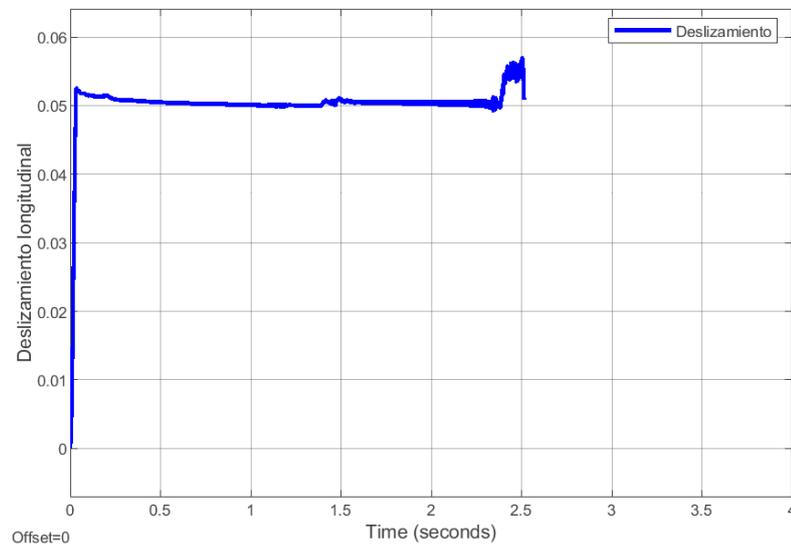
Distancia de frenado con ABS a 80km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 77

Deslizamiento longitudinal con ABS a 80km/h.



Nota: Elaboración propia

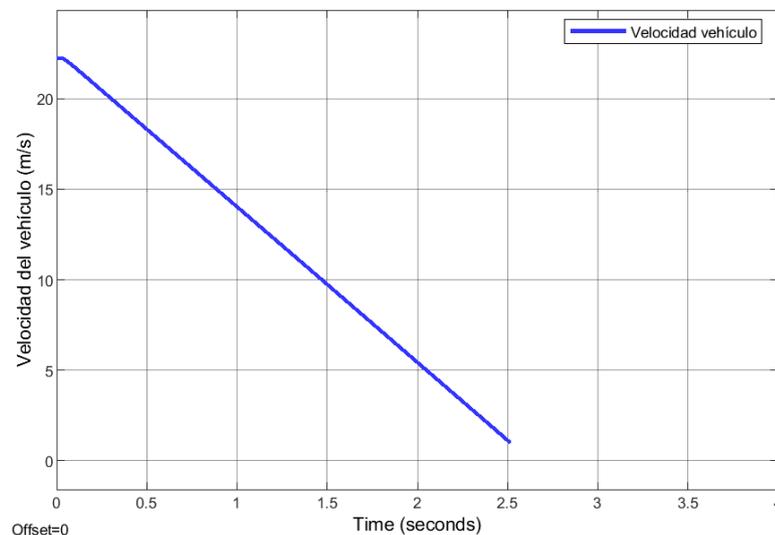
En la figura 77 se muestra el comportamiento del deslizamiento longitudinal, se puede observar que cuando se realizó el frenado de emergencia la rueda no se bloquea lo que permite manipular el direccionamiento del vehículo para evadir posibles obstáculos que se presenten. En el gráfico se ve que el

deslizamiento tiene un valor cerca a cero, lo que indica un libre movimiento de la rueda durante el frenado de emergencia debido a la modulación del par de frenado. El deslizamiento longitudinal registra un valor de 0.052 al momento de la parada del vehículo.

La figura 78 muestra la variación de la velocidad del vehículo al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad va disminuyendo progresivamente desde una velocidad inicial de 80 km/h (22.22 m/s) hasta llegar a una velocidad final de 1 m/s, que es cuando el vehículo se detiene completamente.

Figura 78

Velocidad del vehículo a 80 km/h con ABS.



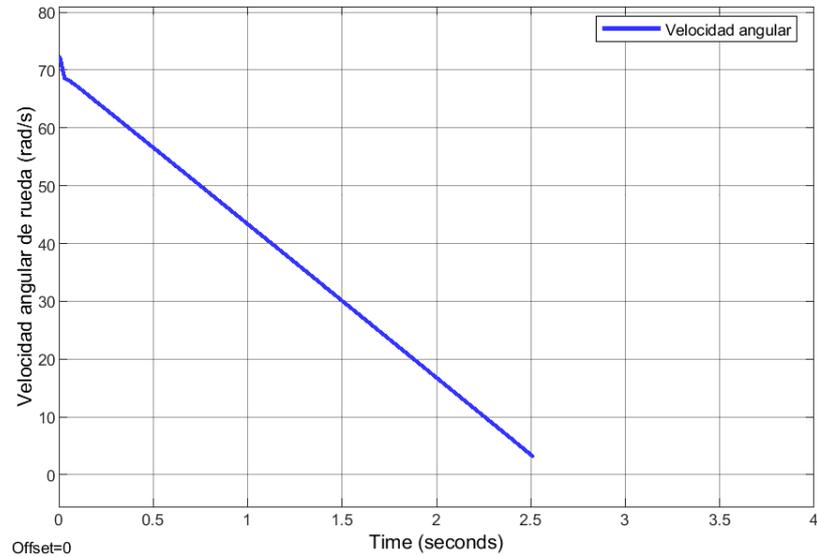
Nota: Elaboración propia

La figura 79 muestra los cambios de la velocidad angular de la rueda al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad angular inicia con 72.34 rad/s, en un primer momento presentó una reducción muy evidente, luego se normaliza y se aprecia como se reduce la velocidad angular de forma constante hasta que el vehículo se detiene en su

totalidad (3.25 rad/s). Esto nos indica que durante la detención del vehículo en ningún momento se bloqueó la rueda.

Figura 79

Velocidad angular a 80 km/h con ABS.



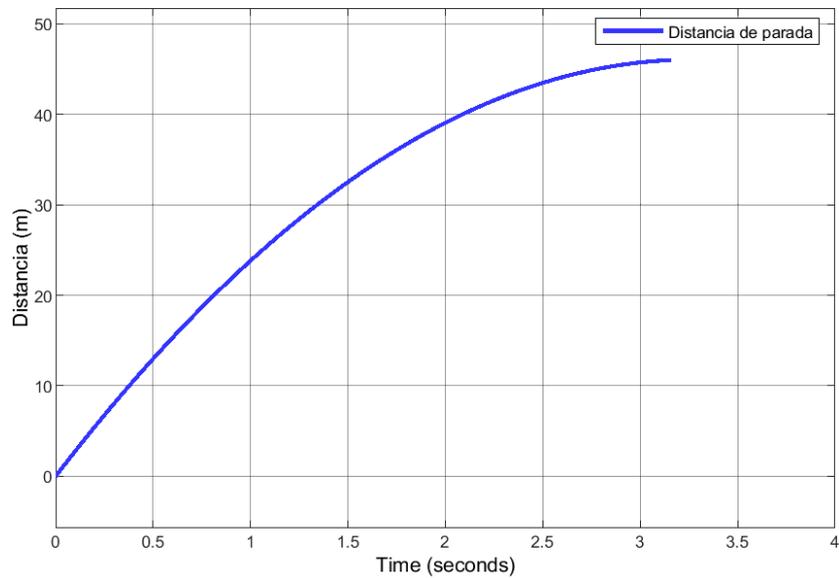
Nota: Elaboración propia

4.1.1.2.2. Velocidad a 100 km/h

Durante el frenado de emergencia a una velocidad inicial predefinida (27.78 m/s) se observa en la figura 80 cómo evoluciona la distancia recorrida por el vehículo cuando actúa el sistema ABS; el gráfico muestra como el vehículo frena de forma gradual hasta detenerse por completo. El vehículo se detiene en un tiempo de 3.16 segundos y tiene un espacio de recorrido de 46.01 metros.

Figura 80

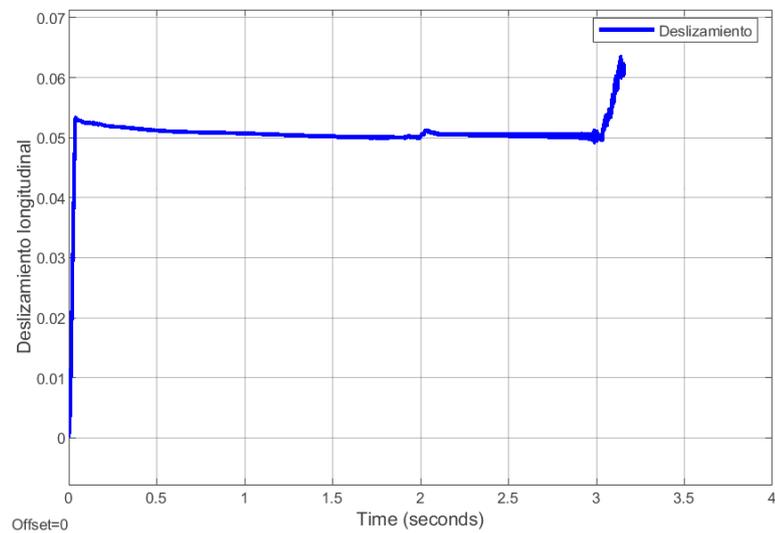
Distancia de frenado con ABS a 100km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 81

Deslizamiento longitudinal con ABS a 100km/h



Nota: Elaboración propia

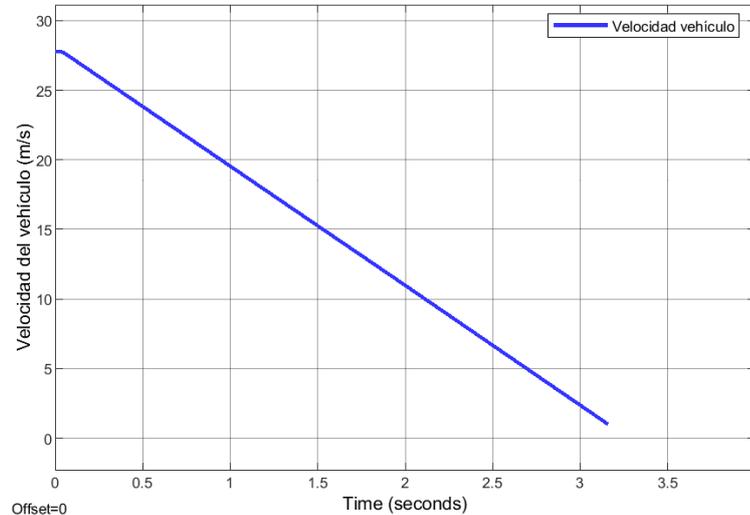
En la figura 81 se muestra el comportamiento del deslizamiento longitudinal, se puede observar que cuando se realizó el frenado de emergencia la rueda no se bloquea lo que permite manipular el direccionamiento del vehículo

para evadir posibles obstáculos que se presenten. En el gráfico se ve que el deslizamiento tiene un valor cerca a cero, lo que indica un libre movimiento de la rueda durante el frenado de emergencia debido a la modulación del par de frenado. El deslizamiento longitudinal registra un valor de 0.063 al momento de la parada del vehículo.

La figura 82 muestra la variación de la velocidad del vehículo al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad va disminuyendo progresivamente desde una velocidad inicial de 100 km/h (27.78 m/s) hasta llegar a una velocidad final de 1 m/s, que es cuando el vehículo se detiene completamente.

Figura 82

Velocidad del vehículo a 100 km/h con ABS



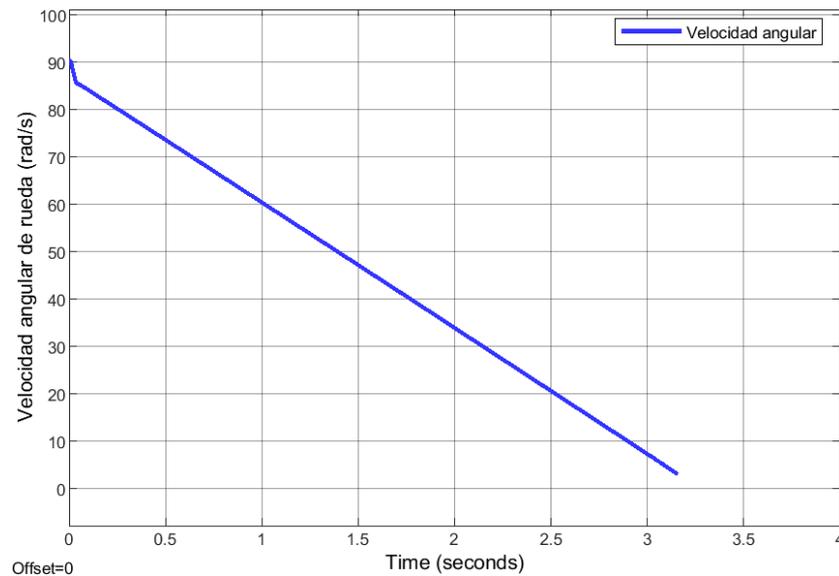
Nota: Elaboración propia

La figura 83 muestra los cambios de la velocidad angular de la rueda al momento de realizar el frenado de emergencia; en el gráfico se observa como la velocidad angular inicia con 90.42 rad/s, en un primer momento presentó una reducción muy evidente, luego se normaliza y se aprecia cómo se reduce la

velocidad angular de forma constante hasta que el vehículo se detiene en su totalidad (3.25 rad/s). Esto nos indica que durante la detención del vehículo en ningún momento se bloqueó la rueda.

Figura 83

Velocidad angular del neumático a 100 km/h con ABS



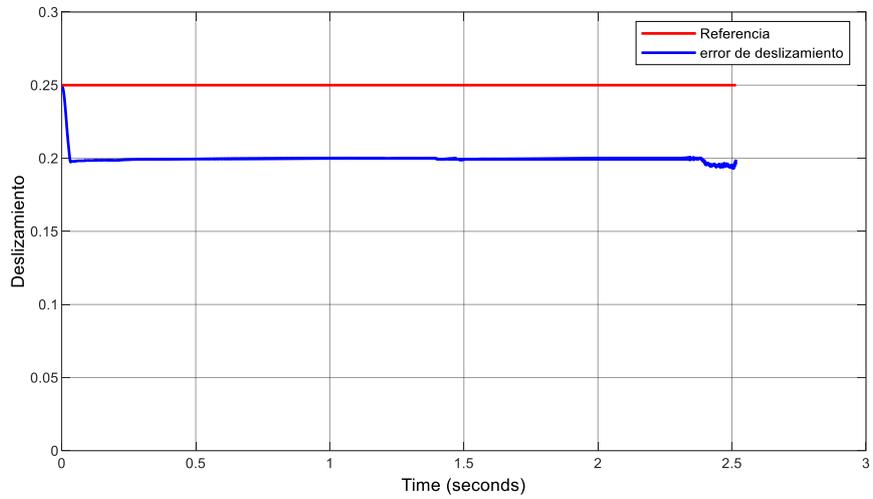
Nota: Elaboración propia

4.1.1.2.3. Error de deslizamiento con ABS

En las figuras 84 y 86 se muestra como el error de deslizamiento queda por debajo de la referencia, esto es lo que se desea conseguir; los investigadores recomiendan mantener el error de deslizamiento siempre por debajo de la referencia; pero siempre cercano al 0.2 o 20%, cuando el error de deslizamiento esta alrededor de este rango, el control del ABS es adecuado. En las figuras 85 y 87, se muestran una ampliación del error de deslizamiento, se puede observar como el error de deslizamiento varia por la zona adecuada para el control ABS.

Figura 84

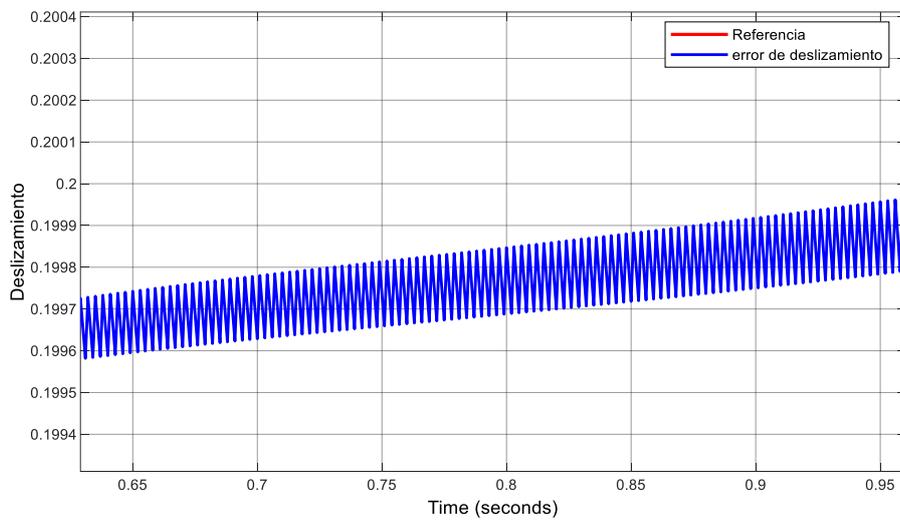
Error de deslizamiento a 80 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 85

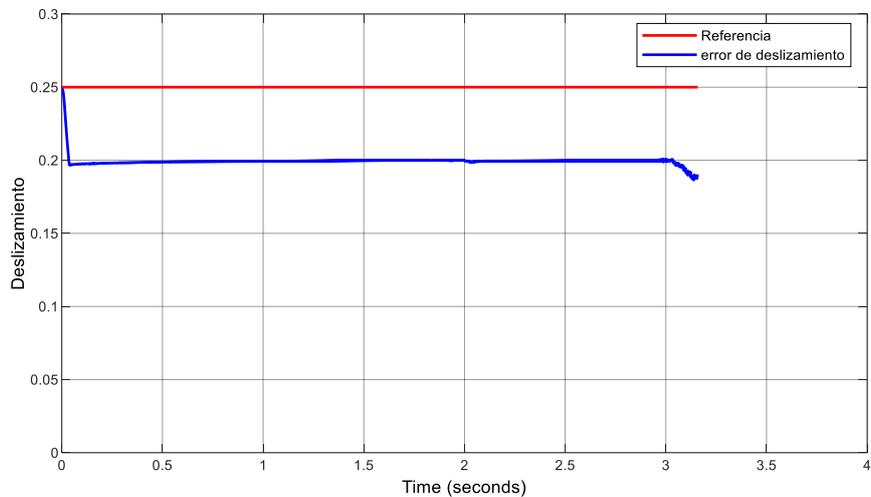
Zoom del error de deslizamiento a 80 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 86

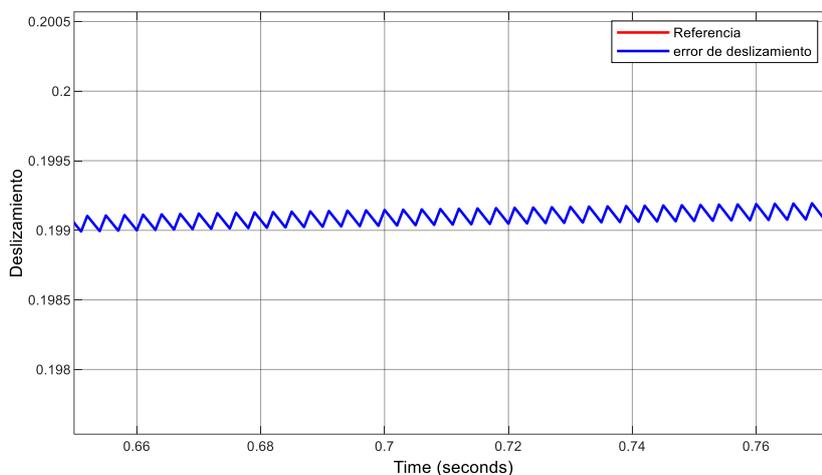
Error de deslizamiento a 100 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 87

Zoom del error de deslizamiento a 100 Km/h



Nota: Elaboración propia

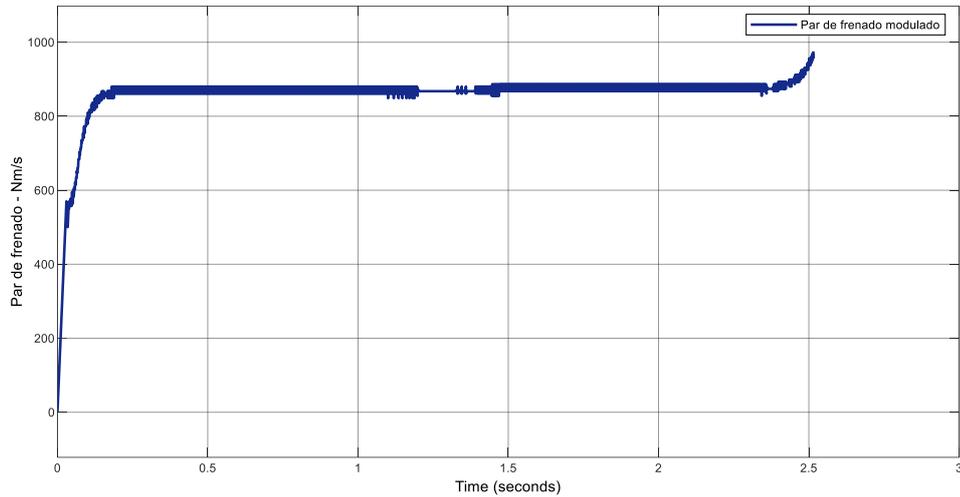
4.1.1.2.4. Par de freno modulado

En las figuras 88 y 90, se observa como el par de frenado en un principio aumenta rápidamente hasta mantenerse alrededor de los 870 Nm/s en ambas velocidades simuladas se observó que el par de freno se mantenía dentro de ese rango. En las figuras 89 y 91 se muestran una

ampliación del par de frenado, se observa un par de frenado con modulación que permite evitar el bloqueo de rueda durante el frenado.;

Figura 88

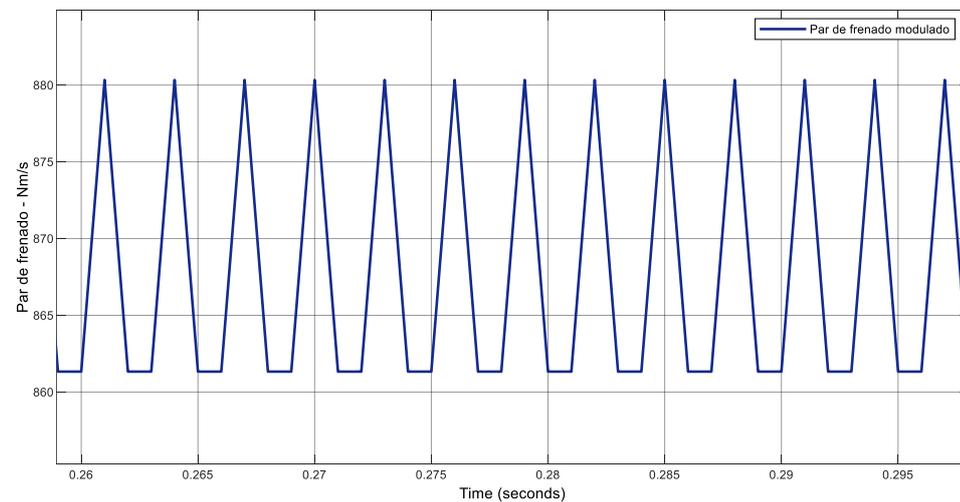
Par de frenado a 80 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 89

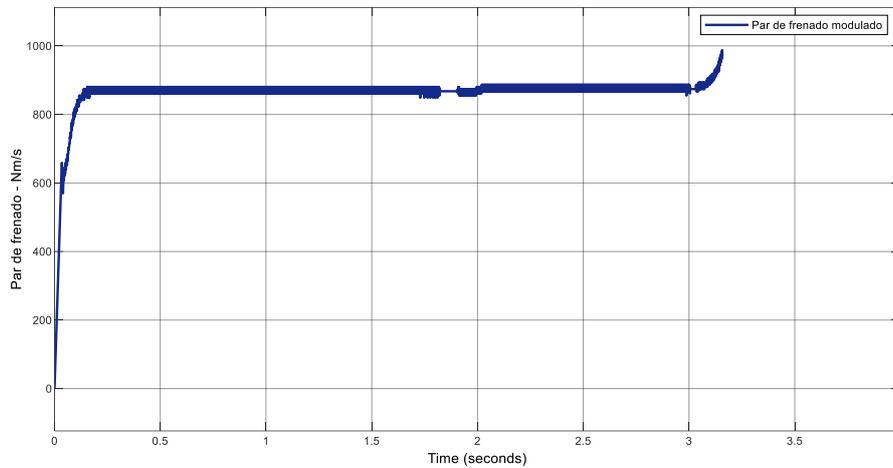
Zoom del par de frenado a 80 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 90

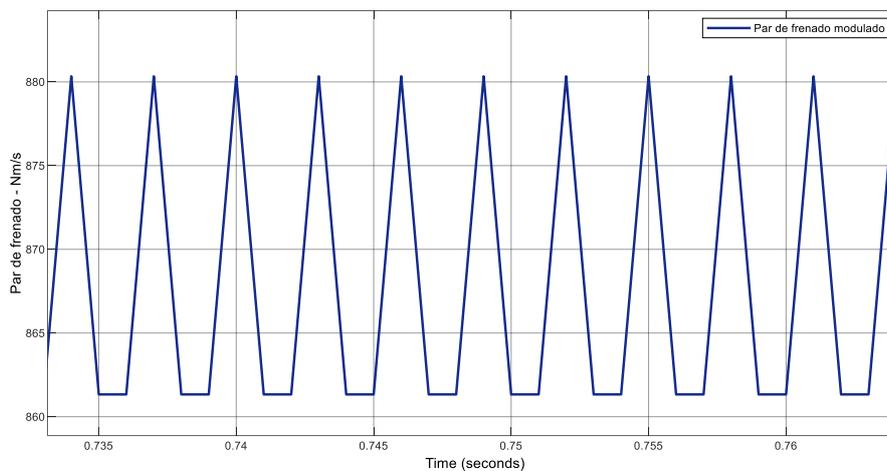
Par de frenado a 100 Km/h



Nota: Elaboración propia

Figura 91

Zoom del par de frenado a 100 Km/h



Nota: Elaboración propia

Como parte final del trabajo de investigación, se han construido unas tablas que muestran a manera de resumen, los datos más importantes obtenidos durante las simulaciones. Las tablas muestran la distancia y el tiempo de frenado; estas variables se han elegido porque se consideran las más importantes en términos de análisis del rendimiento de frenado en los vehículos. En la tabla 12 se realizó una comparación de la distancia de parada conseguido en la simulación y

los obtenidos por cálculos teóricos; para calcular la distancia de parada teórica se utilizó la ecuación 2.

Tabla 12

Comparación de distancia entre valores de simulación y teórico

Distancia de parade	Simulación	Teórico
sin ABS 80 km/h	33.28 m	25.26 m
con ABS 80 km/h	29.69 m	25.26 m
sin ABS 100 km/h	52.04 m	37.35 m
con ABS 100 km/h	46.01 m	37.35 m

Nota: Elaboración propia

En la tabla 13 se realizó una comparación del tiempo de parada conseguido en la simulación y los obtenidos por cálculos teóricos; para calcular la distancia de parada teórica se utilizó la ecuación 2.3.

Tabla 13

Comparación del tiempo entre valores de simulación y teórico

Tiempo de parade	Simulación	Teórico
sin ABS 80 km/h	2.86 s	2.27 s
con ABS 80 km/h	2.52 s	2.27 s
sin ABS 100 km/h	3.62 s	2.84 s
con ABS 100 km/h	3.16 s	2.84 s

Nota: Elaboración propia

En la tabla 14 y 15 se muestra valores de otras investigaciones.

Tabla 14

Valores de la investigación

Gonzales San Miguel, (2019)	sin ABS	con ABS
Distancia de parada 80 km/h	31 m	20.93 m
Tiempo de parada 80 km/h	2.8 seg	1.7 seg
Distancia de parada 100km/h	48.7 m	31.6 m
Tiempo de parada 100 km/h	3.55 seg	2.05 seg

Nota: Elaboración propia

Tabla 15*Segunda referencia de valores*

Rangelov, (2004)	sin ABS	con ABS
Distancia de parada 80 km/h	31 m	22.78 m
Tiempo de parada 80 km/h	2.8 seg	1.99 seg

Nota: Elaboración propia

Tabla 16*Valores de la investigación*

Investigación	sin ABS	con ABS
Distancia de parada 80 km/h	33.28 m	29.69 m
Tiempo de parada 80 km/h	2.86 s	2.52 s
Distancia de parada 100km/h	52.04 m	46.01 m
Tiempo de parada 100 km/h	3.62 s	3.16 s

Nota: Elaboración propia

4.2. DISCUSIÓN

Al optimizar el frenado en autos VW38 utilizando un sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa para mejorar la seguridad vial en la ciudad de Juliaca, los resultados son significativos en el frenado del auto VW38 para mejorar la seguridad vial; se consiguió identificar los parámetros presentes durante el frenado y en consecuencia fue factible desarrollar el sistema antibloqueo de rueda con lógica difusa, donde las simulaciones nos permiten ver como el frenado presenta mejoras; los autores: Aly et al., (2011), Astocondor Villar, (2018) y Gonzalez San Miguel, (2019) indican que existen mejoras en el frenado al aplicar el antibloqueo de rueda con lógica difusa.

Al identificar los parámetros que actúan durante un frenado para desarrollar el sistema antibloqueo de rueda, en este estudio se concluyó que es esencial la comprensión de las tecnologías modernas asociada al frenado de vehículos, se concluyó que hay parámetros que influyen de forma directa en el frenado; en el desarrollo del antibloqueo de rueda se consiguió elaborar un modulador de presión que depende de la unidad de



control (Fuzzy), se consiguió representar un modelo de cuarto de vehículo para realizar las simulaciones. Los autores Rangelov, (2004), Gonzalez San Miguel, (2019) y Minh et al., (2016) coinciden en que, al identificar los parámetros presentes en el frenado, se consigue desarrollar tecnología moderna para mejorar el frenado, además de que son investigaciones que se aproximan a un vehículo real.

Al realizar la simulación del sistema antibloqueo de rueda con control difuso para observar el mejoramiento del frenado, se obtuvo mejoras en el frenado, al comparar valores de distancia de parada que es uno de los parámetros importantes, se realizó simulaciones para dos valores de velocidad inicial y dos tipos de orden de freno (frenado sin ABS y con ABS); se realizó la comparación entre los valores de las distancias de parada y se observó que hay mejoras en el frenado. En Gonzalez San Miguel, (2019), Rangelov, (2004) muestran esa comparación donde existen mejoras en el frenado. En Pradeep-Rohilla et al., (2016) se aprecia valores de simulación con distancias de parada más alto, pero con un tiempo de parada relativamente bajo.



V. CONCLUSIONES

PRIMERA: Los resultados muestran que el optimizado de la distancia de frenado en autos VW38 utilizando un sistema antibloqueo de rueda fue adecuado y se destaca la importancia de comprender las tecnologías modernas asociadas al frenado; esta mejora del frenado garantiza un aumento de la seguridad del peatón y el mismo conductor, porque con el ABS evitamos perder el control de la dirección.

SEGUNDA: En relación a la identificación de los parámetros presentes durante el frenado, fue de bastante ayuda analizar el modelado de cuarto de vehículo, además de la importancia del neumático en el desempeño del modelo realizado; la librería desarrollada por Siemens ayudo bastante en la interface carretera y neumático, lo que permitió realizar lectura de datos que fueron de mucha ayuda en el desarrollo del antibloqueo de rueda. Entender la tecnología de frenado contribuyo bastante durante el diseño del controlador Fuzzy, las variables lecturas del modelo del cuarto del vehículo fue fundamental para la realimentación del controlador, en el planteo de reglas se vio la influencia de ciertas variables en el desempeño del frenado, llegando con todo es al éxito de este proyecto

TERCERA: Las simulaciones del sistema antibloqueo de rueda con control difuso se hizo pruebas con dos velocidades diferentes y se vio la respuesta del controlador diseñado frente al freno convencional, cumpliendo la condición que la rueda no se bloquee y pueda frenar al mismo tiempo, se vio también como el par de frenado es modulado para conseguir una



adecuada parada del modelo diseñado, demostrando con esto que se puede observar el mejoramiento del frenado; y así alcanzar el objetivo,



VI. RECOMENDACIONES

PRIMERA: Para mejorar aún más el frenado en autos VW38, se recomienda diseñar un modelo del vehículo completo que se asemeje a un vehículo real que incluya grados de libertad; esto permitirá obtener lectura de datos más reales del vehículo, con esto se realizará un control ABS con frenados más óptimos, lo que mejoraría la seguridad vial en la sociedad.

SEGUNDA: En la identificación de parámetros durante el frenado, se recomienda mejorar la interface entre neumático y carretera para que permita cambiar fricciones para diferentes tipos de carretera, variar el inflado de aire en el neumático, diseñar tipos de carreteras de acuerdo a nuestras necesidades; con todo esto se tendría una mejor respuesta del neumático que vería reflejados en las fuerzas y torques, con todo esto se podría diseñar técnicas de control más eficientes. Para el controlador difuso, se recomienda aumentar las variables de control esto permitirá tener una mejor respuesta frente a variaciones de carretera. Para implementar en un vehículo real, se recomienda incluir un controlador independiente a cada rueda y luego unificarlos en un controlador maestro, es necesario implementar protocolos de comunicación para la lectura de los sensores de velocidad para aislar el ruido y diseñar o adquirir un módulo ABS que nos permitirá para modular la presión de frenado de acuerdo a al controlador que se necesite implementar.

TERCERA: Para las simulaciones del sistema antibloqueo de rueda, se recomienda incluir obstáculos en carretera lo que nos permitirá observar el frenado del vehículo para esquivar el obstáculo. Se recomienda realizar una interface



de usuario para facilitar los cambios de parámetros que nos permitirá evaluar de mejor manera las simulaciones que se desea realizar.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aly, A. A., Zeidan, E.-S., Hamed, A., & Salem, F. (2011). An Antilock-Braking Systems (ABS) Control: A Technical Review. *Intelligent Control and Automation*, 02(03), 186–195. <https://doi.org/10.4236/ica.2011.23023>
- Astocondor Villar, J. (2018). Controlador fuzzy aplicado a sistemas de frenado ABS en ingeniería automotriz. In *Repositorio institucional – UNAC*. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/4006>
- Bauzá Fernández, F. J. (2018). *Estudio del sistema de frenado en los vehículos ligeros (turismos)* [Universidad Politécnica de Catalunya]. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/113326/REPORT_470.pdf
- Blucher, E. (2005). Manual de Tecnología Automotiva. In *Blucher* (25th ed.). Robert Bosch GmbH.
- Bosch, R. (2005). *Driving Stability Systems* (1st ed.). Robert Bosch GmbH.
- Bosch, R. (2014). *Brakes, Brake Control and Driver Assistance Systems* (K. Reif, Ed.; 1st ed.). Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03978-3>
- Dean, R. A. (2000). La Investigación Tecnológica en las Ciencias de la Ingeniería y la Innovación Tecnológica. *Revista Voces de La Universidad Nacional de Río Cuarto - Argentina*, 23, iv–vi. www.unrc.edu.ar/publicar/23/presdosi.html
- Dominguez, E. J., & Ferrer, J. (2012). *Sistemas de transmisión y frenado*. Editex. <http://190.57.147.202:90/xmlui/handle/123456789/2412>
- González Morcillo, C. (2011). Lógica Difusa, una introducción práctica. *Técnicas de Softcomputing*, 29.
- Gonzalez San Miguel, A. (2019). *Parameter affecting anti-lock brake sytem in Matlab/Simulink*. <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/53449>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta ed.). McGraw Hill.



- Hurel, J., Terán, E., Flores, F., Peralta Jaramillo, J., & Flores, B. (2017, July). *Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2017.1.1.295>
- Jazar, R. N. (2017). *Vehicle Dynamics: Theory and Application*. In *Vehicle Dynamics: Theory and Application: Third Edition* (3ra edición). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53441-1/COVER>
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>
- Martin Del Brio, B., & Sanz Molina, A. (2006). *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos* (3ra ed.). Ra-Ma.
- MathWorks, T. (2023). *Simulink Interface for Siemens MF-Tyre/MF-Swift Tire Model*. <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/123910-simulink-interface-for-siemens-mf-tyre-mf-swift-tire-model>
- Mauer, G. F., Gissinger, G. F., & Chamailard, Y. (1994, March 1). *Fuzzy Logic Continuous and Quantizing Control of an ABS Braking System*. <https://doi.org/10.4271/940830>
- Minh, V. T., Oamen, G., Vassiljeva, K., & Teder, L. (2016). Development of Anti-lock Braking System (ABS) for Vehicles Braking. *Open Engineering*, 6(1). <https://doi.org/10.1515/eng-2016-0078>
- Mora, M. A., Quintanilla, E. B., Romero, P. P., Yáñez, C. F., & Gallegos, W. M. (2023). Análisis del Sistema de Frenos ABS: Funcionamiento y Efectividad en la Seguridad Vehicular. *Ciencialatina.Org*, 9(1).
- Muñoz Razo, C. (2011). *Como Elaborar y Asesorar una Investigacion de Tesis* (segunda). Prentice Hall.
- Orozco Cuautle, J. L., Benítez Valencia, R., & Ochoa Rivera, J. C. (2018). Reparación del sistema de frenos convencionales y ABS. *Electrónica y Servicio*, 43–47. https://www.electronicayservicio.com/electronica_automotriz/libros_y_enciclopedias/4007.php



- Pacejka, H. B. (2012). *Tyre and Vehicle Dynamics* (3rd ed.). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/C2010-0-68548-8>
- Ponce Cruz, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería* (1ra ed.). Alfaomega.
- Pradeep Rohilla, Jitender, Amit, & Akshay Dhingra. (2016). Design and Analysis of Controller for Antilock Braking System in Matlab/Simulation. *International Journal of Engineering Research And*, V5(04).
<https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS041074>
- Rangelov, K. (2004). *SIMULINK model of a quarter-vehicle with an Anti-lock Braking System* [Technische Universiteit Eindhoven. Stan Ackermans Instituut].
<https://research.tue.nl/en/publications/simulink-model-of-a-quarter-vehicle-with-an-anti-lock-braking-sys>
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. Jr. (2018). *Física para Ciencias e Ingeniería* (10th ed., Vol. 2). Cengage Learning.
- Siemens, T. (2023). Manual de usuario 2212 Simcenter Tire MF-Tyre/MF-Swift. *Siemens Digital Industries Software*.
https://2023.help.altair.com/2023/hwsolvers/ms/topics/motionview/MFTyre-MFSwift_Help.pdf
- Sundaram, G., & Sathyam, S. (2017). *Modelling and Simulation of a Vehicle Powertrain and Anti-Lock Braking System*.
https://www.researchgate.net/publication/321085372_Modelling_and_Simulation_of_a_Vehicle_Powertrain_and_Anti-Lock_Braking_System
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, SMC-15*(1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- Villar Paúl, J., & Rodríguez García, J. I. (2017). *Sistemas de Transmisión y Frenado*. Macmillan Education.



- Xiao, L., Hongqin, L., & Jianzhen, W. (2016). Modeling and Simulation of Anti-lock Braking System based on Fuzzy Control. *IARJSET*, 3(10), 110–113. <https://doi.org/10.17148/IARJSET.2016.31021>
- Xiu-qin, Z., Bo, Y., Chao, Y., & Guan-neng, X. (2012). Research on ABS of Multi-axle Truck Based on ADAMS/Car and Matlab/Simulink. *Procedia Engineering*, 37, 120–124. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.04.213>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(1), 28–44. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1973.5408575>
- Zadeh, L. A. (1975a). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences*, 8(3), 199–249. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90036-5)
- Zadeh, L. A. (1975b). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II. *Information Sciences*, 8(4), 301–357. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90046-8](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90046-8)

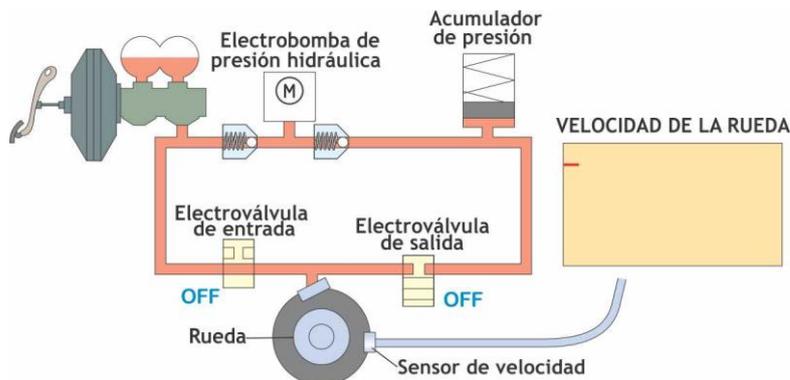
ANEXOS

ANEXO 1: Regulación del sistema hidráulico

Una descripción básica del desempeño de la regulación hidráulica de un sistema ABS es la siguiente: El sensor de velocidad de la rueda observa constantemente el estado de movimiento de la rueda. En un primer momento, cuando el vehículo está en movimiento y no se realiza ninguna operación de frenado para detener el vehículo, la electroválvula de entrada o de admisión (EVin) está abierta (permite el pase) y la electroválvula de salida o descarga (EVout) se quedará cerrada (bloquea el pase), las dos electroválvulas se encuentran apagadas con esas configuraciones (figura 92).

Figura 92

El sistema ABS sin acción de frenado



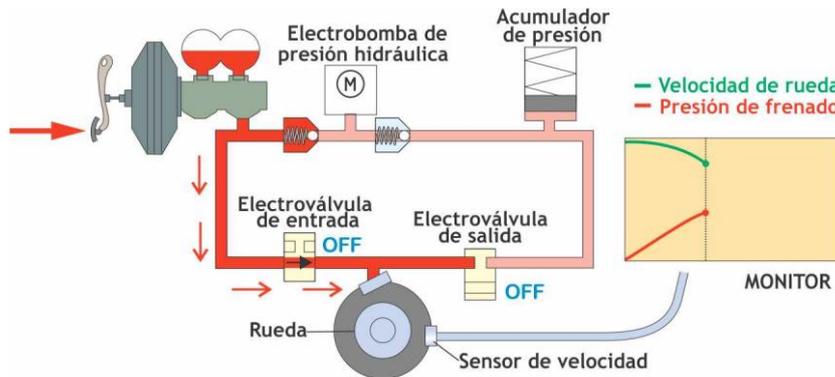
Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

Durante una acción de frenado normal, el sistema ABS se comporta como un sistema de frenos convencional. Cuando se supera valores críticos definidos, el sistema ABS empieza a actuar, envía una señal a la ECU para que ordene frenar el vehículo; la EVin está apagada, pero deja pasar el líquido para que actúe en los frenos, la EVout también está apagada y no da paso al líquido, debido a la lectura del sensor de rueda el ECU detecta una desaceleración de la rueda, la velocidad va disminuyendo y la presión de

frenado va aumentando y como aún las ruedas no llegan a bloquearse el vehículo realiza un frenado convencional (figura 93).

Figura 93

El sistema ABS primer ciclo

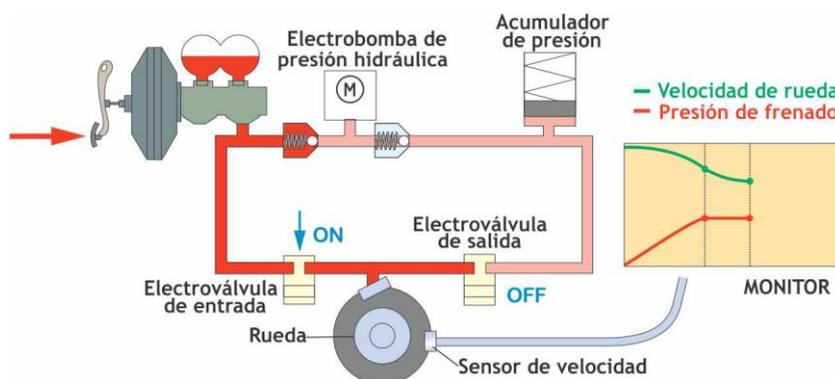


Nota: Villar Paúl & Rodríguez García,(2017)

El ECU detecta que la velocidad de rueda al estar disminuyendo queda fuera del rango de trabajo (mejor frenada y buena adherencia) y enciende la EVin para evitar que siga aumentando la presión, la EVout sigue apagada; con esta acción se aísla la bomba de freno (presión en aumento) y se consigue mantener la presión de frenado y seguir disminuyendo la velocidad en la rueda (figura 94).

Figura 94

El sistema ABS, manteniendo la presión



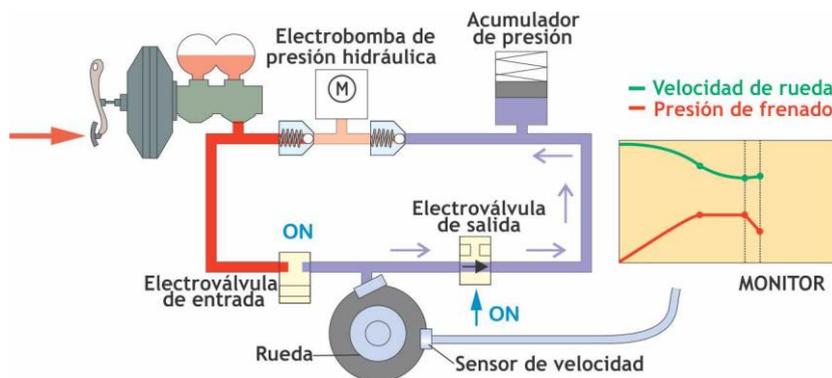
Nota: Villar Paúl & Rodríguez García,(2017)

La ECU sigue en constante lectura y cuando detecta que la rueda está cerca de bloquearse, enciende la EVout para que la presión de frenado pueda disminuir, es aquí donde actúa el

acumulador, pues sirve como medio de escape para liberar la presión de frenado, con esto se evita un posible bloqueo de rueda. En ese momento las dos electroválvulas están encendidas. El ECU detecta que la rueda está avanzando, no puede reducir mucho la presión ya que la rueda gana velocidad en ese momento (figura 95).

Figura 95

El sistema ABS, reducción de presión

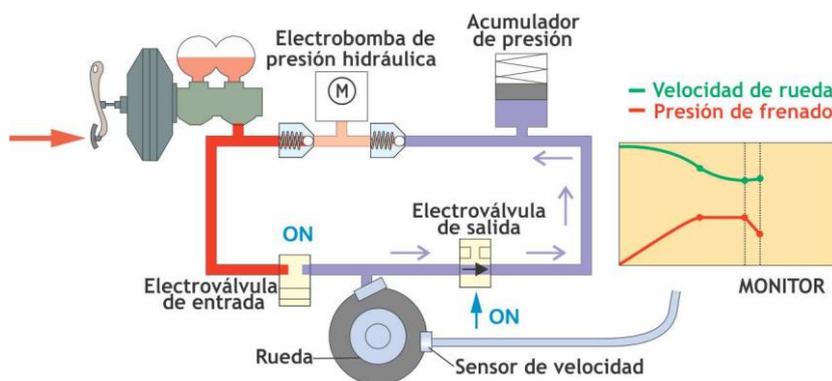


Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

La ECU apaga la EVout para mantener la presión (figura 96), de lo contrario la velocidad de la rueda podría incrementar rápidamente.

Figura 96

El sistema ABS, mantener presión baja



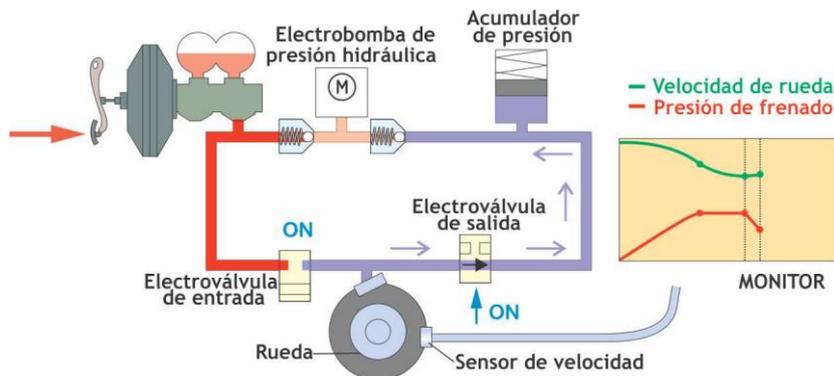
Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)

Al recibir la señal de activación la ECU tiene como objetivo detener el vehículo bajo ciertos rangos de trabajo, para cumplir eso, se necesita aumentar la presión, para eso se apaga la EVin (da paso) y se llega a la condición de inicial. La ECU activa la

electrobomba de presión, la electrobomba toma el líquido q está en el acumulador y lo devuelve al circuito, consiguiendo un aumento en la presión, así como una reducción de velocidad (figura 97).

Figura 97

El sistema ABS, aumento de presión de la electrobomba



Nota: Villar Paúl & Rodríguez García, (2017)



ANEXO 2: Código Matlab

```
clc;

clear ISWITCH;

%% Masa cuarto de vehículo --

m1=35;    %Kg
m2=300;   %Kg

%% Neumático

r_0=0.3135;    %m
r_ef=0.3072;   %m

%% Suspensión horizontal --

Vin=100/3.6; %m/s ---80Km/h=22.2222m/s---100km/h=27.7778m/s

Vstop=1;    %m/s

X10=0.01;   %m
X20=0;      %m

Cx=2000;    %N.s/m 1100

Kx=80000;   %N/m 100000

%% Suspensión vertical

g=9.7722;   %m/s^2

Cz=2000;    %N.s/m

Kz=20000;   %N/m 20000

m_belt=7.247; %Kg

k_zTire=200000; %N/m 125000

l_z0=0;     %m

Z10=r_0 - g*(m1+m2+m_belt)/k_zTire; %m

Z20=Z10+l_z0-g*m2/Kz;      %m

%% Dinámica neumático

Ip=1.04;    %kg*m^2 0.95

W_in=Vin/r_ef; %rad/s

%W_in=72.3309;    %rad/s para 80km/h

%W_in=90.4137;   %rad/s para 100km/h
```



% Load MF62 tire parameters

tir_name = 'Siemens_car205_60R15.tir';

ISWITCH = 11121; %11122

%% Modulador

P1=19000; % N m/s

P2=19000; % N m/s

Pnivel=2533; % N m/s

%% Muestreo

Tm=0.001; %0.001



ANEXO 3: Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo OCTAVIO QUISPE YUCRA,
identificado con DNI 42141785 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA ELECTRÓNICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ OPTIMIZACIÓN DEL FRENADO EN AUTOS VW38 UTILIZANDO UN SISTEMA
ANTIBLOQUEO DE RUEDA CON LÓGICA DIFUSA PARA MEJORAR LA
SEGURIDAD VIAL EN LA CIUDAD DE JULIACA ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 13 de DICIEMBRE del 20 24


FIRMA (obligatoria)



Huella



ANEXO 4: Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional
del Altiplano Puno



Vicerrectorado
de Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo OCTAVIO QUISPE YUCRA,
identificado con DNI 42141785 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“ OPTIMIZACIÓN DEL FRENADO EN AUTOS VW38 UTILIZANDO UN SISTEMA
ANTIBLOQUEO DE RUEDA CON LÓGICA DIFUSA PARA MEJORAR LA
SEGURIDAD VIAL EN LA CIUDAD DE JULIACA ”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 13 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella