



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

**Detección de fallas en la suspensión de un automóvil basada en
observadores adaptables**

presentada por

Ing. Pedro Eusebio Alvarado Méndez

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Codirectora de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2019.



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor.,

05/sep/2019

No. de Oficio:

DIE/102/2019

Asunto:

Aceptación de documentos de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Pedro Eusebio Alvarado Méndez**, con número de control **M17CE052** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Detección de Fallas en la Suspensión de un Automóvil Basada en Observadores Adaptables"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Doctor en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5505019

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9968714

REVISOR 1

Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez
Doctor en Ingeniería 3431842
Cédula profesional 3431842

REVISOR 2

Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 10259407

C.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera- Jefa del Departamento de Servicios Escolares

Estudiante
Expediente
MPS/lrr.

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos.
Tel. (01) 777 3 62 77 70, ext. 2225, e-mail: die@cenidet.edu.mx

www.tecnm.mx | www.cenidet.edu.mx





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Cuernavaca, Mor.,
No. de Oficio:
Asunto:

6/septiembre/2019
SAC/261/2019
Autorización de
impresión de tesis

ING. PEDRO EUSEBIO ALVARADO MÉNDEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Detección de Fallas en la Suspensión de un Automóvil Basada en Observadores Adaptables", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Mtra. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatoria

A mis padres Apolinar Alvarado Castillo y María del Socorro Méndez López, por el amor que me han otorgado, su cariño, sus consejos que me han dado a lo largo de mi vida, por apoyarme en todo momento, por brindarme los valores necesarios para salir adelante y lograr mis metas, que a pesar de las adversidades me enseñan a seguir adelante, son mi mas grande ejemplo en la vida, la bandera sigue más alto que nunca.

A mis hermanos Jesús Manuel y Angel, por motivarme y apoyarme en todo momento, por traerme alegría, por ser mis compañeros de vida, sé que siempre contaremos el uno para el otro.

A mi tía Beatriz Méndez López, por todo el apoyo, amor, cariño, consejos, enseñanzas y motivación para salir adelante, por ser otra madre para mí.

A mi abuelita María López de la Paz, por cuidarme desde que era pequeño, por amarme y estar siempre conmigo, por siempre tener una sonrisa para mí, por todo su cariño.

A mi tía Yolanda de la Cruz López, por todo el amor, apoyo, cariño, por animarme a salir adelante, por estar conmigo en todo momento.

A mi tío Carlos Alberto Méndez López, por estar conmigo en todo momento, por su cariño y sus enseñanzas.

A la familia Albiter Osorio, gracias por acogerme, por animarme y apoyarme.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme permitido terminar satisfactoriamente este trabajo.

A mis amigos Adriana, Ilian, Alejandra, Eduardo, Laura, Pepe, Luis, Diana, Dala, Tere, Carlos, Lenin, Samantha, Juan, por apoyarme, animarme, confiar en mí, impulsándome a seguir adelante y que a pesar de la distancia la amistad siempre siga.

A mis asesores Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo, por haberme guiado en este proceso, por sus enseñanzas, su apoyo incondicional, por brindarme su amistad y su confianza, por creer en mi, por sus consejos, conocimientos y aportaciones en cada momento para el desarrollo de este trabajo de tesis, y hacia mi persona, muchas gracias.

A mis revisores el Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez y el Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez, por sus valiosos consejos y observaciones realizadas para obtener mejores resultados de este trabajo de tesis.

A mis profesores: Dr. Juan Reyes, Dra. Gloria, Dr. Rodolfo, Dr. Carlos Daniel, Dr. Francisco, Dr. Fabricio, Dr. Madrigal, Dr. Astorga, Lic. Lorena, Dr. Guerrero y Dr. Adam, por el apoyo y enseñanzas brindados durante el desarrollo de mi formación académica en CENIDET.

A mis compañeros y amigos del CENIDET, especialmente Diana, Zetina, Erick, Henry, Christian, Juanito, Citlaly, Jesus, Oyuki, Sabido, Felipe, Ian, Cavita, Jonathan, Josefo gracias por hacer amena la estancia, por su amistad sincera, que a pesar de ser amigos son una familia para mi, gracias por motivarme a seguir adelante, por compartir aulas de clase, proyectos, tareas, desvelos, convivios y por todo el camino recorrido juntos, espero coincidir nuevamente con ustedes.

Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para poder realizar y culminar mis estudios de maestría.

Finalmente, agradezco al Tecnológico Nacional de México y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por abrirme sus puertas y brindarme las herramientas y habilidades necesarias para mi formación académica.

Resumen Ejecutivo

En esta tesis se presenta el estudio y diseño de observadores adaptables para sistemas mecánicos no lineales. Se elige como caso de estudio un modelo matemático de una cuarta parte de un vehículo con una suspensión semiactiva y se parametriza utilizando valores reportados en trabajos previos.

El objetivo de los observadores adaptables es estimar los estados y algún parámetro cuya variación pueda ser interpretada como una falla en el sistema. Un parámetro que cumple con este requisito es el coeficiente de rigidez de la llanta k_t . La supervisión de este parámetro tiene como finalidad evaluar el estado de la llanta, ya sea que esté en buenas condiciones o no, por ejemplo, que tenga baja presión debido a un defecto o picadura y exista la necesidad de un mantenimiento preventivo o correctivo.

Más adelante, los observadores adaptables se validan por medio de simulaciones numéricas, mediante diferentes escenarios de fallas, evaluando su desempeño a través de mediciones de error y tiempo de convergencia.

Finalmente se propone una instrumentación con la finalidad de generar una medición de la deflexión del amortiguador z_{def} , ya que gracias a esta medición se podría implementar un sistema de detección de fallas en la suspensión.

Abstract

This thesis presents the study and design of adaptable observers for non-linear mechanical systems.

A mathematical model of a quarter of a vehicle with a semi-active suspension is chosen as a case study and is parameterized using values reported in previous works.

The objective of adaptive observers is to estimate the states and some parameters whose variation can be interpreted as a system failure. A parameter that satisfies this requirement is the tire stiffness coefficient k_t . The supervision of this parameter determines the condition of the tire, whether it is in good condition or not. For example, the tire has low pressure due to a defect or sting, so then, it is needed a preventive or corrective maintenance. Later, adaptable observers are validated by means of numerical simulations, through different fault scenarios, evaluating their performance through error measurements and convergence time.

Finally, an instrumentation is proposed with the determination of generate a measurement of the deflection of the z_{def} shock absorber, using to this measure, a system of fault detection in the suspension could be implemented.

Índice general

Índice de tablas	XI
Índice de figuras	XII
Nomenclatura	XV
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Objetivo	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Revisión del estado del arte	3
1.3.1. Detección de fallas en suspensiones	3
1.3.2. Observadores aplicados a suspensiones	4
1.3.3. Modelos de suspensiones	6
1.4. Aportación	7
1.5. Alcances y limitaciones	7
1.6. Originalidad	7
1.7. Organización del documento	8
2. Marco teórico	9
2.1. Sistemas de suspensión	9
2.1.1. Antecedentes	9
2.1.2. Clasificación de tipos de suspensión	15
2.1.2.1. Suspensión pasiva	15
2.1.2.2. Suspensión activa	16
2.1.2.3. Suspensión semiactiva	17
2.2. Concepto de falla	20
2.2.1. Tipos de fallas	20
2.2.2. Clasificación de fallas	21
2.2.3. Detección de fallas	21
2.2.4. Fallas comunes en suspensiones	21
2.3. Observadores	22
2.3.1. Observadores para sistemas lineales	23
2.3.2. Observadores para sistemas no lineales	23
2.3.2.1. Observador adaptable	27
2.3.2.2. Observador de alta ganancia	27

3. Diseño del esquema de detección de fallas	29
3.1. Diseño de un observador adaptable	29
3.2. Diseño de un observador adaptable para sistemas no lineales Lipschitz	34
4. Resultados de simulación	41
4.1. Simulación del sistema	41
4.1.1. Simulación del modelo matemático de una suspensión semiactiva	46
4.2. Evaluación de la respuesta del sistema	49
4.3. Simulación del observador adaptable para la estimación de un parámetro para el sistema de una suspensión semiactiva	52
4.4. Simulación del observador adaptable Lipschitz para la estimación de un parámetro para el sistema de una suspensión semiactiva	56
4.5. Escenarios de fallas en suspensiones	62
5. Propuesta de instrumentación	85
6. Conclusión	89
6.1. Principales resultados	89
6.2. Contribuciones	89
Bibliografía	91
A. Anexos	95
A.1. Parámetros	95
A.2. Regiones LMI	96
A.3. Poster	97
A.4. AMCA	98
A.5. Sensor	99
A.5.1. Ficha técnica del sensor Blade 60	99
A.6. Amortiguador Magnetoreológico	101
A.6.1. Ficha técnica de un amortiguador magnetoreológico	101

Índice de tablas

4.1. Parámetros	46
4.2. Escenario de fallas.	62
A.1.1 Parámetros del sistema nominal	95

Índice de figuras

1.1. Diagrama de una suspensión semiactiva	2
1.2. Tipos de fallas	3
2.1. Diseño del primer amortiguador	10
2.2. Esquema clásico de una suspensión de un automóvil [Savaresi et al., 2010]	11
2.3. Ballesta	12
2.4. Muelles	12
2.5. Barra de torsión	13
2.6. Rótula	13
2.7. Amortiguador	14
2.8. Barra estabilizadora	14
2.9. Esquema suspensión pasiva de un cuarto de vehículo.	15
2.10. Esquema suspensión activa para un cuarto de vehículo	16
2.11. Diagrama de cuerpo libre de una suspensión semiactiva	18
2.12. Amortiguador MagneRide	20
2.13. Función de salida de un sistema débil	25
3.1. Condición Lipschitz	35
4.1. Esquema de una suspensión semiactiva	41
4.2. Tope 1	42
4.3. Medición de altura del tope 1	42
4.4. Tope 1: Posición del perfil de suelo	43
4.5. Tope 2	43
4.6. Medición de altura del tope 2	44
4.7. Tope 2: Posición del perfil de suelo	44
4.8. Tope 3	45
4.9. Tope 3: Posición del perfil de suelo	45
4.10. Posición del chasis del sistema al aplicarse un perfil de suelo.	47
4.11. Velocidad del chasis del sistema al aplicarse un perfil de suelo.	47
4.12. Posición de la llanta del sistema al aplicarse un perfil de suelo.	48
4.13. Velocidad de la llanta del sistema al aplicarse un perfil de suelo.	48
4.14. Perfil de suelo.	49
4.15. Entrada F_δ	50
4.16. Posición del chasis	50
4.17. Velocidad del chasis	51
4.18. Posición de la llanta	51
4.19. Velocidad de la llanta	52
4.20. Simulación I: Rigidez de la llanta	53

4.21. Simulación I: Comparación de posiciones del chasis	54
4.22. Simulación I: Comparación de posiciones de la llanta	54
4.23. Simulación II: Rigidez de la llanta	55
4.24. Simulación II: Comparación de posiciones del chasis	55
4.25. Simulación II: Comparación de posiciones de la llanta	56
4.26. Perfil de suelo recto	57
4.27. Simulación III: Rigidez de la llanta	59
4.28. Simulación III: Posición vertical del chasis	60
4.29. Simulación III: Posición vertical de la llanta	60
4.30. Simulación III: Velocidad vertical del chasis	61
4.31. Simulación III: Velocidad vertical de la llanta	61
4.32. Escenario 1 Prueba 1: Rigidez de la llanta	63
4.33. Escenario 1 Prueba 1: Posición del chasis	63
4.34. Escenario 1 Prueba 1: Posición de la llanta	64
4.35. Escenario 1 Prueba 1: Comparación de posiciones	64
4.36. Escenario 1 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"	65
4.37. Escenario 1 Prueba 2: Posición del chasis	66
4.38. Escenario 1 Prueba 2: Posición de la llanta	66
4.39. Escenario 1 Prueba 2: Comparación de posiciones	67
4.40. Escenario 1 Prueba 3: Posición del chasis	68
4.41. Escenario 1 Prueba 3: Posición de la llanta	68
4.42. Escenario 1 Prueba 3: Comparación de posiciones	69
4.43. Escenario 2 Prueba 1: Rigidez de la llanta	70
4.44. Escenario 2 Prueba 1: Posición del chasis	71
4.45. Escenario 2 Prueba 1: Posición de la llanta	71
4.46. Escenario 2 Prueba 1: Comparación de posiciones	72
4.47. Escenario 2 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"	73
4.48. Escenario 2 Prueba 2: Posición del chasis	73
4.49. Escenario 2 Prueba 2: Posición de la llanta	74
4.50. Escenario 2 Prueba 2: Comparación de posiciones	74
4.51. Escenario 2 Prueba 3: Posición del chasis	75
4.52. Escenario 2 Prueba 3: Posición de la llanta	76
4.53. Escenario 2 Prueba 3: Comparación de posiciones	76
4.54. Escenario 3 Prueba 1: Rigidez de la llanta	78
4.55. Escenario 3 Prueba 1: Posición del chasis	78
4.56. Escenario 3 Prueba 1: Posición de la llanta	79
4.57. Escenario 3 Prueba 1: Comparación de posiciones	79
4.58. Escenario 3 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"	80
4.59. Escenario 3 Prueba 2: Posición del chasis	81
4.60. Escenario 3 Prueba 2: Posición de la llanta	81
4.61. Escenario 3 Prueba 2: Comparación de posiciones	82
4.62. Escenario 3 Prueba 3: Posición del chasis	83
4.63. Escenario 3 Prueba 3: Posición de la llanta	83
4.64. Escenario 3 Prueba 3: Comparación de posiciones	84
5.1. Deflexión del amortiguador	85
5.2. Desplazamiento del pistón del amortiguador	86
5.3. Amortiguador dañado, $F_{\delta}(t) \neq 0$	86

5.4. Propuesta de instrumentación (Diseñado en Solidworks) 87

A.2.1Región LMI 96

Nomenclatura

Letras mayúsculas

$F_{MR}(t)$	Fuerza del amortiguador MR
$F_{\delta}(t)$	Falla aditiva en la fuerza MR
$I(t)$	Corriente eléctrica
L	Ganancia del observador
K	Ganancia del observador
A	Matriz de dimensiones apropiadas
B	Matriz de dimensiones apropiadas
C	Matriz de dimensiones apropiadas
E	Matriz de observabilidad

Letras minúsculas

$\rho(t)$	Histéresis en el modelo de amortiguador
a_i	Parámetros en zona pre-esfuerzo del modelo de F_{MR}
b_i	Parámetros en zona post-esfuerzo del modelo de F_{MR}
f_c	Fuerza dinámica en el modelo de amortiguador MR
k_s	Coefficiente de rigidez del resorte
k_t	Coefficiente de rigidez de la llanta
m_s	Masa suspendida
m_{us}	Masa no suspendida
t	Tiempo
$u(t)$	Vector de las entradas
$z_{def}(t)$	Posición del pistón del amortiguador MR
$\dot{z}_{def}(t)$	velocidad del pistón del amortiguador MR
$z_r(t)$	Perfil del suelo
$z_s(t)$	Desplazamiento vertical de m_s
$z_{us}(t)$	Desplazamiento vertical de m_{us}
$\dot{z}_s(t)$	Velocidad vertical de m_s
$\dot{z}_{us}(t)$	Velocidad vertical de m_{us}
$\ddot{z}_s(t)$	Aceleración vertical de m_s
$\ddot{z}_{us}(t)$	Aceleración vertical de m_{us}
$x(t)$	Vector de las variables de estado
$y(t)$	Vector de las variables de salida
k_y	Ganancia del observador
k_{θ}	Ganancia del observador
$e(t)$	Error de estimación

Letras griegas

α	Función globalmente Lipschitz
β	Función globalmente Lipschitz
γ	Constante Lipschitz
Γ	Ganancia del observador
θ	Parámetro desconocido

Marcas diacríticas

\cdot	Derivada respecto al tiempo
$\hat{}$	Valor estimado

Caracteres especiales

\mathbb{C}	Conjunto de los números complejos
\mathbb{R}	Conjunto de los números reales
$\ \cdot\ $	Norma Euclidiana

Abreviaturas

FDD	Detección y diagnóstico de fallas
MR	Magnetoreológico
OFDO	Observador óptimo con perturbaciones difusas
SMC	Controlador de modo deslizante
DO	Observador de perturbaciones
RK4	Runge-Kutta de cuarto orden
CFD	Detección de fallas en componentes
IFD	Detección de fallas en sensores
AFD	Detección de fallas en actuadores
PO	Observador proporcional
PIO	Observador proporcional integral
LPV	Lineales con parámetros variables
LMI	Desigualdad matricial lineal
LTI	Lineal e invariante en el tiempo
GDO	Observador dinámico generalizado

Capítulo 1

Introducción

Con el paso del tiempo los medios de transporte han facilitado las tareas de las personas, tanto para transportarse de un lugar a otro, como para transportar objetos a diferentes partes del mundo. Uno de los medios más usados son los automóviles, que ya son parte de la vida cotidiana de la mayoría de las personas. Un automóvil es un medio de transporte que tiene la capacidad de realizar una trayectoria, la cual tiene como fin dar al usuario un funcionamiento seguro y duradero. Para esto los fabricantes han aumentado la cantidad de sistemas de detección de fallas, diseñando sistemas más completos e integrados, de lo contrario provocaría pérdidas económicas, peligro para los usuarios, entre otras cosas.

Muchas personas asocian la seguridad con otros elementos, tales como cinturones, airbag o frenos, sin embargo, si una suspensión no cuenta con un buen funcionamiento o no se encuentra diseñada de manera correcta, las probabilidades de tener un accidente aumentan exponencialmente. Se debe a la magnitud y ubicación de la falla, ocasionando pérdida del confort hasta pérdida de la estabilidad del vehículo. Un ejemplo es una falla que genera una disminución en la fuerza de amortiguamiento, disminuye la dureza de la suspensión, afectando el confort; ocasionando un accidente durante un viaje.

La situación que se presenta, es que las variables: confort y estabilidad, son inversamente proporcionales, al aumentar el confort, se disminuye la estabilidad y viceversa. Es por esto que el vehículo ha ido evolucionando, desde su diseño mecánico hasta sus suspensiones. Una suspensión consta de una serie de dispositivos, que pueden variar de forma drástica entre una suspensión del tipo pasivo y del tipo activo, que tienen como fin, unir las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo.

Actualmente existe una creciente necesidad e interés en desarrollar sistemas de detección de fallas en suspensiones, y que sean capaces de continuar operando aún con la falla, o de parar el proceso antes de que se originen daños irreparables en el mismo.

Las fallas pueden regir a diferentes escenarios, que incluya daños en los amortiguadores o resorte, daño en la llanta, sobrecarga al vehículo, incluso daños a los pasajeros y aún cuando las fallas no lleven a un escenario desafortunado puede ser que afecte la vida de la suspensión. La posibilidad de reducir los daños al vehículo y a los pasajeros, representa una motivación para el desarrollo de sistemas de detección [Alcorta-García, 2002].

En este trabajo de tesis se desarrolla un sistema de detección de fallas con el fin de monitorear la suspensión, de tal forma que se pueda saber cuándo se presenta una falla, dicho análisis se visualiza con el diseño de un observador adaptable con el fin de detectar e identificar fallas en parámetros.

1.1. Planteamiento del problema

La principal característica de un sistema de suspensión de un cuarto de vehículo, es absorber las vibraciones ocasionadas por las irregularidades del terreno en el cual circula el vehículo, manteniendo los neumáticos en contacto con la superficie.

El comportamiento de una suspensión semiactiva, está gobernado por un modelo clásico de un cuarto de de automóvil, formado por un sistema masa-resorte y un amortiguador magnetoreológico (ver la Fig. 1.1).

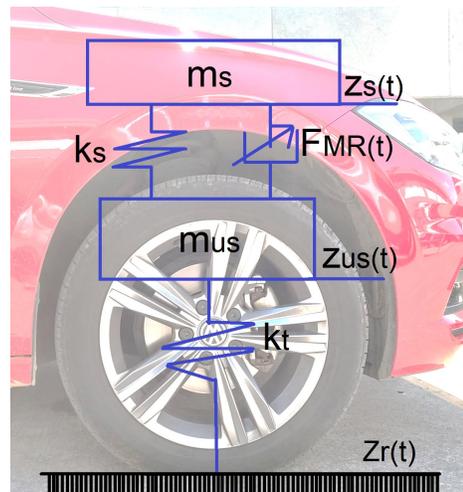


Figura 1.1: Diagrama de una suspensión semiactiva

El diagrama de una suspensión semiactiva, donde m_s es la masa suspendida (chasis), m_{us} es la masa no suspendida (neumático), k_t es la rigidez de la llanta, k_s es la rigidez de la suspensión, $F_{MR}(t)$ es la fuerza de amortiguamiento, $z_s(t)$ es la posición de la masa suspendida, $z_{us}(t)$ es la posición de la masa no suspendida, $z_r(t)$ es el perfil de suelo.

La fuerza de amortiguamiento de la suspensión semiactiva (etiquetada como $F_{MR}(t)$ en la Fig. (1.1), se utiliza para controlar las vibraciones en la masa suspendida (control de confort), y al mismo tiempo asegurar en todo momento el contacto entre la llanta y el camino (control de agarre de superficie).

Una suspensión en mal estado puede ocasionar que se provoquen daños considerables a un automóvil, además de afectar la comodidad de los pasajeros. En este tema de tesis se desarrolla una propuesta de instrumentación para detectar fallas en una suspensión, supervisando de manera continua el funcionamiento de la misma por medio de observadores adaptables.

Con el diseño un sistema de detección de fallas basado en observadores adaptables y una adecuada instrumentación para una suspensión de un automóvil, es posible mantener informado al usuario sobre las fallas que ocurren en el amortiguador de una suspensión para así garantizar el confort y la seguridad de los pasajeros.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un esquema de detección de fallas basado en observadores adaptables para la supervisión de una suspensión automotriz semiactiva con amortiguador magnetoreológico (MR).

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Estudio y simulación de modelos matemáticos de suspensiones semiactivas.
- b) Estudiar y seleccionar un escenario de fallas para una suspensión.
- c) Aplicar el observador adaptable para fines de detección de fallas en una suspensión.
- d) Proponer una instrumentación para la medición de variables de la suspensión.

1.3. Revisión del estado del arte

1.3.1. Detección de fallas en suspensiones

En [Frank, 1990], el autor revisa la técnica de detección y aislamiento de fallas en procesos automáticos utilizando redundancia analítica, y las principales técnicas de la generación residual basada en modelos utilizando métodos de identificación de parámetros y estimaciones de variables de estado, ofreciendo una solución al problema fundamental de la detección robusta de fallas, que permite desacoplar los efectos de las fallas entre sí y de los efectos de los errores de modelado.

En [Tudón-Martínez et al., 2016], los autores presentan un control no lineal para el ajuste de vibraciones en el vehículo debido a las perturbaciones externas. Y un compensador para las fallas aditivas en la fuerza de amortiguamiento.

En [Isermann, 1984], el autor presenta una descripción detallada de los métodos básicos para la detección de fallas, predicción de señales y para la estimación de parámetros de procesos.

En [Isermann, 2005], el autor nos muestra la importancia de la detección y diagnóstico de fallas en los procesos, los métodos de detección de fallas basados en modelos se desarrollaron utilizando señales de entrada y salida y aplicando modelos de procesos dinámicos. Definiendo la falla como una variante no permitida de una propiedad del sistema teniendo un comportamiento aceptable. Clasificándolas en fallas abruptas, intermitentes e incipientes como se puede apreciar en la Fig. 1.2.

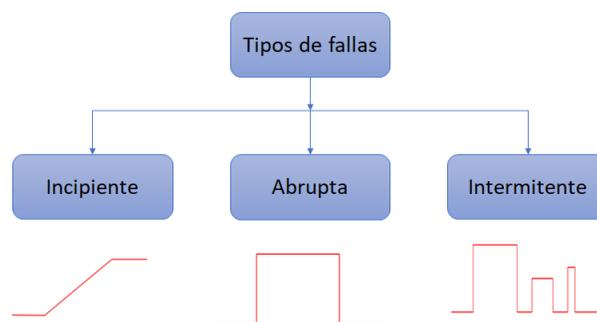


Figura 1.2: Tipos de fallas

En [Weispfenning and Isermann, 1997], los autores describen los principales componentes de una suspensión, así como los métodos para la detección y diagnóstico de fallas en ellos. Además, comentan que las ecuaciones de paridad son apropiadas para la detección de fallas en sensores, aunque no ofrecen la posibilidad de discernir entre ellas.

En [Zhu et al., 2014], los autores realizan un filtro de detección de fallas, el diseño está basado en la frecuencia media, tal que los sistemas residuales sean asintóticamente estables.

En [Hernández-Alcántara et al.,], los autores presentan los resultados de una revisión bibliográfica acerca de las fallas que ocurren en los amortiguadores. Concluyendo que en las suspensiones semiactivas, los amortiguadores son propensos a presentar fallas debido a fugas de fluido. Estas fallas se pueden modelar como vibraciones del coeficiente de fricción viscosa, que pueden ser vista como fallas multiplicativas. Además, incluyen un esquema FDD (Detección y Diagnóstico de Fallas) para la estimación de la falla en actuador basado en el análisis de la respuesta frecuencial.

En [Lozoya-Santos et al., 2012a] proponen un sistema de detección de fallas para monitorear el rendimiento del amortiguador, para eso estiman la frecuencia para la carretera basado en la deflexión de la suspensión. La propuesta controla la transmisibilidad de la suspensión en función de la frecuencia de la carretera, para mejorar la eficiencia del sistema de detección, realizan un cambio de dominio observable. Este interruptor identifica el dominio de transmisión más sensible mejorando la eficiencia de la propuesta. Las pruebas intensivas generadas al azar con menos del 36 % de error de detección promedio utilizando un amortiguador *MR* semiactivo valida la transmisibilidad como un buen indicador de la condición del amortiguador *MR*.

1.3.2. Observadores aplicados a suspensiones

Considerando un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI por sus siglas en inglés: Linear Time-Invariant)

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{1.1}$$

donde $x(t)$ es el vector de variables de estado, $u(t)$ es el vector de entradas, $y(t)$ es el vector de salidas. Las matrices A , B y C contienen los parámetros del sistema.

En [Luenberger, 1964], el autor presenta lo que hoy en día se conoce como observador Luenberger para la estimación de estados de un sistema lineal. Normalmente, se diseña mediante la técnica de colocación de polos. El modelo matemático del observador es básicamente el mismo de la planta, salvo que incluye un término adicional que contiene el error de estimación de la salida para compensar las imprecisiones en las matrices A y B y el error en estado inicial.

El error de estimación de la salida es la diferencia entre la salida medida y la salida estimada. El error inicial es la diferencia entre el estado inicial y el estado estimado inicial.

Definimos el modelo matemático del observador Luenberger para el sistema (1.1) como:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\tag{1.2}$$

donde $\hat{x}(t)$ es el vector de variables de estados estimados, $u(t)$ es el vector de entradas, $y(t)$ es el vector de salida y $\hat{y}(t)$ es el vector de salida estimada. Las matrices A , B y C contienen los parámetros del sistema.

L es la ganancia del observador.

En [Frank and Keller, 1980], definen al observador como un dispositivo que es capaz de reconstruir o estimar los estados y variables de interés de un proceso, a partir de mediciones físicas de las entradas $u(t)$ y salidas $y(t)$ de este mismo.

En [Hedrick et al., 1994], los autores diseñan observadores de estados para sistemas no lineales con el fin de mejorar la calidad de vida de una suspensión activa y suspensión semiactiva. El método propuesto garantiza la convergencia exponencial de las estimaciones, incluso ante la presencia de perturbaciones.

En [Chamseddine et al., 2006], los autores nos muestran la detección, identificación y la tolerancia de fallas en sensores para el sistema de suspensión activa de un vehículo lineal completo. El enfoque utiliza un banco de observadores de modo deslizante de orden reducido para generar residuos. Los residuos se definen de tal manera que aíslan el sensor defectuoso después de detectar la ocurrencia de la falla. Una vez detectado y aislado, la falla del sensor se soluciona reemplazando la medición defectuosa por su estimación. El objetivo del sistema de control es el de reducir el efecto de las irregularidades de la carretera sobre los pasajeros y para asegurar el sistema de seguridad durante las maniobras del vehículo.

En [Nguyenf et al., 2017], los autores nos muestran el diseño de un observador óptimo con perturbaciones difusas (OFDO) para suspensiones de vagones de tren semiactivos basados en amortiguador magneto-reológico, sometidos a incertidumbre y perturbación. Primero, se construyen las estructuras iniciales del controlador de modo deslizante (SMC) y el observador de perturbaciones (DO). Para el cual las leyes de actualización adaptativa para SMC y DO se configuran de forma asíncrona a través del análisis de estabilidad de Lyapunov con un mecanismo de restricción de parámetros usado.

En [Kim et al., 2018], los autores proponen un observador de orden reducido para un vehículo, que puede estimar el par transmitido de dos embragues y el eje de salida en la línea de conducción. El rendimiento de la estimación del observador, incluyendo su robustez a los errores de los parámetros, lo evalúan no solo mediante simulaciones sino también mediante experimentos bajo diferentes escenarios de conducción.

En [Mouyon and Didierjean, 1999], los autores comparan varios métodos de generación residual basados en observadores aplicados a la detección de fallas de un amortiguador no lineal. Por lo cual desarrollan un modelo físico no lineal para el sistema. Proponen un modelo de diagnóstico que depende de parámetros lineales y, por lo tanto, el procedimiento de diagnóstico se presenta como un problema de estimación de parámetros. Los observadores estatales también pueden usarse con un modelo de diagnóstico aumentado que incluye parámetros como estados nuevos. Sin embargo, mostramos que casi todos estos enfoques fallan debido a supuestos de observabilidad insatisfechos.

En [Sellami and Zanzouri, 2017], los autores proponen el diseño de un observador Luenberger para un sistema de suspensión activa, cuya idea principal es usar el observador mediante el modelo gráfico. Los resultados de la simulación se utilizan para mostrar el comportamiento dinámico de las variables del sistema y evaluar el rendimiento del observador para el diagnóstico de fallas.

En [Besançon, 2000], el autor nos muestra una solución al problema de la estimación de estado para sistemas con parámetros desconocidos que es usar alguna adaptación en línea de los parámetros del observador. Donde propone una forma de observador adaptativo unificadora, permitiendo estimar el parámetro desconocido.

Los autores [Ekramian et al., 2013] abordan el problema de la síntesis de observadores adaptativos para sistemas no lineales de Lipschitz. Cumpliendo con la condición de Lipschitz generalizada, garantiza la estabilidad de la dinámica del error del observador. Logrando estimar el parámetro desconocido y los estados del sistema.

1.3.3. Modelos de suspensiones

En [John, 2011], los autores muestran el modelo matemático de una suspensión pasiva, realizando un controlador de deslizamiento con el objetivo de reducir la distancia de frenado.

En [Varrier et al., 2013], los autores nos muestran un modelo matemático de una suspensión semi-activa, dando un enfoque basado en un cuarto del modelo del vehículo que incluye las no linealidades del amortiguador. El módulo de estimación de fallas se basa en el enfoque H_∞ que brinda robustez. Cuyo objetivo es estimar una falla en el sensor en el sistema, especialmente en los acelerómetros. La combinación de ambas estrategias permite atenuar el efecto de la falla en el sistema.

En [Alleyne and Hedrick, 1992], los autores presentan un modelo de una suspensión activa de un cuarto de vehículo, que actúa bajo los efectos de la fricción de Coulomb. En el cual diseñan una ley de control adaptable no lineal basado en el observador, comparando los resultados con un sistema pasivo como con un sistema que actúa bajo control lineal. Mostrando los resultados tanto teóricos como simulados.

En [Ezeta et al., 2013], los autores presentan los resultados de una revisión bibliográfica acerca del modelado y control de los sistemas de suspensión activa y semiactiva. Examinan los distintos enfoques, herramientas y aplicaciones en el contexto de la dinámica vehicular. Además, para el modelo de un cuarto de vehículo, ampliamente utilizado en la literatura, ofrecen su desarrollo mediante ecuaciones diferenciales, función de transferencia, y ecuaciones de estado.

En [Félix-Herrán et al., 2006], los autores desarrollan un modelo de un cuarto de vehículo, que contiene una suspensión semiactiva no lineal. Donde el elemento semiactivo lo representa un amortiguador magnetoreológico con características no lineales. Este trabajo integra las ecuaciones no lineales del amortiguador en el modelo de un cuarto de vehículo construyendo el modelo de suspensión semiactiva en Simulink. Se presentan pruebas de simulación para validar el modelo obtenido.

En este artículo [Martínez et al., 2009], los autores desarrollan un programa para la evaluación de un sistema de suspensión neumático semiactivo. Ahí pueden configurar sus parámetros como las condiciones iniciales asociadas al sistema, se permite escoger la perturbación de entrada. El usuario puede seleccionar, a través de la interfaz del programa, resolver el sistema mediante tres tipos de métodos numéricos, como son el Método de Euler, el Método de Heun y el Método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4), para observar no solo el comportamiento de las variables de salida del sistema sino también para comparar la exactitud y precisión de las diferentes soluciones dadas por cada método numérico empleado.

En [Spencer Jr et al., 1997], los autores desarrollan un algoritmo de control, donde se aprovecha al máximo las características del amortiguador magnetoreológico, donde se propone un nuevo modelo que puede representar eficazmente el comportamiento de un fenómeno magnetoreológico típico apagador.

En [Lozoya-Santos et al., 2012b], los autores nos explican ampliamente el comportamiento del amortiguador magnetoreológico, y a su vez evalúan bajo escenarios experimentales exhaustivos, generando así una base de datos completa.

En esta tesis [Calle-Chojeda, 2017], el autor diseña un sistema para el diagnóstico de fallas en los sensores de una suspensión semiactiva, por medio de observadores de entradas desconocidas, estimación paramétrica y redes neuronales, y así diagnosticar fugas del líquido magnetoreológico del amortiguador.

1.4. Aportación

A continuación, se presenta la lista de aportaciones obtenidas en desarrollo de este trabajo de tesis:

- Se obtuvo un modelo matemático en simulación que emula el comportamiento de una suspensión con fallas en la llanta y en el amortiguador.
- Se diseñaron dos observadores adaptables para la estimación de parámetros desconocidos en una suspensión semiactiva.
- Se diseñó un sistema de detección de fallas en una llanta y en el amortiguador, basado en los observadores adaptables diseñados.
- Se propuso un esquema de instrumentación para una suspensión con el fin de supervisar el estado de salud de la suspensión.

1.5. Alcances y limitaciones

En este trabajo se presentaron los alcances y limitaciones siguientes:

- Para este trabajo de tesis solo se consideran suspensiones de tipo semiactivas.
- Para el diseño del sistema de detección de fallas, se consideran al menos dos tipos de observadores.
- Se elabora una propuesta de instrumentación que consiste en la selección de los sensores adecuados para la detección de fallas y la ubicación de estos en el proceso.
- Las simulaciones se realizan en MATLAB R2017b.
- No se considera la implementación de los algoritmos desarrollados en prototipos.

1.6. Originalidad

La originalidad de este trabajo se puede ver reflejada en el uso del modelo de una suspensión semiactiva, para la estimación de un parámetro, se diseña un sistema adaptable para así abordar el diseño de dos observadores adaptables. El primero es un observador adaptable de orden completo para estimar el parámetro k_t y el segundo es un observador adaptable para sistemas no lineales Lipschitz para estimar el parámetro k_t y las variables del sistema.

En este trabajo se propone una instrumentación para la detección de fallas en suspensiones, supervisado por medio de observadores adaptables.

1.7. Organización del documento

Los siguientes capítulos se encuentran organizados de la siguiente manera

En el **Capítulo 2** se presentan conceptos fundamentales como suspensión y sus tipos, observadores, fallas y tipos.

En el **Capítulo 3** se desarrolla el modelo adaptable de una suspensión semiactiva, también se simula el modelo y se compara con los resultados de otro artículo, se diseñan los observadores adaptables para la estimación de parámetro y estados.

En el **Capítulo 4** se presenta la descripción de una situación real o hipotética, en donde se parte para obtener los resultados, se presenta la problemática y la solución de problemas.

En el **Capítulo 5** se presenta la propuesta de instrumentación para la detección de fallas.

En el **Capítulo 6** se dan a conocer las conclusiones y contribuciones.

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se proporciona el marco teórico sobre los sistemas de suspensión automotriz que son el caso de estudio de esta tesis. En la sección 2.1 Se presentan las partes que componen una suspensión, así como los tipos de suspensiones que existen y su modelado matemático. En la sección 2.2 se aborda el marco teórico acerca de la detección de fallas, los tipos de fallas y su clasificación dependiendo de la ubicación en que ésta se presente. En la sección 2.3 se presentan las generalidades de los observadores de estado, los cuales son utilizados para el diseño de los sistemas de detección de fallas y estimación de parámetros.

2.1. Sistemas de suspensión

Los sistemas de suspensión vehicular se clasifican de acuerdo al tipo de actuador (amortiguador) [Ezeta et al., 2013]:

- a) La suspensión pasiva cuenta con parámetros predeterminados y no es regulable automáticamente.
- b) La suspensión activa utiliza un actuador que por medio de energía modifica la respuesta del sistema ante distintas perturbaciones del terreno.
- c) La suspensión semiactiva que regula la rigidez del amortiguador por medio de la corriente entrante.

2.1.1. Antecedentes

La suspensión de un vehículo absorbe principalmente las deformidades del terreno sobre el que se desplaza, manteniendo las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando un nivel adecuado de confort y seguridad.

Los automóviles de finales del siglo XIX eran básicamente carruajes de caballos. Sus velocidades eran muy reducidas y no necesitaban suspensión. Hasta 1898 las primeras suspensiones eran simples ballestas, contaban con cualidades elásticas con cierto poder amortiguante.

Sin embargo, los fabricantes rápidamente advirtieron que debían diseñar nuevos sistemas. Las ballestas servían para las bajas velocidades que alcanzaban los carruajes, no así para los nuevos vehículos. El mal funcionamiento del sistema de suspensión provocó numerosos accidentes. Al mismo tiempo se tuvo la necesidad de amortiguar el movimiento oscilatorio que creaban las ballestas. Fue en 1899 basándose en un invento para bicicletas que los fabricantes comenzaron a instalar los primeros amortiguadores (Fig. 2.1) que consistían en dos simples brazos unidos mediante un tornillo con un disco de fricción entre ellos, ajustando su resistencia, ya sea, apretando o aflojando el tornillo [Alberdi, 2004].

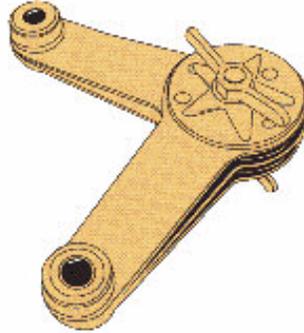


Figura 2.1: Diseño del primer amortiguador

Fue en el año 1901, cuando en Alemania se presentó el primer vehículo de la historia con amortiguadores del fabricante Mors. De forma tradicional, los automóviles utilizan como parte de su sistema de suspensión componentes pasivos, elementos con propiedades estáticas donde la causal de cambio, está limitada al desgaste de los componentes a través del tiempo. Debido a lo anterior, el factor de amortiguamiento de las suspensiones pasivas, está restringido a cumplir con el índice de desempeño para el que se diseñó, y mejorar el confort del pasajero o la estabilidad del vehículo.

La siguiente evolución se produciría en el año 1920, cuando Leyland utilizaría barras de torsión en una suspensión semi-independiente. Sería en el año 1922, cuando el fabricante Lancia lanzaría la primera suspensión independiente de la historia, que empezaría a ser el tipo más usado para el eje delantero. A partir de 1932, se produciría una gran evolución en cuanto a sistemas, y componentes que todavía se encuentra vigentes en nuestros días, pasando desde la suspensión semiactiva hasta la máxima expresión, en forma de suspensiones activas de las que más adelante se profundizará. A mediados del siglo pasado, se empezó a trabajar con fluidos que podían cambiar sus propiedades físicas, al ser expuestos a corrientes eléctricas o a campos magnéticos; a estos materiales se les dio el nombre de fluidos reológicos [Villarreal-González, 2005].

Después de mantenerse durante décadas como una curiosidad de laboratorio, a finales de los ochentas, se empezaron a desarrollar aplicaciones con estos fluidos, hasta llegar a ser aplicados en suspensiones automotrices, en las llamadas suspensiones inteligentes.

Hoy en día, existen amortiguadores que contienen fluidos reológicos y que pueden cambiar su coeficiente de amortiguamiento en cuestión de milisegundos, al exponerse a una fuerza eléctrica o magnética. Los amortiguadores que se controlan mediante un campo eléctrico son llamados electroreológicos [Chung and Shin, 2004] y aquellos que se manipulan por medio de un campo magnético son nombrados magnetoreológicos [Carlson et al., 1996], los amortiguadores reológicos forman parte de las suspensiones semiactivas que conservan elementos pasivos e incorporan un elemento activo, un amortiguador cuyo coeficiente de amortiguamiento se puede manipular en tiempo real [Spencer Jr et al., 1997].

La **suspensión de un automóvil** Fig. 2.2 es un conjunto de elementos que absorben los efectos de las irregularidades del terreno para aumentar la comodidad y el control del vehículo.



Figura 2.2: Esquema clásico de una suspensión de un automóvil [Savaresi et al., 2010]

Una suspensión es el conjunto de elementos mecánicos del automóvil que tienen como objetivo asegurar el contacto del neumático con el terreno, proporcionando estabilidad en la marcha del vehículo, al mismo tiempo brindar un mejor confort al usuario y a su vez mejorar el funcionamiento de la dirección.

Las principales tareas que una suspensión debe cumplir son: elasticidad que evita que las desigualdades del terreno se transmitan al vehículo en forma de golpes secos y amortiguamiento que impide un excesivo balanceo. El sistema de suspensión enlaza la masa suspendida con la masa no suspendida por medio de una unión elástica, que no solamente amortiguan los golpes que las ruedas transmiten al bastidor, sino también los que el mismo peso del vehículo devuelve a las ruedas a causa de la reacción.

Cuando una rueda encuentra un obstáculo, la masa no suspendida se eleva y el muelle se comprime almacenando la energía del impacto. Seguidamente, el muelle se extiende empujando por un lado a la rueda contra el suelo y por el otro a la carrocería, que se eleva. Este proceso se repite después de una serie de compresiones y extensiones del muelle cada vez más amortiguadas. Al no haber suspensión, los movimientos de las ruedas se transmitirán directamente al chasis y a la carrocería, produciendo golpes violentos que perjudicarán tanto al automóvil como a los pasajeros.

Cuando el vehículo circula por un terreno irregular, las ruedas están sometidas a una serie de impactos que se transmiten a la carrocería a través de los elementos de la suspensión, produciendo un golpeteo, que viaja por medio de los ejes al chasis, provocando las oscilaciones y una mala conducción. Una suspensión es un sistema importante en el vehículo que afecta principalmente a todo su comportamiento dinámico [Savaresi et al., 2010].

Los tres tipos de oscilaciones (perfil de suelo) existentes son:

- a) **Empuje (push):** se produce al pasar por terreno ondulado.
- b) **Cabeceo (pitching):** cuando se frena de manera brusca.
- c) **Bamboleo (roll):** se genera al tomar curvas a altas velocidades.

Elementos básicos de una suspensión.

- a) **Ballesta:** está compuesta por una serie de hojas de acero de diferentes longitudes unidas por un tornillo en el centro y unas abrazaderas que permiten que las láminas se deslicen al cargar un peso sobre ellas, formando un conjunto elástico de gran resistencia a la rotura. Se utiliza en vehículos pesados (camiones, remolques, vehículos 4 x 4, etc.) Fig. 2.3.



Figura 2.3: Ballesta

- b) **Muelles helicoidales:** estos elementos mecánicos se utilizan en sustitución de las ballestas, pues tienen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda debido al gran recorrido del resorte. Está formado de un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado con hilo de diámetro entre 10 a 15 mm, este diámetro varía en función de la carga que tienen que soportar; las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo. Una de sus desventajas es que no puede transmitir esfuerzos laterales, trabajan a torsión, retorciéndose proporcionalmente al esfuerzo que tienen que soportar, limitando su longitud y volviendo a su posición de reposo cuando cesa el efecto que produce la deformación Fig. 2.4.



Figura 2.4: Muelles

- c) **Barra de torsión:** es una varilla de acero elástico, va fijada por un extremo al chasis y por el otro al brazo oscilante de la rueda, de manera que, los movimientos de ésta implican una torsión de la barra que se opone a ellos. Las barras de torsión pueden ir en posición longitudinal o transversal a la marcha del vehículo. El peso del vehículo aplica una torsión inicial a la barra que proporciona el efecto muelle deseado. Es un dispositivo de ajuste de la altura del chasis del vehículo con respecto al suelo que permite la corrección de la misma por variación del posicionamiento de la barra de torsión mediante reajustes Fig. 2.5.



Figura 2.5: Barra de torsión

- d) **Rótula:** las rótulas constituyen un elemento de unión y fijación de la suspensión, que permite su pivotamiento y giro manteniendo la geometría de las ruedas. La fijación de las rótulas se realiza mediante tornillos o roscados exteriores o interiores. La rótula es la encargada de toda la dirección, y la encargada de que se mueva el amortiguador; cuando esta falla genera un desgaste ocasionando el desnivel de los amortiguadores Fig. 2.6.



Figura 2.6: Rótula

- e) **Amortiguador:** su función principal es proporcionar una resistencia controlada; cada vez que la rueda se vea afectada por un perfil del suelo, se encarga de recoger las oscilaciones de los muelles y transformarlas en rozamientos, evitando así las oscilaciones. Los amortiguadores pueden ser fijos y regulables, los primeros tienen siempre la misma dureza y los segundos pueden variar dentro de unos márgenes. Su funcionamiento consiste en un pistón que se desliza en un cilindro. El pistón sigue los movimientos alternativos de subida y bajada de la rueda, resultando una amortiguación más dura cuanto más difícil sea el paso de aceite entre ambas cámaras Fig. 2.7. Marcas conocidas de fabricantes de amortiguadores son: Monroe, Koni, Bilstein, Kayaba, De Carbón, etc.

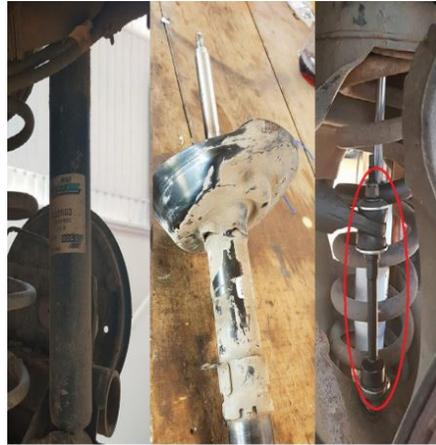


Figura 2.7: Amortiguador

- f) **Barra estabilizadora:** está formada por una barra de acero elástico, ya que trabaja a torsión y su misión consiste en compensar los esfuerzos de una rueda sobre la otra del mismo eje, entra en funcionamiento cuando un vehículo toma una curva, uno de los lados recibe más peso que el otro y trata de aproximarse a la rueda; la barra se torsiona por este peso y ese mismo esfuerzo se transmite al otro brazo, tratando de mantener ambos lados de la carrocería a la misma distancia de las ruedas, con lo que se disminuye la inclinación al tomar las curvas. Por la acción y la fuerza ejercida se carga el peso del vehículo sobre las ruedas exteriores, por consecuencia la carrocería tiende a inclinarse hacia ese lado ocasionando peligro de vuelco y molestia al usuario. Su montaje en el vehículo depende del tipo de suspensión y de las necesidades del usuario, aunque puede ir tanto en el eje delantero como en el trasero, su instalación es algo costosa Fig. 2.8.



Figura 2.8: Barra estabilizadora

En resumen, los principales objetivos de una suspensión son:

1. Aislar el chasis de las perturbaciones del camino.
2. Mantener el contacto de la llanta con el camino para proporcionar una adecuada maniobrabilidad.

2.1.2. Clasificación de tipos de suspensión

Existen básicamente tres tipos de suspensiones: las suspensiones pasivas, las activas y las semi-activas. En las siguientes secciones se describen las principales características de cada una de ellas.

2.1.2.1. Suspensión pasiva

Una suspensión pasiva tiene parámetros predeterminados y no es regulable automáticamente. Estas suspensiones no permiten la variación de su comportamiento con el vehículo en movimiento. En otras palabras, el comportamiento dinámico de una suspensión pasiva es siempre el mismo, ya que en condiciones normales de operación los parámetros son constantes. La suspensión pasiva Fig. 2.9 es el sistema tradicionalmente usado en la mayoría de los vehículos automóviles. Una característica principal es que, una vez que está instalada al vehículo, los parámetros de la suspensión (resistencia, altura, viscosidad, etc.) no se pueden variar por métodos externos. Algunos modelos de autos con suspensión pasiva son: Beetle, Gol, Tsuru, March, Figo, Sedan, entre otros.

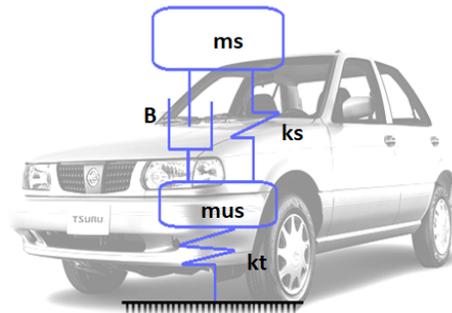


Figura 2.9: Esquema suspensión pasiva de un cuarto de vehículo.

El modelo de una suspensión pasiva es el siguiente [Hassan, 1986]:

$$\begin{aligned} m_{us}\ddot{x}_1(t) &= -k_s[x_1(t) - x_2(t)] - B[\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)] + k_t[x_0(t) - x_1(t)] \\ m_s\ddot{x}_2(t) &= k_s[x_1(t) - x_2(t)] + B[\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)] \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde m_{us} es la masa de la llanta, m_s es la masa del chasis, $x_1(t)$, $\dot{x}_1(t)$ y $\ddot{x}_1(t)$ son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración vertical de la llanta. Por otro lado, $x_2(t)$, $\dot{x}_2(t)$ y $\ddot{x}_2(t)$ son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración vertical del chasis. $x_0(t)$ es el perfil de suelo y B es el coeficiente del amortiguador. k_s y k_t son la constante de rigidez del resorte y la constante de rigidez de la llanta, respectivamente.

A diferencia de las suspensiones activas y semiactivas, una suspensión pasiva no recibe la aplicación de una energía externa. En las suspensiones pasivas se almacena la energía mediante resortes y la disipación

la realiza el amortiguador. Uno de los principales problemas de las suspensiones pasivas es la falta de confort o maniobrabilidad cuando se modifica la rigidez de amortiguamiento. Otro problema es cuando aumenta la carga estática, pudiéndose ocasionar daños en la suspensión [Sharp and Hassan, 1986].

2.1.2.2. Suspensión activa

La suspensión activa surge como respuesta a la exigencia de una mayor respuesta del mecanismo de suspensión respecto al estado de la calzada, velocidad y comportamiento de conducción entre otros, para ello, recurre a una regulación continua y de forma independiente en cada rueda. Además, con los actuadores que se introducen en el sistema, se consigue eliminar los efectos de balanceo y cabeceo en el vehículo.

Los sistemas de suspensiones activos son **inteligentes** ya que emplean elementos controlables como los amortiguadores que actúan como actuadores. Estos elementos son controlados para cumplir los objetivos de control previamente mencionados. En este tipo de suspensiones es añadida energía externa al sistema de suspensión, por lo cual se llama “activa”.

El primer vehículo sobre el que se desarrolló este tipo de suspensión fue el Fórmula 1 del equipo Lotus a principios de los años 80, viviéndose su máximo esplendor a finales de los 80 y principio de los 90.

Una suspensión activa almacena, disipa e introduce energía al sistema por medio de actuadores, cuyo accionar es regulado a través de sensores y controladores. Los sensores se emplean para registrar el comportamiento del vehículo ante las perturbaciones y así definir la respuesta de acuerdo al objetivo de control. El sistema de la suspensión activa dispone de un ordenador que manda una señal a un actuador, que ordena a la rueda que se mueva de modo apto para las circunstancias que van surgiendo en el camino. Algunos modelos de autos con suspensión activa son: Tesla, BMW, Mercedes-Benz, entre otros.

En la actualidad, únicamente la marca BOSE ha desarrollado una suspensión de este tipo, aunque no ha pasado de un prototipo y aún no ha llegado a generalizarse. En la Fig. 2.10 se observa el modelo de un cuarto de vehículo de una suspensión activa.

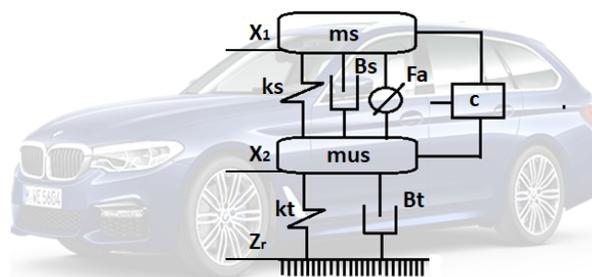


Figura 2.10: Esquema suspensión activa para un cuarto de vehículo

La ventaja de este sistema de suspensión es que permite un mejor alcance de los objetivos de control, pero su principal desventaja es el precio, ya que es muy costosa a comparación de los demás sistemas de suspensiones.

Utilizando el diagrama de la Fig. 2.10 el modelo propuesto por [Ezeta et al., 2013] del sistema de suspensión activa es el siguiente:

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x}_1(t) &= F_a(t) - B_s(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) - k_s(x_1(t) - x_2(t)) \\ m_{us} \ddot{x}_2(t) &= -F_a(t) + B_s(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + k_s(x_1(t) - x_2(t)) - B_t(\dot{x}_2(t) - \dot{z}_r(t)) - k_t(x_2(t) - z_r(t)) \end{aligned} \quad (2.2)$$

donde m_s es la masa del chasis, m_{us} es la masa de la llanta, $x_1(t)$, $\dot{x}_1(t)$ y $\ddot{x}_1(t)$ son el desplazamiento, velocidad y aceleración vertical del chasis. Por otro lado $x_2(t)$, $\dot{x}_2(t)$ y $\ddot{x}_2(t)$ son el desplazamiento, velocidad y aceleración vertical de la llanta, $z_r(t)$ es el perfil de suelo, $F_a(t)$ es la fuerza del actuador, k_s es la rigidez de la suspensión, k_t es la rigidez de la llanta, B_s es el amortiguador de la suspensión y B_t es el amortiguador de la llanta.

2.1.2.3. Suspensión semiactiva

Son sistemas retroalimentados en el cual el actuador es limitado para proveer energía de disipación, en estas suspensiones la energía inyectada en el sistema solo es la necesaria para manejar el elemento electrónico controlado.

Esta suspensión controla las frecuencias bajas con elementos activos y las frecuencias altas con elementos pasivos. Suelen recurrir a sistemas regulados que permiten la variación de los mecanismos de suspensión y amortiguación, de modo que se puedan obtener dos suspensiones en una; en caso de grandes irregularidades en el terreno actúa la suspensión blanda, y cambiándose a una configuración más rígida, en el caso de toma de curvas o virajes fuertes. Algunos modelos de autos con suspensión semiactiva son: Peugeot 307, Renault Laguna, Cadillac Seville, Volvo s60, entre otros

Características de la suspensión semiactiva:

- **Poca demanda de energía:** solo son requeridos unos cuantos watts para modificar los orificios hidráulicos o la viscosidad del fluido.
- **Seguridad:** en este tipo de suspensiones la estabilidad del vehículo esta siempre garantizada debido a que todo el sistema es disipativo.
- **Bajo costo, bajo peso:** las principales tecnologías de modulación del amortiguamiento (electrohidráulica, magnetoreológica, electroreológica, amortiguamiento por aire) pueden ser producidos en masa, en otras palabras, a grandes cantidades aminorando el costo de la producción.
- **Impacto significativo en el desempeño del vehículo:** debido al cambio en el radio de amortiguamiento se pueden modificar los objetivos de la suspensión el confort y el manejo.

Su disposición es muy similar a la de una suspensión del tipo pasivo; sin embargo, se sustituyen los amortiguadores convencionales por amortiguadores modulables, y además se añaden una serie de componentes electrónicos, encargados de dar la información necesaria a la central del sistema, para que esta elija la configuración óptima de suspensión.

Se han desarrollado amortiguadores que se pueden manipular en línea, y de una forma relativamente sencilla, con el fin de obtener un control que mejore el confort y la estabilidad obtenida con elementos

convencionales. Los amortiguadores magnetoreológicos, tienen propiedades que les permiten cambiar su factor de amortiguamiento en pequeños períodos de tiempo; sin embargo, están gobernados por una naturaleza no lineal, y para obtener un buen modelo, se requiere conocer los comportamientos no lineales de estos elementos.

En la Fig. 2.11 se observa el modelo de un cuarto de vehículo de una suspensión semiactiva.

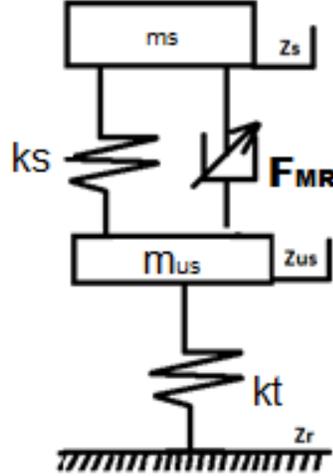


Figura 2.11: Diagrama de cuerpo libre de una suspensión semiactiva

Partiendo de la Fig. 2.11 se obtienen las siguientes ecuaciones [Tudón-Martínez et al., 2016]:

$$m_s \ddot{z}_s(t) = -k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - F_{MR}(t); \quad (2.3)$$

$$m_{us} \ddot{z}_{us}(t) = k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - k_t(z_{us}(t) - z_r(t)) + F_{MR}(t). \quad (2.4)$$

donde k_s y k_t son los coeficientes de la suspensión y la rigidez de la rueda linealizados. $F_{MR}(t)$ es la fuerza de amortiguamiento, m_s y m_{us} son la masa suspendida y no suspendida, $z_s(t)$ y $z_{us}(t)$ son el desplazamiento vertical del chasis (masa suspendida) y de la rueda y, $z_r(t)$ es el perfil de suelo.

Considerando la dinámica no lineal de un amortiguador magnetoreológico ($F_{MR}(t)$):

$$F_{MR}(t) = I(t)f_c\rho(t) + b_1\dot{z}_{def}(t) + b_2z_{def}(t) + F_\delta(t), \quad (2.5)$$

donde $F_\delta(t)$ representa una falla aditiva en la fuerza de amortiguamiento, $I(t)$ es la corriente eléctrica, f_c es la fuerza dinámica en el amortiguador (MR), b_1 y b_2 son los parámetros en zona post-esfuerzo de $F_{MR}(t)$, $\rho(t)$ es la parte no lineal que representa la histéresis de la fuerza proporcionada por el amortiguador magnetoreológico

$$\rho(t) = \tanh(a_1\dot{z}_{def}(t) + a_2z_{def}(t)). \quad (2.6)$$

donde a_1 y a_2 son los parámetros en zona pre-esfuerzo de $F_{MR}(t)$ [Tudón-Martínez et al., 2016].

Sustituyendo la Ec. (2.5) en el sistema conformado por las Ecs. (2.3),(2.4) y considerando $z_{def}(t) = z_s(t) - z_{us}(t)$ además $\dot{z}_{def}(t) = \dot{z}_s(t) - \dot{z}_{us}(t)$, se obtiene el siguiente modelo:

$$m_s \ddot{z}_s(t) = -k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - I(t)f_c\rho(t) - b_1\dot{z}_{def}(t) - b_2z_{def}(t) - F_\delta(t) \quad (2.7)$$

$$m_{us}\ddot{z}_{us}(t) = k_s(z_s(t) - z_{us}(t)) - k_t(z_{us}(t) - z_r(t)) + I(t)f_c\rho(t) + b_1\dot{z}_{def}(t) + b_2z_{def}(t) + F_\delta(t) \quad (2.8)$$

Se realiza el siguiente cambio de variable.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \dot{z}_s(t) = \dot{x}_2(t) & x_3 &= \dot{z}_{us}(t) = \dot{x}_4(t) \\ \dot{x}_1(t) &= \ddot{z}_s(t) & \dot{x}_3(t) &= \ddot{z}_{us}(t) \\ x_2(t) &= z_s(t) & x_4(t) &= z_{us}(t) \end{aligned}$$

pudiendo reescribir las Ecs. (2.7) y (2.8) como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{b_1}{m_s}x_1(t) - \frac{b_2 + k_s}{m_s}x_2(t) + \frac{b_1}{m_s}x_3(t) + \frac{b_2 + k_s}{m_s}x_4(t) - \frac{f_c\rho(t)}{m_s}I(t) - \frac{1}{m_s}F_\delta(t) \\ \dot{x}_2(t) &= x_1(t) \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{b_1}{m_{us}}x_1(t) + \frac{b_2 + k_s}{m_{us}}x_2(t) - \frac{b_1}{m_{us}}x_3(t) - \frac{b_2 + k_s + k_t}{m_{us}}x_4(t) + \frac{f_c\rho(t)}{m_{us}}I(t) + \frac{1}{m_{us}}F_\delta(t) + \frac{k_t}{m_{us}}z_r(t) \\ \dot{x}_4(t) &= x_3(t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} y_1(t) &= x_1(t) \\ y_2(t) &= x_3(t) \\ y_3(t) &= x_2 - x_4(t) = z_{def}(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

donde las salidas son: las velocidades y la posición del amortiguador que se obtiene al calcular la diferencia de las posiciones. A partir del modelo, se propone hacer la detección de fallas en la suspensión, usando un enfoque no lineal. La detección de fallas se hará con un observador adaptable; se propone hacer un esquema de instrumentación en la suspensión, que sea capaz de hacer la evaluación de los parámetros, para llevar a cabo la detección de fallas en la suspensión semiactiva de un automóvil. El algoritmo propuesto se evaluará en simulación.

Amortiguadores magnetoreológicos

Los amortiguadores se encargan de eliminar dichas oscilaciones, transformando en calor la energía transmitida a los resortes.

La reología es la ciencia que estudia la deformación de sustancias bajo el efecto de fuerzas. Esta se limita normalmente a materiales que no obedecen a la Ley de viscosidad de Newton y a la Ley de Hooke. Los amortiguadores de fluido viscoso se basan en las propiedades constantes del fluido, que incorporan para contrarrestar las vibraciones, con la desventaja de que el coeficiente de amortiguamiento y el valor de la fuerza generada son constantes; ya que dependen de esas propiedades invariables.

En consecuencia a esto, surgen los amortiguadores magnetoreológicos, está compuesto por aceite y partículas sensibles a los campos magnéticos (partículas de hierro), es un dispositivo en cuyo interior circula un fluido magnetoreológico, capaz de cambiar sus propiedades mediante un estímulo magnético que adapta la viscosidad del fluido a los requerimientos que el sistema necesite para el control de vibraciones; los magnetoreológicos tienen la ventaja de que pueden funcionar a mayor temperatura y presión; cuando no existe ningún campo magnético el fluido (MR) se comporta como líquido, y cuando se le aplica un campo magnético las partículas del fluido (MR) forman cadenas, variando así la viscosidad del fluido. [Cúpich-Rodríguez and Elizondo-Garza, 1998].

Un ejemplo de un amortiguador magnetoreológico es el “MagneRide” Fig. 2.12, es un sistema semiactivo de control de suspensión en el cual responde en tiempo real a las condiciones de la carretera y la conducción, basándose en la información de sensores que vigilan los movimientos del chasis y las ruedas. El sistema usa fluidos magnetoreológicos (MR) para proporcionar una alta capacidad de control de amortiguación con incomparable sensibilidad. Está compuesto por amortiguadores que contienen fluido magnetoreológico, bobinas electromagnéticas, sensores que detectan tanto el desplazamiento de la suspensión como la aceleración. Uno de los automóviles que utilizan estas suspensiones son: Cadillac SRX, Audi TT y R8, Ferrari 599 GTB, Peugeot, Ford (Mustang), Lamborghini. Un ejemplo de un MagneRide puede verse en el Anexo A.6.1.



Figura 2.12: Amortiguador MagneRide

2.2. Concepto de falla

Una **falla** consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema, con respecto a las condiciones usuales y estándar de operación. Es considerada como un tipo de mal funcionamiento en un sistema. Describe de manera precisa, que el sistema no cumple su función. Una avería, corresponde a la interrupción permanente de la capacidad del sistema, para cumplir una función requerida en condiciones específicas. Una disfunción se denota cuando el sistema es incapaz, de cumplir con alguna de las funciones para las que fue diseñado de manera intermitente. Una falla puede representarse como una entrada extra actuando sobre el sistema (falla aditiva) o como un cambio en los parámetros de la planta (fallas multiplicativas) [Gertler, 2013].

2.2.1. Tipos de fallas

- **Falla abrupta:** La falla se manifiesta con un cambio repentino y puede ser modelada mediante una función tipo escalón donde se desconoce el tiempo de ocurrencia.

- **Falla incipiente:** Esta falla se manifiesta como un cambio en magnitud en las variables del sistema que va aumentando paulatinamente con respecto al tiempo y puede modelarse mediante una función tipo rampa con un tiempo de ocurrencia desconocido. Ejemplo de estas fallas son las que producen un deterioro paulatino en el proceso a través del tiempo, como es el desgaste de una válvula y un filtro tapado.
- **Falla intermitente:** Este tipo de falla se considera que no tiene una evolución determinada en el tiempo y frecuentemente se presenta solamente en ciclos de trabajo de manera aleatoria y desaparece también de la misma forma [Verde et al., 2012].

2.2.2. Clasificación de fallas

- **Falla en componentes** (CFD por sus siglas en inglés: Components Fault Detection). Este tipo de fallas cambian las propiedades de las entradas y salidas del sistema.
- **Falla en sensores** (IFD por sus siglas en inglés: Instrument Fault Detection). Las propiedades de la planta no son afectadas, pero las lecturas del sensor tienen errores importantes.
- **Falla en actuadores** (AFD por sus siglas en inglés: Actuator Fault Detection) Las propiedades de la planta no son afectadas, pero la influencia del controlador en la planta se interrumpe o modifica [Blanke et al., 2006].

2.2.3. Detección de fallas

- **Redundancia física:** El enfoque tradicional de diagnóstico de fallas, hablando en un contexto amplio, se basa en métodos de redundancia física o de hardware, los cuales emplean múltiples sensores, actuadores, componentes de medición y control de una variable en particular. El mayor problema de este método es el costo de mantenimiento y del equipo adicional, así como el espacio requerido para dichos instrumentos.
- **Redundancia analítica:** Este esquema se basa en la diferencia generada por la comparación de valores disímiles medidos; esta diferencia se llama señal residual. La mayor ventaja de un enfoque basado en modelos es que no requiere hardware adicional para realizar la detección de fallas y puede implementarse vía software, en un proceso controlado por computadora [Flores-Montiel, 2012].

2.2.4. Fallas comunes en suspensiones

- **Suspensión blanda:** ocasionada por la pérdida de flexibilidad en las ballestas, muelles, barras de torsión, etc., lo que es producido con el paso del tiempo y debido a las cargas que tienen que soportar constantemente. Se manifiesta también en que la altura de la carrocería al suelo disminuye. La reparación en este caso consiste en cambiar el elemento defectuoso.
- **Suspensión dura:** ocasionada por el agarrotamiento parcial de una ballesta, amortiguador, eje de articulación de suspensión, etc., en cuyo caso deberá desmontarse el elemento defectuoso y proceder a su limpieza y reparación o sustitución si es preciso.

- **Suspensión ruidosa:** ocasionada por la rotura de alguna hoja de ballesta, muelle o barra de torsión, en cuyo caso es necesario cambiarlos. También pueden provenir los ruidos de los amortiguadores, sus casquillos elásticos o los brazos oscilantes, barra estabilizadora y, en general, de cualquier articulación elástica del sistema. En cualquier caso, será necesario localizar el ruido y cambiar la pieza defectuosa. Siempre que se observe cualquier casquillo deteriorado deberá cambiarse, aunque no sea la causante del ruido.

- **Desgastes de las rótulas:** ocasionado por la terminal de dirección, base del amortiguador, cubre polvo de la cremallera, etc. Los amortiguadores: se dañan por uso, un ejemplo: al pasar un hueco recibe el impacto, la fuerza que oprime unos sellos se revientan, ocasionando una fuga de aceite o gas a presión, y el amortiguador necesitará ser reemplazado, otra falla sería por la fricción; las altas presiones y temperaturas pueden gastar un amortiguador. Por lo regular se sabe que falla un amortiguador porque al pasar por un desnivel se empieza a escuchar un golpeteo.

- **Resorte:** por el uso, al manejar llega a desgastar el resorte o al pasar un hueco llegar a sobrepasar el punto de elasticidad del resorte, ocasionando su rotura.

- **El eje direccional no mantiene la dirección del vehículo:** es decir, el vehículo tiende a desviarse hacia uno u otro lado, causa: al pasar un tope, vibradores o un bache a alta velocidad, la suspensión recibió un fuerte golpe, la solución reemplazar los elementos tensores dañados.

- **Vibración excesiva del volante de dirección:** cuando se circula a velocidades altas en carreteras, principalmente en los vehículos de carga, causado por la carencia de barra estabilizadora; o se encuentra dañada al ser golpeado por un objeto que había en el camino.

2.3. Observadores

Es un sistema dinámico que es capaz de reconstruir o estimar los estados y/o variables de interés de un proceso, a partir de mediciones físicas de las entradas u y salidas y de este mismo.

Desde los años ochenta los problemas de detección de fallas se abordan apoyándose en el diseño de observadores, en sus dos versiones de tiempo continuo y discreto [Frank and Keller, 1980].

Los observadores pueden ser clasificados por orden:

- **Orden completo:** el observador estima todas las variables del sistema, sin importar si algunas están disponibles para una medición directa.

- **Orden reducido:** el observador estima menos de n variables de estado, en donde n es la dimensión del vector de estado.

- **Orden mínimo:** es un observador de orden reducido con el mínimo orden posible, es decir, si n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión de salidas, el observador de orden mínimo observa $n - m$ variables.

2.3.1. Observadores para sistemas lineales

Considerando un sistema lineal e invariante en el tiempo (LTI por sus siglas en inglés: Linear Time-Invariant)

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Para que el sistema de la Ec. (2.11) sea observable, su matriz de observabilidad debe tener rango n . La matriz de observabilidad para sistemas LTI está definida como:

$$S_o = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

El observador debe ser diseñado tal que la estimación del estado se garantiza converge al valor del estado actual:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (2.13)$$

cuya dinámica está dada por:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (2.14)$$

para el siguiente observador de estados:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (2.15)$$

de forma que la ecuación (2.14) puede ser expresada como:

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (2.16)$$

Finalmente, el objetivo es encontrar una matriz L tal que la dinámica del error sea estable.

Los eigenvalores de $(A - LC)$ pueden ser arbitrariamente asignados cuando el sistema es observable.

2.3.2. Observadores para sistemas no lineales

Dado un sistema no lineal, un observador es un sistema cuya tarea es la estimación del estado. Las entradas del observador son las entradas y las salidas del sistema dado. Este observador funciona tanto para sistemas autónomos como para sistemas no lineales que son observables para cualquier entrada [Gauthier et al., 1992]. Tomando en cuenta el siguiente sistema no lineal

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ y(t) &= h(x(t)) \end{aligned} \quad (2.17)$$

donde el estado $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas externas conocidas, y $y(t) \in \mathbb{R}$ es el vector de salidas medibles.

Teoría de observabilidad

Se dice que el sistema es observable si no tiene algún par de estados indistinguibles. La observabilidad no excluye la posible existencia para las cuales algunos estados son indistinguibles. Esto significa que en general la observabilidad no es suficiente para diseñar un observador y que el problema de las entradas debe ser tomado en cuenta [Gauthier and Kupka, 1994].

Para que exista el observador depende de la salida, para eso se forma una matriz de transformación Ec. (2.18) partiendo de la Ec. (2.17):

$$O(x) = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ L_f^2 h(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

después se saca la Jacobiana de $O(x)$:

$$O(x) = \begin{bmatrix} o_1(x) \\ o_2(x) \\ \vdots \\ o_n(x) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\sigma = \frac{\partial O}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial o_1}{\partial x_1} & \frac{\partial o_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial o_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial o_2}{\partial x_1} & \frac{\partial o_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial o_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial o_n}{\partial x_1} & \frac{\partial o_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial o_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

si el rango de la matriz de σ es n , se puede construir el observador, pero no asegura que sea observable.

A continuación, algunas definiciones, que ayudarán a definir el concepto de observabilidad no lineal.

Condiciones geométricas de observabilidad

Para un posible diseño de un observador, se debe recuperar información del estado a través de la salida que se mide a partir del valor inicial del estado; de manera más particular recuperar el valor inicial correspondiente al estado. Esto significa, que la observabilidad se caracteriza por el hecho de que a partir de la medición de salida, uno debe ser capaz de distinguir entre varios estados iniciales [Besançon, 2007].

Indistinguibilidad:

Un par de condiciones iniciales diferentes (x_0, x'_0) es indistinguible para un sistema (2.17) si:

$$\forall u \in \mathcal{U}, \forall t \geq 0, h(\mathcal{X}_u(t, x_0)) = h(\mathcal{X}_u(t, x'_0)) \quad (2.21)$$

si son condiciones iniciales diferentes y toman la misma trayectoria los dos estados son indistinguibles.

Observabilidad

El sistema de la Ec. (2.17) es observable con respecto a las condiciones iniciales, si no admite ningún par indistinguible, es decir que cualquier estado es indistinguible de x_0 .

Observabilidad débil

El sistema de la Ec. (2.17) es débilmente observable con respecto x_0 . Si existe un vecindario U de cualquier estado $x(t)$ con respecto a x_0 , de tal manera que no hay un estado indistinguible de $x(t)$ con respecto x_0 en U .

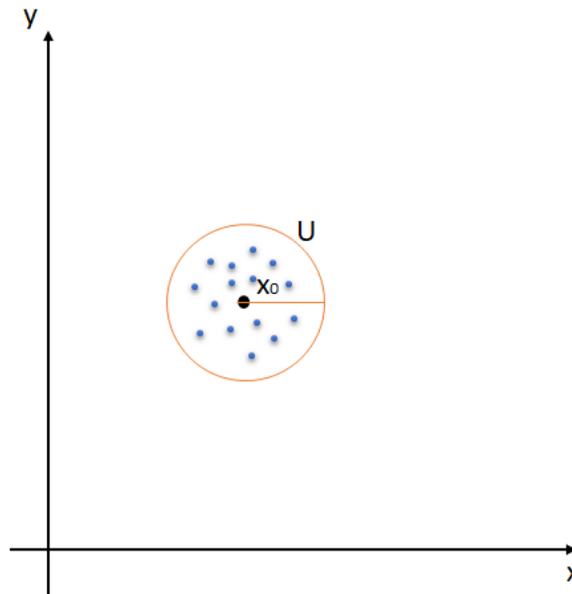


Figura 2.13: Función de salida de un sistema débil

En la Fig. 2.13 se define la observabilidad alrededor de un punto, definiendo un subconjunto de estados iniciales U , definiendo un radio, alrededor del subconjunto y todos los puntos dentro del conjunto son distinguibles entonces el sistema es débilmente observable.

Otra manera para probar la observabilidad en sistemas no lineales de la Ec. 2.17, es que satisfaga la condición de rango de observabilidad en x_0 , es localmente débilmente observable en x_0 .

Para eso el sistema Ec. (2.17), se debe linealizar, y así obtener la matriz A y C :

$$A = \frac{\partial f(x)}{\partial x}, \quad C = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$$

Finalmente, al calcular el rango x_0 con la matriz de observabilidad Ec. (2.12), el sistema no lineal es débilmente observable, ya que se linealiza en un punto [Besançon, 2007].

Diseño de observador para estructuras no lineales

Considerando la Ec. (2.17), se diseña un observador con inyección de salida lineal de la forma [Torres-Ortiz, 2005]:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= f(\hat{x}(t)) + L(\hat{y}(t) - y(t)) \\ \hat{y}(t) &= h(\hat{x}(t))\end{aligned}\tag{2.22}$$

donde la ganancia $L \in \mathbb{R}^{n \times p}$ es una matriz. Considerando el error entre el estado estimado y el estado verdadero, se define al error de observación como:

$$e(t) = \|\hat{x}(t) - x(t)\|$$

se obtiene su dinámica del error de observación:

$$\dot{e}(t) = f(\hat{x}(t)) - f(x(t)) + L(h(\hat{x}(t)) - h(x(t)))\tag{2.23}$$

La estabilidad de la dinámica del error, implica la estabilidad local del sistema no lineal correspondiente sobre ese punto fijo, se considera una linealización de la ecuación de arriba alrededor del error de observación $e = 0$, se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= f(\hat{x}(t)) - f(x(t)) + L(h(\hat{x}(t)) - h(x(t))) \\ &= f(x(t) + e(t)) - f(x(t)) + L(h(x(t) + e(t)) - h(x(t))) \\ &= f(e(t)) + L(h(e(t))) + f(x(t)) - f(x(t)) + Lh(x(t)) - Lh(x(t)) \\ &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} x(t) + L \frac{\partial h}{\partial x} x(t) \right) e(t) + f(x(t)) - f(x(t)) + Lh(x(t)) - Lh(x(t))\end{aligned}\tag{2.24}$$

Entonces el sistema linealizado es:

$$\dot{e}(t) = \left(\frac{\partial f}{\partial x} x(t) + L \frac{\partial h}{\partial x} x(t) \right) e(t)\tag{2.25}$$

Condiciones analíticas de observabilidad

Los conceptos de entradas universales y observabilidad uniforme para los sistemas se revisan primero, y conceptos más fuertes como la persistencia y regularidad, usualmente utilizados para sistemas afín en el estado, se revisan posteriormente [Besançon, 2007].

ENTRADAS UNIVERSALES

Una entrada $u(t)$ es universal en $[0, t]$, si para cada par de estados distintos $x_0 \neq \tilde{x}_0$, existe un $\tau \in [0, t]$ tal que:

$$h(\mathcal{X}_u(t, x_0)) \neq h(\mathcal{X}_u(t, \tilde{x}_0))\tag{2.26}$$

Una entrada $u(t)$ que no es universal, se dice es una entrada singular.

Finalmente, el diseño de observadores depende de las entradas del sistema, según se presentó en la sección anterior con las nociones de observabilidad. Sin embargo, en algunos casos el diseño de observadores puede ser independiente de la entrada (sistemas uniformemente observables), por lo que, su diseño depende entonces de la estructura matemática del sistema.

2.3.2.1. Observador adaptable

Un observador adaptable es un algoritmo recursivo para la estimación conjunta de parámetros de estado de sistemas de espacio de estado parametrizados. Los trabajos anteriores sobre observadores adaptativos globalmente convergentes consideran parámetros desconocidos en las ecuaciones de estado o en las ecuaciones de salida, pero no en ambas. Esta forma de hecho enfatiza las propiedades que permiten una estimación del estado asintótico a pesar de los parámetros desconocidos, así como propiedades adicionales que permiten la estimación de parámetros. A modo de ejemplo, se muestra cómo se puede diseñar un observador adaptativo para una clase de sistemas afines al estado [Li et al., 2011].

Los observadores adaptables son una gran herramienta tanto para la estimación de parámetros desconocidos como para estados no medibles dentro de los modelos; el caso de los sistemas lineales, se han estudiado desde la década de 1970 [Luders and Narendra, 1973].

El diseño de un observador se complica cuando algunos parámetros del modelo no son conocidos o no se tiene un valor exacto, por lo cual el observador puede estimarlo de la mejor manera.

Teniendo un sistema no lineal adaptable:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) + g(x(t), u(t), t)\theta(t) \\ y(t) &= hx(t)\end{aligned}\tag{2.27}$$

La variable $x(t)$ representa el estado en \mathbb{R}^n , $u(t)$ es la señal de control en \mathbb{R}^m , $y(t)$ es la salida medida en \mathbb{R}^p y $\theta(t)$ es el vector de parámetros desconocidos en \mathbb{R}^q .

2.3.2.2. Observador de alta ganancia

Un observador de alta ganancia tiene la función de estimar una ganancia constante, con el fin de tener estabilidad y un error de estimación que tienda exponencialmente a cero, para ello depende de la elección de parámetros constantes que deben satisfacer algunas desigualdades algebraicas [Aguilera-González et al., 2010].

Para el diseño del observador se deben cumplir las siguientes suposiciones:

- Funciones sean globalmente Lipschitz.
- El sistema no tenga entradas que no sean observables.

Tomando en cuenta las suposiciones se obtiene el diseño del observador para sistemas no lineales.

Considerando el siguiente sistema no lineal :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{2.28}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es la señal de control y $y(t) \in \mathbb{R}$ es la salida relacionada al estado $x(t)$ mediante $y = h(x(t))$.

La ecuación del observador de alta ganancia, cuando se presenta una restricción de una sola salida, se muestra a continuación [Gauthier et al., 1992]:

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t)) + g(\hat{x}(t))u(t) - \left(\frac{\partial \phi(\hat{x}(t))}{\partial x} \right)^{-1} S_{\Theta}^{-1} C^T (y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (2.29)$$

donde S_{θ} es una matriz simétrica definida positiva que es la solución única de la siguiente ecuación de Lyapunov:

$$\Theta S_{\Theta} + A^T S_{\Theta} + S_{\Theta} A = C^T C, \quad \Theta > 0 \quad (2.30)$$

donde Θ es el parámetro de calibración del observador y A es una matriz bloque diagonal de $n \times n$ como se muestra a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 1 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

y C es un vector fila de $1 \times n$:

$$C = [1 \quad 0 \quad \dots \quad \dots \quad 0]$$

Capítulo 3

Diseño del esquema de detección de fallas

3.1. Diseño de un observador adaptable

Para la estimación del parámetro desconocido, se debe de conocer por medio de la instrumentación el valor del estado en el cual está este parámetro. Para este caso se desea estimar el parámetro de k_t que está presente en el cuarto estado $x_4(t)$ que es la posición de la llanta, partiendo de las ecuaciones del modelo (2.7) y (2.8) se desarrolla un observador adaptable.

[Besançon, 2000] propone el diseño de un observador adaptable a partir de la siguiente representación del modelo del sistema no lineal Ec. (3.1) en donde $\alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t)$ es una función donde no interactúa el parámetro, $\beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)$ es la función donde interactúa el parámetro y $\zeta(t)$ son los estados no medibles.

$$\begin{aligned}\dot{y}(t) &= \alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)\theta(t) \\ \dot{\zeta}(t) &= Z(y(t), \zeta(t), u(t), t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

donde $u(t) \in \mathbb{R}^m$ son las entradas, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ salida medida, $\theta(t) \in \mathbb{R}^q$ es el parámetro desconocido y $\zeta(t) \in \mathbb{R}^r$ son los estados no medibles.

Se dice que está en formato adaptable si:

- (1) Que $y(t)$ sean las salidas medidas.
- (2) Los estados medidos son observables o en caso de no ser medidos que sean detectables.
- (3) Que α y β sean globalmente Lipschitz.

Si el sistema adaptable satisface las condiciones (1-3), la forma del observador adaptable es la siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{y}(t) &= \alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) + \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)\hat{\theta}(t) - k_y(\hat{y}(t) - y(t)); \quad k_y > 0, \\ \hat{\zeta}(t) &= Z(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t), \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= -k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)(\hat{y}(t) - y(t)), \quad k_\theta > 0\end{aligned}\tag{3.2}$$

Considerando

$$y = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \quad \zeta = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} F_\delta(t) \\ I(t) \\ z_r(t) \end{bmatrix}, \quad \theta(t) = k_t(t)$$

las ecuaciones (2.9) se expresan en la forma (3.1), obteniendo el siguiente sistema:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{pmatrix}}_{\dot{y}(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{b_1}{m_s}x_1(t) - \frac{b_2+k_s}{m_s}x_2(t) + \frac{b_1}{m_s}x_3(t) + \frac{b_2+k_s}{m_s}x_4(t) - \frac{f_c\rho(t)}{m_s}I(t) - \frac{1}{m_s}F_\delta(t) \\ \frac{b_1}{m_{us}}x_1(t) + \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_2(t) - \frac{b_1}{m_{us}}x_3(t) - \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_4(t) + \frac{f_c\rho(t)}{m_{us}}I(t) + \frac{1}{m_{us}}F_\delta(t) \end{pmatrix}}_{\alpha(y(t),\zeta(t),u(t),t)} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{(x_4(t)-z_r(t))}{m_{us}} \end{pmatrix}}_{\beta(y(t),\zeta(t),u(t),t)} \theta(t), \quad (3.3)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{pmatrix}}_{\dot{\zeta}(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \end{pmatrix}}_{Z(y(t),\zeta(t),u(t),t)} \quad (3.4)$$

$\theta(t)$ es el parámetro a estimar.

Para el diseño del observador del sistema de las ecuación (3.3) se comprueba que $\alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t)$ y $\beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)$ sean globalmente Lipschitz obteniendo la norma de sus Jacobianos, como se muestra a continuación:

$$\alpha = \begin{pmatrix} -\frac{b_1}{m_s}x_1(t) - \frac{b_2+k_s}{m_s}x_2(t) + \frac{b_1}{m_s}x_3(t) + \frac{b_2+k_s}{m_s}x_4(t) - \frac{f_c\rho(t)}{m_s}I(t) - \frac{1}{m_s}F_\delta(t) \\ \frac{b_1}{m_{us}}x_1(t) + \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_2(t) - \frac{b_1}{m_{us}}x_3(t) - \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_4(t) + \frac{f_c\rho(t)}{m_{us}}I(t) + \frac{1}{m_{us}}F_\delta(t) \end{pmatrix}, \quad \beta = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{(x_4(t)-z_r(t))}{m_{us}} \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial y} = \begin{bmatrix} \frac{-k_s-b_2}{m_s} & \frac{k_s+b_2}{m_s} \\ \frac{k_s+b_2}{m_{us}} & \frac{-k_s-b_2}{m_{us}} \end{bmatrix}, \quad \frac{\partial \beta}{\partial y} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix}$$

$$\left\| \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right\|_\infty \leq \max \left\| \begin{bmatrix} \frac{-k_s-b_2}{m_s} & \frac{k_s+b_2}{m_s} \\ \frac{k_s+b_2}{m_{us}} & \frac{-k_s-b_2}{m_{us}} \end{bmatrix} \right\|, \quad \left\| \frac{\partial \beta}{\partial y} \right\|_\infty \leq \max \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix} \right\|$$

Obteniendo como resultado:

$$\left\| \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right\|_\infty \leq \left\| \begin{bmatrix} k_s+b_2 \\ m_{us} \end{bmatrix} \right\|, \quad \left\| \frac{\partial \beta}{\partial y} \right\|_\infty \leq \left\| \begin{bmatrix} -1 \\ m_{us} \end{bmatrix} \right\|$$

Finalmente se sustituyen los valores de los parámetros (A.1):

$$\left\| \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right\|_\infty \leq 713.4617, \quad \left\| \frac{\partial \beta}{\partial y} \right\|_\infty \leq 0.00091$$

Al ser las funciones Lipschitz se dice que el sistema es estable ya que siempre va a converger a un punto, por lo que queda comprobado también la condición (3).

Al comprobar que el sistema mostrado en la ecuación (3.3) cumple con las condiciones (1-3), el observador adaptable para este sistema (3.2) queda de la siguiente forma, en la cual el parámetro a estimar es el coeficiente de rigidez del resorte k_t .

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \end{pmatrix}}_{\dot{\hat{y}}(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} -\frac{b_1}{m_s}x_1(t) - \frac{b_2+k_s}{m_s}x_2(t) + \frac{b_1}{m_s}x_3(t) + \frac{b_2+k_s}{m_s}x_4(t) - \frac{f_c\rho(t)}{m_s}I(t) - \frac{1}{m_s}F_\delta(t) \\ \frac{b_1}{m_{us}}x_1(t) + \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_2(t) - \frac{b_1}{m_{us}}x_3(t) - \frac{b_2+k_s}{m_{us}}x_4(t) + \frac{f_c\rho(t)}{m_{us}}I(t) + \frac{1}{m_{us}}F_\delta(t) \end{pmatrix}}_{\alpha(y(t),\hat{\zeta}(t),u(t),t)} + \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{(\hat{x}_4(t)-z_r(t))}{m_{us}} \end{pmatrix}}_{\beta(y(t),\hat{\zeta}(t),u(t),t)} \hat{\theta}(t) - k_y \underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) - \dot{x}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) - \dot{x}_3(t) \end{pmatrix}}_{\dot{\hat{y}}(t) - \dot{y}(t)} \quad (3.5)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = -k_\theta \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -\frac{(x_4(t)-z_r(t))}{m_{us}} \end{pmatrix}}_{\beta^T(y(t),\hat{\zeta}(t),u(t),t)} \underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) - \dot{x}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) - \dot{x}_3(t) \end{pmatrix}}_{\dot{\hat{y}}(t) - \dot{y}(t)} \quad (3.6)$$

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_4(t) \end{pmatrix}}_{\dot{\hat{\zeta}}(t)} = \underbrace{\begin{pmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_3 \end{pmatrix}}_{Z(y(t),\hat{\zeta}(t),u(t),t)} \quad (3.7)$$

donde k_y y k_θ son la ganancia de corrección del error del estado y la ganancia de corrección del parámetro respectivamente. Para una mejor implementación se propone que $k_\theta > k_y$, ya que así el error del parámetro se va reduciendo de mientras esta convergiendo la señal estimada a la señal medida.

Análisis de estabilidad

Las ecuaciones del error de estimación de $y(t)$, $\zeta(t)$ y $\theta(t)$ son dadas como:

$$e_y(t) = \hat{y}(t) - y(t) \quad (3.8)$$

$$e_\zeta(t) = \hat{\zeta}(t) - \zeta(t) \quad (3.9)$$

$$e_\theta(t) = \hat{\theta}(t) - \theta(t) \quad (3.10)$$

donde la dinámica del error de estimación (3.8), (3.9) y (3.10) son:

$$\dot{e}_y(t) = \dot{\hat{y}}(t) - \dot{y}(t) \quad (3.11)$$

$$\dot{e}_\zeta(t) = \dot{\hat{\zeta}}(t) - \dot{\zeta}(t) \quad (3.12)$$

$$\dot{e}_\theta(t) = \dot{\hat{\theta}}(t) - \dot{\theta}(t) \quad (3.13)$$

sustituyendo $\hat{y}(t)$ y $\dot{y}(t)$ en (3.11) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_y(t) &= \alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) + \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)\hat{\theta}(t) - k_y(\hat{y}(t) - y(t)) - \\
 &\quad [\alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)\theta(t)] \\
 &= \alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) + \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)(\hat{\theta}(t) + \theta(t)) - k_y(\hat{y}(t) - y(t)) - \\
 &\quad [\alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)\theta(t)] \\
 &= \alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \\
 &\quad (\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t))\theta(t) + \\
 &\quad (\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)\hat{\theta} - k_y(\hat{y}(t) - y(t))) \\
 &= \alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \\
 &\quad [\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)]\theta(t) + \\
 &\quad (\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta - k_y e_y(t))
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

sustituyendo $\dot{\hat{\zeta}}(t)$ y $\dot{\zeta}(t)$ en (3.12) se obtiene:

$$\dot{e}_\zeta(t) = Z(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - Z(y(t), \zeta(t), u(t), t) \tag{3.15}$$

considerando que $\theta(t)$ es un parámetro constante $\dot{\theta}(t) = 0$, sustituyendo $\dot{\hat{\theta}}(t)$ en (3.13) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_\theta(t) &= -k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)(\hat{y}(t) - y(t)) \\
 &= -k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_y(t)
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

se propone la siguiente función cuadrática de Lyapunov:

$$V_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) := \frac{\varepsilon}{2} e_y^T(t) e_y(t) + V(t, e_\zeta(t)) + \frac{\varepsilon}{2k_\theta} e_\theta^T(t) e_\theta(t) \tag{3.17}$$

cuya derivada resulta como:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) &\leq \frac{\varepsilon}{2} [e_y^T(t) \dot{e}_y(t) + \dot{e}_y^T(t) e_y(t)] + \dot{V}(t, e_\zeta(t)) \\
 &\quad + \frac{\varepsilon}{2k_\theta} [e_\theta^T(t) \dot{e}_\theta(t) + \dot{e}_\theta^T(t) e_\theta(t)]
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

sustituyendo los valores de (3.14), (3.15) y (3.16) en (3.18) obtenemos:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) &\leq \frac{\varepsilon}{2} (e_y^T(t) [\alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \\
 &\quad [\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)]\theta(t) + \\
 &\quad \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta - k_y e_y(t)] + [\alpha^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \alpha^T(y(t), \zeta(t), u(t), t) + \\
 &\quad \theta^T(t) [\beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \beta^T(y(t), \zeta(t), u(t), t)] + \\
 &\quad e_\theta^T(t) \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - e_y^T(t) k_y^T] e_y(t)) + \dot{V}(t, e_\zeta(t)) + \\
 &\quad \frac{\varepsilon}{2k_\theta} [-e_\theta^T(t) k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_y(t) - (e_y^T(t) k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_\theta(t))]
 \end{aligned} \tag{3.19}$$

considerando que:

$$\|\alpha(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \alpha(y(t), \zeta(t), u(t), t)\| \leq \gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} \quad (3.20)$$

$$\|\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - \beta(y(t), \zeta(t), u(t), t)\| \leq \gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} \quad (3.21)$$

$$\dot{V}(t, e_\zeta(t)) \leq \frac{\partial V}{\partial t}(t, e_\zeta(t)) + \frac{\partial V}{\partial e_\zeta(t)}(Z(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - Z(y(t), \zeta(t), u(t), t)) \leq -\kappa(e_\zeta(t)) \quad (3.22)$$

sustituimos las desigualdades (3.20), (3.21) y (3.22) en (3.19) obteniendo:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) \leq & \frac{\varepsilon}{2}(e_y^T(t)[\gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + (\gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))})\theta(t) + \\ & \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta - k_y e_y(t)] + [\gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + \\ & \theta^T(t)\gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + e_\theta^T(t)\beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) - e_y^T(t)k_y^T]e_y(t)) - \\ & \kappa(e_\zeta(t)) + \frac{\varepsilon}{2k_\theta}[-e_\theta^T(t)k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_y(t) - \\ & e_y^T(t)k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta(t)] \end{aligned} \quad (3.23)$$

simplicando la desigualdad, obtenemos:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) \leq & \frac{\varepsilon}{2}[e_y^T(t)\gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + e_y^T(t)\gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))}\theta(t) + \\ & e_y^T(t)\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta - e_y^T(t)k_y e_y(t) + \\ & \gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))}e_y(t) + \theta^T \gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))}e_y(t) + \\ & e_\theta^T(t)\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_y(t) - e_y^T k_y^T e_y] - \\ & \kappa(e_\zeta(t)) + \frac{\varepsilon}{2k_\theta}[-e_\theta^T(t)k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_y(t) - \\ & e_y^T k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta(t)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

reducimos los términos:

$$\begin{aligned} \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) \leq & \frac{\varepsilon}{2}[2(e_y(t)\gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + e_y(t)\gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))}\theta(t) + \\ & e_y^T(t)\beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta - k_y \|e_y(t)\|^2)] - \\ & \kappa(e_\zeta(t)) + \frac{\varepsilon}{2k_\theta}[-2k_\theta(e_y^T k_\theta \beta^T(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t)e_\theta(t))] \end{aligned} \quad (3.25)$$

para así obtener:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) &\leq \varepsilon [e_y(t) \gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + e_y(t) \gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} \theta(t) + \\
 &\quad e_y^T(t) \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_\theta - k_y \|e_y(t)\|^2] - \\
 &\quad \kappa(e_\zeta(t)) + \varepsilon [e_y^T k_\theta \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_\theta(t)] \\
 \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) &\leq \varepsilon e_y(t) \gamma_\alpha \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} + \varepsilon e_y(t) \gamma_\beta \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} \theta(t) + \\
 &\quad \varepsilon e_y^T(t) \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_\theta - \varepsilon k_y \|e_y(t)\|^2 - \\
 &\quad \kappa(e_\zeta(t)) - \varepsilon e_y^T k_\theta \beta(y(t), \hat{\zeta}(t), u(t), t) e_\theta(t)
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

finalmente se consigue la derivada de Lyapunov:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_e(t, e_y(t), e_\zeta(t), e_\theta(t)) &\leq \varepsilon [\gamma_\alpha + \gamma_\beta \theta(t)] e_y(t) \sqrt{\kappa(e_\zeta(t))} - \\
 &\quad \varepsilon k_y \|e_y(t)\|^2 - \kappa(e_\zeta(t))
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Se considera que:

$$\varepsilon > 0, \kappa > 0, \gamma_\alpha > 0, \gamma_\beta > 0, k_y > 0, k_\theta > 0$$

3.2. Diseño de un observador adaptable para sistemas no lineales Lipschitz

El cual se puede representar en [Ekramian et al., 2013]:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + \Psi(y(t), u(t)) + \Phi(x(t), \theta(t), u(t)) \\
 y(t) &= Cx(t) \\
 \Phi(x(t), \theta(t), u(t)) &= \Phi_1(x(t), u(t)) + B\Phi_2(x(t), u(t))\theta(t)
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ y $\theta \in \mathbb{R}^q$ son los vectores de estados y parámetros a estimar, respectivamente. Los vectores $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ representan las variables de entrada y salida respectivamente. $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times l}$ y $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ son matrices de dimensiones apropiadas.

En base a lo anterior un observador adaptable queda de la siguiente manera:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + \Psi(y(t), u(t)) + \Phi(\hat{x}(t), \hat{\theta}(t), u(t)) - L(y(t) - C\hat{x}(t)) \tag{3.29}$$

La estimación del vector de parámetros $\hat{\theta}(t)$ es:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \Phi_2^T(\hat{x}(t), u(t)) K(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad \Gamma > 0 \tag{3.30}$$

El observador dado por las ecuaciones (3.29) y (3.30), se emplea para estimar simultáneamente las variables de estado y los parámetros desconocidos $\theta(t)$, siempre y cuando la función $\Phi(x(t), \theta(t), u(t), t)$ sea Lipschitz.

Las matrices L y K son las ganancias del observador y deben seleccionarse para garantizar la convergencia de los estados y parámetros estimados a los reales.

Las funciones no lineales $\Phi_1(x(t), u(t))$ y $\Phi_2(x(t), u(t), t)$ satisfacen las condiciones Lipschitz con respecto a las variables de estado. En consecuencia para un valor acotado de $\theta(t)$, la función no lineal $\Phi(x(t), \theta(t), u(t), t)$ satisface la condición de Lipschitz:

$$\|\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))\| \leq \gamma \|x(t) - \hat{x}(t)\| \quad (3.31)$$

siendo γ la constante Lipschitz.

Demostración de la condición Lipschitz

Sea $\Phi(x(t), \theta(t), u(t))$ continua por tramos en el intervalo $[a, b]$ si $\Phi(x(t), \theta(t), u(t))$ es definida y es continua en todos los puntos de $[a, b]$ salvo quizá en un número finito de puntos. Decimos que $f(x)(t)$ es localmente Lipschitz en un dominio $D \subset \mathbb{R}^n$ si cada punto de D tiene un entorno D_0 tal que satisface (3.31) con alguna constante de Lipschitz L_0 . Decimos que $f(x)(t)$ es Lipschitz en un conjunto W si satisface (3.31) en todos los puntos de W . Decimos que $f(x)(t)$ es globalmente Lipschitz si es Lipschitz en \mathbb{R}^n [Khalil, 2002].

Teniendo las funciones $(\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t)))$ y $(x(t) - \hat{x}(t))$, las evaluamos en la gráfica Fig. 3.1, al graficar obtenemos aproximadamente una pendiente.

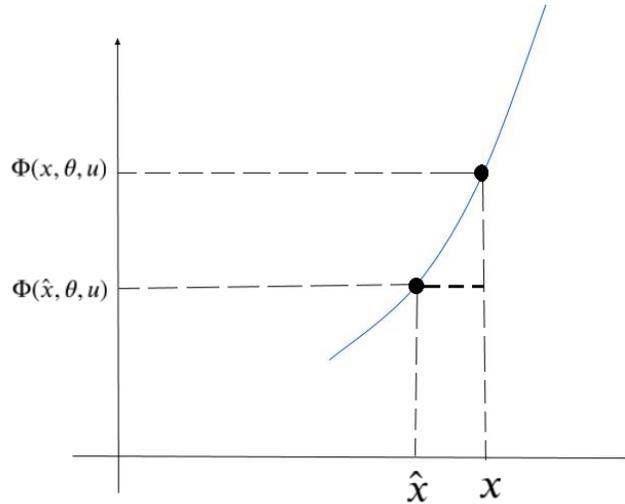


Figura 3.1: Condición Lipschitz

Si se trabaja en el conjunto \mathbb{R}^2 obtenemos la distancia (norma Euclidiana) de los dos puntos.

$$\gamma = \|\bar{x}(t) - y(t)\| \quad (3.32)$$

donde:

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= (x(t) - \hat{x}(t)); \\ y(t) &= (\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))) \end{aligned}$$

obtenemos la distancia:

$$\gamma = \sqrt{(x(t) - \hat{x}(t))^2 + (\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t)))^2} \quad (3.33)$$

Finalmente queda representado de la siguiente manera:

$$\frac{\|\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))\|}{\|x(t) - \hat{x}(t)\|} \leq \gamma \quad (3.34)$$

Finalmente tenemos el valor de la constante de Lipschitz.

Si se trabaja en el conjunto \mathbb{R}^1 obtenemos el valor absoluto, por lo tanto:

$$|\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))| \leq \gamma |x(t) - \hat{x}(t)| \quad (3.35)$$

despejamos la constante γ :

$$\frac{|\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t))|}{|x(t) - \hat{x}(t)|} \leq \gamma \quad (3.36)$$

Y así obtener el valor de la pendiente, en otras palabras va ser una constante finita, ya que si no cumple con la condición se vuelve infinita, a su vez la tangente de un ángulo es el equivalente a la pendiente de un punto, por lo tanto se demuestra que:

$$\left| \frac{\Delta(\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t)))}{\Delta(x(t) - \hat{x}(t))} \right| \in \mathbb{R}^1 \quad (3.37)$$

Representado de la siguiente manera:

$$\left| \frac{\partial(\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t)))}{\partial(x(t) - \hat{x}(t))} \right| \in \mathbb{R}^1 \quad (3.38)$$

Si se trabaja en el conjunto \mathbb{R}^n obtenemos el valor absoluto, por lo tanto:

$$\left\| \frac{\partial(\Phi(x(t), \theta(t), u(t)) - \Phi(\hat{x}(t), \theta(t), u(t)))}{\partial(x(t) - \hat{x}(t))} \right\| \leq \gamma \quad (3.39)$$

No es Lipschitz cuando ocurre un cambio en $\frac{\partial x}{\partial \Phi}$ con respecto a Φ ocasionando que sea infinita, por lo cual se debe acotar la pendiente de tal forma que no sea finita y así la función sea Lipschitz, una función Lipschitz es toda aquella que no tiene pendientes infinitas, se demuestra en el **Lema 3.1** de [Khalil, 2002].

Considerando:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} F_\delta(t) \\ I(t) \\ z_r(t) \end{bmatrix}, \quad \theta(t) = k_t(t)$$

donde $y_1(t)$ es la velocidad del chasis, $y_2(t)$ es la velocidad de la llanta y $y_3(t)$ es la diferencia de posiciones.

Reescribiendo las ecuaciones (2.9), en la forma del sistema adaptable (3.28), se obtiene el siguiente sistema:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b_1}{m_s} & -\frac{b_2+k_s}{m_s} & \frac{b_1}{m_s} & \frac{b_2+k_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{b_1}{m_{us}} & \frac{b_2+k_s}{m_{us}} & -\frac{b_1}{m_{us}} & -\frac{b_2+k_s}{m_{us}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{f_c \rho_1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{f_c \rho_1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Psi(y(t), u(t))} I(t) + \quad (3.40)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Phi_1(x(t), u(t))} F_\delta(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} z_r(t) - x_4(t) \\ m_{us} \end{bmatrix}}_{\Phi_2(x(t), u(t))} \underbrace{\theta(t)}_{k_y(t)}$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}}_{y(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}}_{x(t)}$$

(3.41)

Para el diseño del observador del sistema (3.40), se verifica que la función $\Phi(x, \theta, u, t)$ sea Lipschitz, o bien, que las funciones $\Phi_1(x, u)$ y $\Phi_2(x, u, t)$ sean Lipschitz obteniendo la norma de sus Jacobianos, como se muestra a continuación:

$$\Phi_1(x(t), u(t)) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_{us}} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix} F_\delta(t) \quad \Phi_2(x(t), u(t), t) = \begin{bmatrix} z_r(t) - x_3(t) \\ m_{us} \end{bmatrix}$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix}$$

$$\left\| \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right\|_1 = \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right\| \leq \gamma \quad \left\| \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right\|_1 = \left\| \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{m_{us}} \end{bmatrix} \right\| \leq \gamma$$

Obteniendo como resultado:

$$\left\| \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right\|_1 = 0 \leq \gamma \quad \left\| \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right\|_1 = \frac{1}{m_{us}} \leq \gamma$$

$$\left\| \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} \right\|_1 = 0 \leq \gamma \quad \left\| \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} \right\|_1 = 0.0091 \leq \gamma$$

Al ser las funciones Lipschitz, se puede diseñar el observador adaptable dado por las Ecs. (3.29) y (3.30), partiendo del modelo adaptable dado por las Ecs. (3.40) y (3.41), quedando de la siguiente manera, en el cual el parámetro a estimar es el coeficiente de rigidez del resorte $k_t(t)$.

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{\dot{x}}_1(t) \\ \hat{\dot{x}}_2(t) \\ \hat{\dot{x}}_3(t) \\ \hat{\dot{x}}_4(t) \end{bmatrix}}_{\hat{\dot{x}}(t)} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{b_1}{m_s} & -\frac{b_2+k_s}{m_s} & \frac{b_1}{m_s} & \frac{b_2+k_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{b_1}{m_{us}} & \frac{b_2+k_s}{m_{us}} & -\frac{b_1}{m_{us}} & -\frac{b_2+k_s}{m_{us}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{f_c \rho_1(t)}{m_s} \\ 0 \\ \frac{f_c \rho_1(t)}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Psi(y,u)} I(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{m_s} \\ 0 \\ \frac{1}{m_{us}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Phi_1(\hat{x}(t),u(t))} F_\delta(t) + \\
 &\underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} z_r(t) - x_4(t) \\ m_{us} \end{bmatrix}}_{\Phi_2(\hat{x}(t),\theta(t),u(t))} \hat{\theta}(t) - L \left(\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \\ x_2(t) - x_4(t) \end{bmatrix}}_{y(t)} - \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)} \right) \quad (3.42)
 \end{aligned}$$

Ecuación para estimar el vector del parámetro $\theta(t)$ es la siguiente:

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = \Gamma \underbrace{\begin{bmatrix} z_r(t) - x_4(t) \\ m_{us} \end{bmatrix}}_{\Phi_2(x(t),u(t))} K \left(\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \\ x_2(t) - x_4(t) \end{bmatrix}}_{y(t)} - \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}(t)} \right) \quad (3.43)$$

con $\Gamma > 0$, donde L y K son las ganancias del observador. El único requisito para elegir la ganancia Γ es que debe ser un escalar positivo. En este caso se elige $\Gamma = 150$, debido a que este valor permite un tiempo de convergencia adecuado del observador. Mientras mayor sea el valor de Γ , menor es el tiempo de convergencia, pero a la vez se incrementa la sensibilidad del observador al ruido de medición.

Análisis de estabilidad

Las ecuaciones del error de estimación de $x(t)$ y $\theta(t)$ son dadas como:

$$e_x(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (3.44)$$

$$e_\theta(t) = \theta(t) - \hat{\theta}(t) \quad (3.45)$$

donde la dinámica del error de estimación (3.44) y (3.45) son:

$$\dot{e}_x(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (3.46)$$

$$\dot{e}_\theta(t) = \dot{\theta}(t) - \dot{\hat{\theta}}(t) \quad (3.47)$$

Sustituyendo $\dot{x}(t)$ y $\dot{\theta}(t)$ en (3.46) y (3.47) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_x(t) &= Ax(t) + \Psi(u, t) + \Phi_1(x, u) + B\Phi_2(x, u, t)\theta(t) \\
 &\quad - [A\hat{x}(t) + \Psi(u, t) + \Phi_1(\hat{x}, u) + B\Phi_2(\hat{x}, u, t)\hat{\theta}(t) - LC(x(t) - \hat{x}(t))] \\
 &= Ax(t) + B\Phi_2(x, u, t)\theta(t) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) - A\hat{x}(t) - B\Phi_2(\hat{x}, u, t)\hat{\theta}(t) + LC(x(t) - \hat{x}(t)) \\
 &= (A + LC)(x - \hat{x}) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) + B\Phi_2(x, u, t)(\theta(t) - \hat{\theta}(t)) \\
 &= (A + LC)e_x(t) + (\Phi_1(x, u) - \Phi_1(\hat{x}, u)) + B\Phi_2(x, u, t)e_\theta(t)
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

considerando que $\theta(t)$ se mantiene constante en θ_0 , se tiene que $\dot{\theta}(t) = 0$, por lo tanto

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_\theta(t) &= -\Gamma\Phi_2(x, u, t)KC(x(t) - \hat{x}(t)) \\
 \dot{e}_\theta(t) &= -\Gamma\Phi_2(x, u, t)KCe_x(t)
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

Se propone la siguiente función cuadrática de Lyapunov:

$$\begin{aligned}
 V(t) &= e_x^T(t)Pe_x(t) + e_\theta^T(t)Qe_\theta(t) \\
 &\quad \text{con } P > 0 \text{ y } Q > 0
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

cuya derivada resulta como:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &\leq e_x^T(t)P\dot{e}_x(t) + e_x^T(t)Pe_x(t) + e_\theta^T(t)Q\dot{e}_\theta(t) + e_\theta^T(t)Qe_\theta(t) \\
 \dot{V}(t) &\leq 2e_x^T(t)P(A + LC)e_x(t) + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) + 2e_x^T(t)PB\Phi_2(x, u, t)e_\theta(t) + 2e_\theta^T(t)Q\dot{e}_\theta(t)
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

se considera que $B^T PC^\perp = 0$, esto implica que existe una matriz K , tal que $B^T P = KC$ y que $\dot{e}_\theta(t) = -\hat{\theta}(t)$, se obtiene:

$$\dot{V}(t) \leq e_x^T(t)[(A + LC)^T P + P(A + LC)]e_x(t) + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) \tag{3.52}$$

sustituyendo:

$$L := -\xi P^{-1}C^T, \quad \xi > 0 \tag{3.53}$$

obtenemos:

$$\dot{V}(t) \leq e_x^T(t)[(A - \xi P^{-1}C^T C)^T P + P(A - \xi P^{-1}C^T C)]e_x(t) + 2e_x^T(t)Pe_{\Phi_1}(x, u, t) \tag{3.54}$$

Capítulo 4

Resultados de simulación

4.1. Simulación del sistema

En la Fig. 4.1, se muestra el diagrama de cuerpo libre de una suspensión semiactiva relacionado físicamente con la parte delantera de un vehículo.

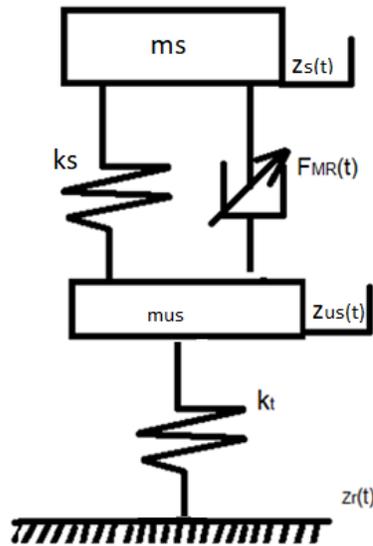


Figura 4.1: Esquema de una suspensión semiactiva

donde k_s y k_t son los coeficientes de la suspensión y la rigidez de la rueda linealizados. $F_{MR}(t)$ es la fuerza de amortiguamiento, m_s y m_{us} son la masa suspendida y no suspendida, $z_s(t)$ y $z_{us}(t)$ son el desplazamiento vertical del chasis (masa suspendida) y de la rueda y, $z_r(t)$ es el perfil de suelo.

Una vez teniendo el sistema de la suspensión, se le aplica el perfil de suelo ($z_r(t)$), del cual son tomadas de diferentes calles de Cuernavaca, las siguientes figuras muestran topes que se consideran como disturbios.

Tope 1

En la siguiente figura se muestra un tope de la calle Paseo de La Reforma, de la colonia Lomas de Cuernavaca, en Cuernavaca, Morelos.



Figura 4.2: Tope 1

Teniendo una altura de 11.5 cm, como se muestra en la Fig. 4.3.



Figura 4.3: Medición de altura del tope 1

Tomando en cuenta el tope anterior Fig. 4.2, se simula en un tiempo de 7 segundos, donde se observa que a partir del segundo 1 hasta el segundo 4.1, se muestra el paso del tope con una altura de 11.5 cm, una vez pasando el tope se mantiene constante en cero que representa que no hay alteración en el perfil Fig. 4.4.

$$z_r(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 11.5\text{sen}(t)\text{cm} & 1 \leq t \leq 4.1 \\ 0 & t > 4.1 \end{cases}$$

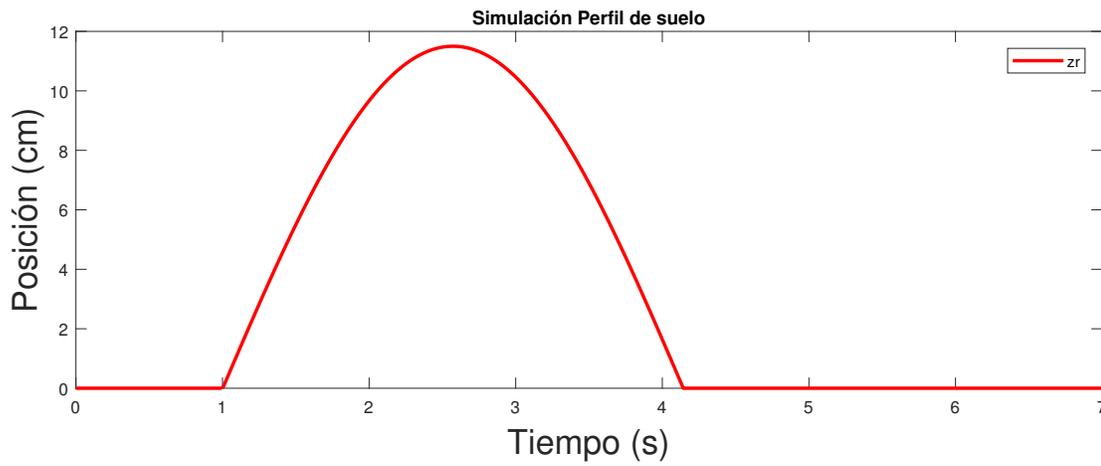


Figura 4.4: Tope 1: Posición del perfil de suelo

Tope 2

En la siguiente Fig. 4.5, se muestran tres topes seguidos donde los topes del extremo tienen una altura de 4.5 cm., y el tope de en medio tiene una altura de 7.5 cm. podemos observarlo en la Fig. 4.6, fue tomado en la calle Paseo de La Reforma, de la colonia Lomas de Cuernavaca, en Cuernavaca, Morelos.



Figura 4.5: Tope 2



Figura 4.6: Medición de altura del tope 2

Tomando en cuenta el escenario del tope Fig. 4.5, se simula en un tiempo de 20 segundos, donde se observa que a partir del segundo 1 hasta el segundo 4.5, se muestra el paso del primer tope con una altura de 4.5 cm, una vez pasando el tope se mantiene constante en cero, hasta llegar al segundo 7, donde hace contacto con el segundo tope de 7.5 cm, de altura, después se mantiene en cero durante 3.1 segundos, para que finalmente pase el tercer tope con una altura de 4.5 cm, y así una vez finalizado se mantiene en cero, que representa que no hay alteración en el perfil Fig. 4.7.

$$z_r(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 4.5\text{sen}(t)\text{cm} & 1 \leq t < 4.5 \\ 0 & 4.5 \leq t < 7 \\ 7.5\text{sen}(t)\text{cm} & 7 \leq t < 10.1 \\ 0 & 10.1 \leq t < 14 \\ 4.5\text{sen}(t)\text{cm} & 14 \leq t < 16.7 \\ 0 & t \geq 16.7 \end{cases}$$

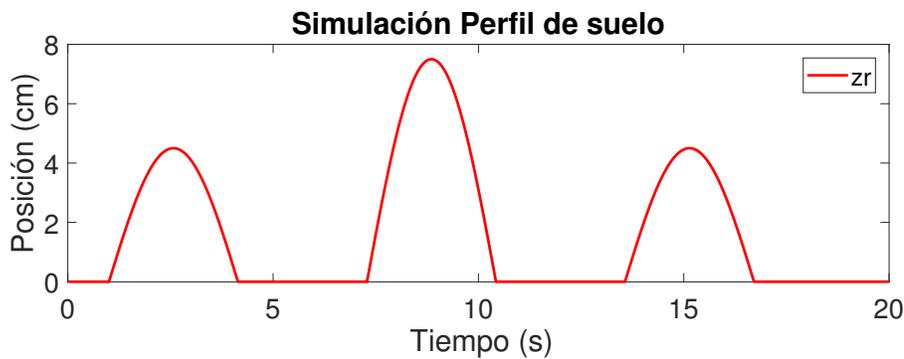


Figura 4.7: Tope 2: Posición del perfil de suelo

Tope 3

En la siguiente Fig. 4.8, se muestran dos reductores de velocidad consecutivos, cuya altura es de 3.5 cm., fue tomado en la Av. Vicente Guerrero, de la colonia Lomas de la Selva, en Cuernavaca, Morelos.



Figura 4.8: Tope 3

Tomando en cuenta el escenario del tope Fig. 4.8, se simula en un tiempo de 15 segundos, donde se observa que a partir del segundo 1 hasta el segundo 4.1, se muestra el paso del primer tope con una altura de 3.5 cm, una vez pasando el tope se mantiene constante en cero, hasta llegar al segundo 7, donde hace contacto con el segundo tope de 3.5 cm, de altura, después se mantiene en cero que representa que no hay alteración en el perfil Fig. 4.9.

$$z_r(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 3.5\text{sen}(t)\text{cm} & 1 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 3.5\text{sen}(t)\text{cm} & 7 \leq t < 10 \\ 0 & t \geq 10 \end{cases}$$

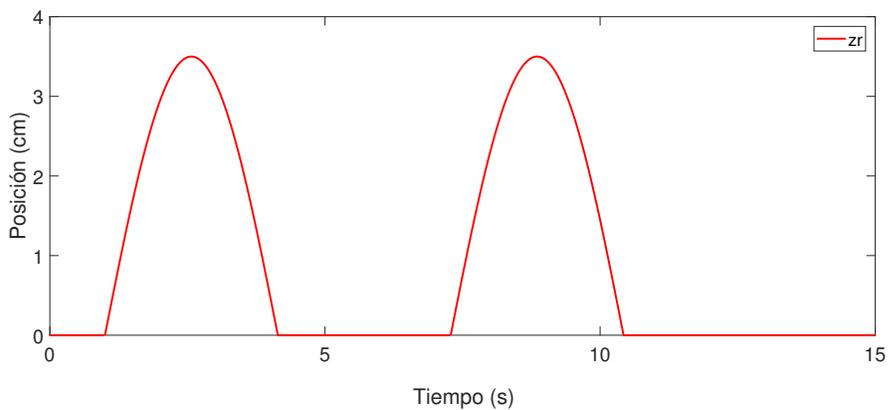


Figura 4.9: Tope 3: Posición del perfil de suelo

4.1.1. Simulación del modelo matemático de una suspensión semiactiva

Objetivo: Estudiar el comportamiento dinámico en el tiempo de una suspensión semiactiva.

En esta simulación se estudian los efectos de una suspensión semiactiva de una cuarta parte de un vehículo, en donde se estudia su comportamiento horizontal al tener contacto con las entradas, cuando el perfil de suelo que se muestra en la Fig. 4.4 en el cual el primer segundo se mantiene en contacto con un perfil recto, después se presenta dos topes de una altura de 11.5 cm., finalmente se mantiene en contacto con un perfil recto hasta terminar la simulación.

Para realizar la simulación se utilizó el modelo de la suspensión semiactiva en la Ec. (2.9). Se utilizó la herramienta de MATLAB 2017b. Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, con un tiempo de simulación de 7 segundos, el método de resolución fue el de Euler con un paso de integración de 0.0015 s. Las respuestas de la simulación se muestran las Figs. (4.10-4.13).

Sustituyen los valores de nuestros parámetros 4.1, en nuestro sistema de suspensión semiactiva de un cuarto de vehículo Ec. (2.9), con las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 2mA & 1 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

$$F_{\delta}(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

Teniendo en cuenta los siguientes valores nominales [Tudón-Martínez et al., 2016]:

Tabla 4.1: Parámetros

Parámetro	Valor
f_c	600.95 N/A
k_s	86378 N/m
k_t	270000 N/m
m_s	470 Kg
m_{us}	110 Kg
a_1	37.85 Ns/m
a_2	22.15 N/m
b_1	2830.86 Ns/m
b_2	-7897.21 N/m

En la Fig. 4.10 se observa el comportamiento vertical del chasis, al tener en contacto con el perfil del suelo. En el primer segundo de la simulación sigue la trayectoria del perfil, al pasar el tope presenta ligeras ondulaciones debido a la rigidez del resorte, el sistema se desfasa al perfil de suelo debido a los segundos que le toma al sistema compensar la fuerza de amortiguamiento requerida. En el segundo 4 cuando el perfil termina, se observa que el sistema no se estabiliza en un punto hasta llegar al segundo 6 después, al no tener fuerza de amortiguamiento no se presenta un desplazamiento negativo afectando la posición del chasis.

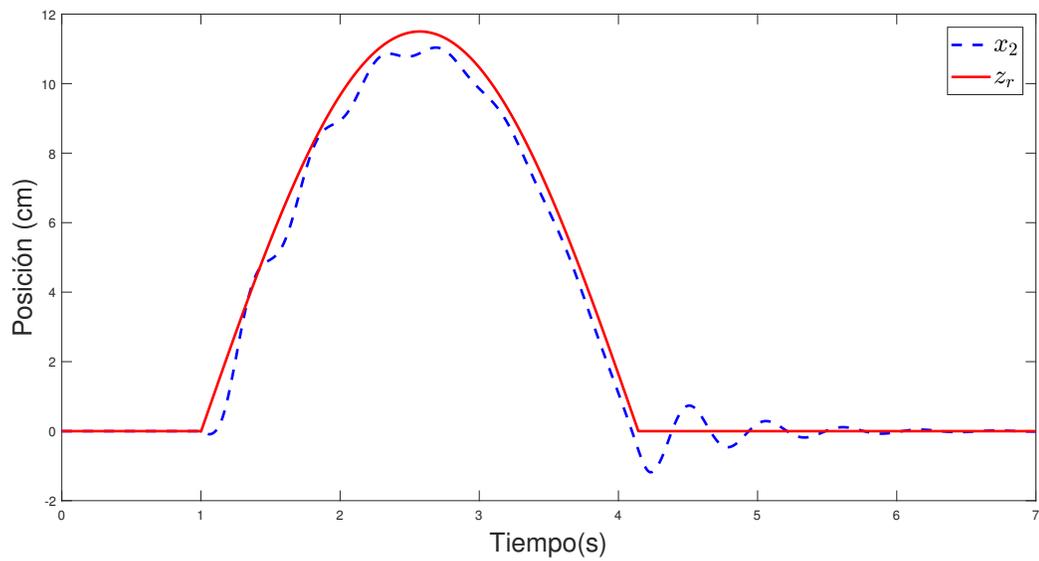


Figura 4.10: Posición del chasis del sistema al aplicarse un perfil de suelo.

En la Fig. 4.11 se muestra la velocidad del desplazamiento vertical x_1 presentada por el chasis del vehículo. Se observa que al tener contacto con el tope llega a una velocidad máxima de 0.2 m/seg. que va disminuyendo con relación al desplazamiento del perfil recorrido ocasionando una velocidad negativa, al terminar se observa que el sistema no se detiene al instante debido a la inercia del vehículo, pasando unos segundos se estabiliza con el perfil de suelo y se mantiene en cero.

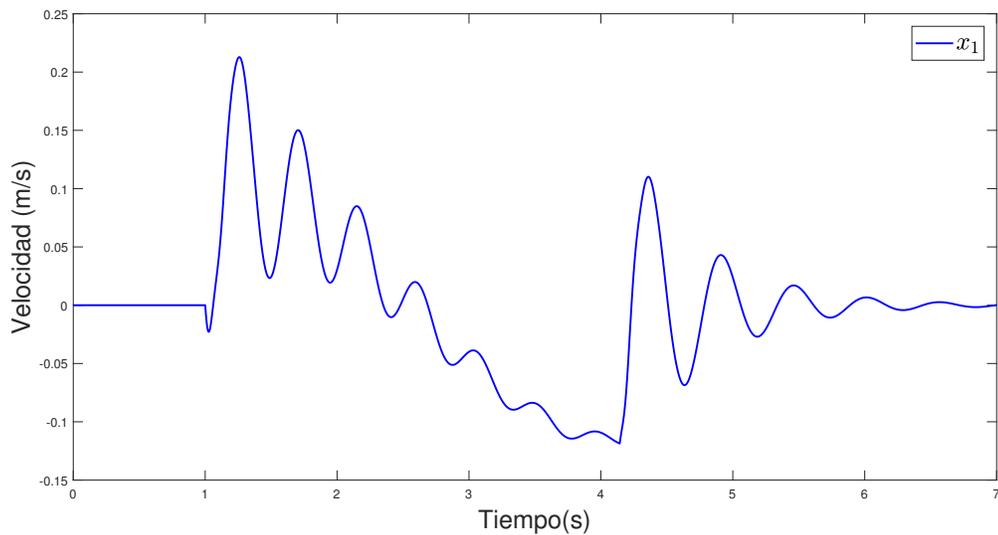


Figura 4.11: Velocidad del chasis del sistema al aplicarse un perfil de suelo.

En la Fig. 4.12 se muestra la posición de la llanta con respecto al perfil de suelo aplicado, se observa que la respuesta se asemeja al perfil de suelo aplicado, al analizar los vectores de datos obtenidos se aprecia un pequeño desfase aproximado de 0.001 seg. esto es debido al paso de integración utilizado para resolver el modelo. Una vez terminada la simulación, le toma a la llanta un segundo en dejar de presentar oscilaciones en el desplazamiento de la llanta, pero estas oscilaciones al ser pequeñas se pueden despreciar y decir que el sistema sigue fielmente el perfil de suelo al término de las oscilaciones.

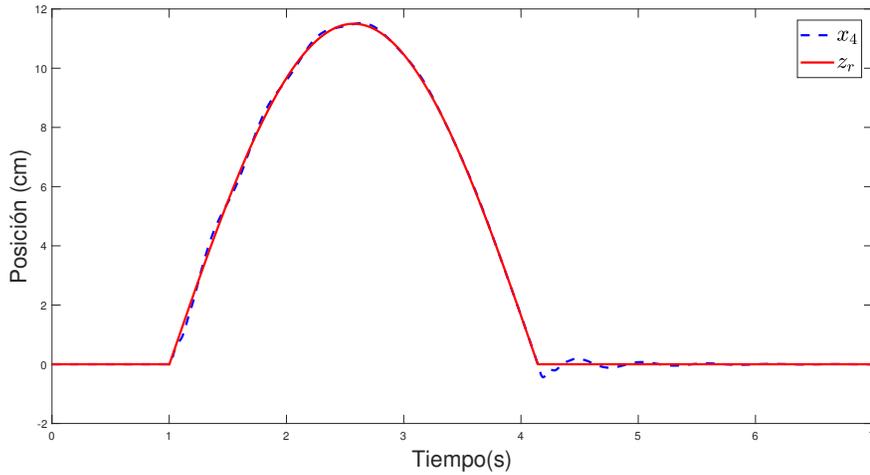


Figura 4.12: Posición de la llanta del sistema al aplicarse un perfil de suelo.

En la figura 4.13 se muestra la velocidad del desplazamiento vertical de la llanta (x_3) al aplicarle el perfil de suelo, se observa que la máxima velocidad es de 0.2 m/seg al continuar con el recorrido la velocidad va disminuyendo con relación al desplazamiento ocasionando una velocidad negativa, al terminar se observa que el sistema no se detiene al instante debido a la inercia del vehículo, pasando unos segundos al no presentarse desplazamiento se estabiliza con el perfil de suelo y se mantiene en cero.

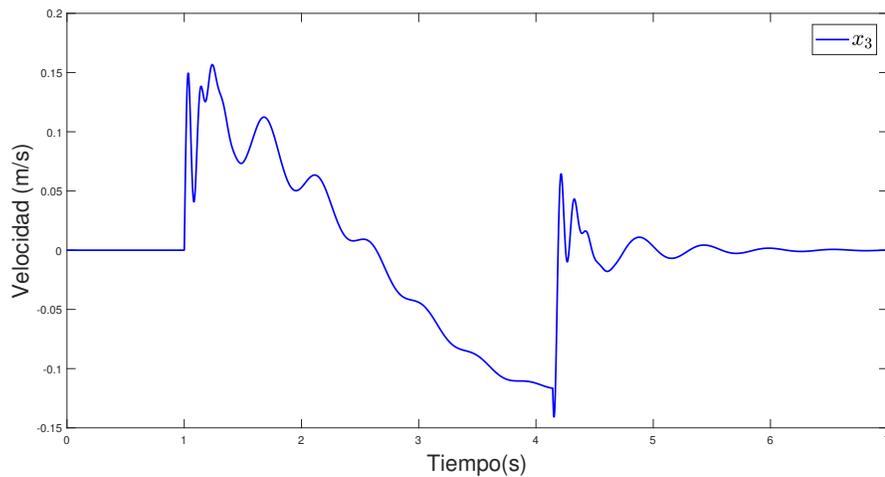


Figura 4.13: Velocidad de la llanta del sistema al aplicarse un perfil de suelo.

4.2. Evaluación de la respuesta del sistema

Simulación del sistema

Objetivo: Se prueba el rendimiento del modelo de la literatura comparándola con la reproducción de un artículo.

En esta simulación se compara las respuestas del sistema en lazo abierto con la respuesta reproducida en el artículo [Pérez-Estrada et al., 2018], tomando como base el mismo perfil de suelo figura 4.14, las deformaciones del perfil finalizan en el segundo 24, finalmente se mantiene en contacto con un perfil recto hasta terminar la simulación.

Para realizar la simulación se utilizó el modelo de la suspensión semiactiva en la Ec. (2.9). Se utilizó la herramienta de MATLAB2017b, las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, con un tiempo de simulación de 30 segundos, el método de resolución fue el de Euler con un paso de integración de 0.001s. Las respuestas de la simulación se muestran las Figs. (4.16-4.19).

En el artículo [Pérez-Estrada et al., 2018] se presenta el diseño de un observador dinámico generalizado (GDO) comparando su respuesta con un Observador Proporcional (PO) y un Observador Proporcional Integral (PIO) para sistemas lineales con parámetros variantes (LPV). El diseño del GDO se deriva de la solución de desigualdades matriciales lineales (LMI) y la solución de las restricciones algebraicas obtenidas del análisis de error de estimación. Uno de sus ejemplos utiliza el sistema de un cuarto de vehículo, en el cual se le aplica el siguiente perfil de suelo:

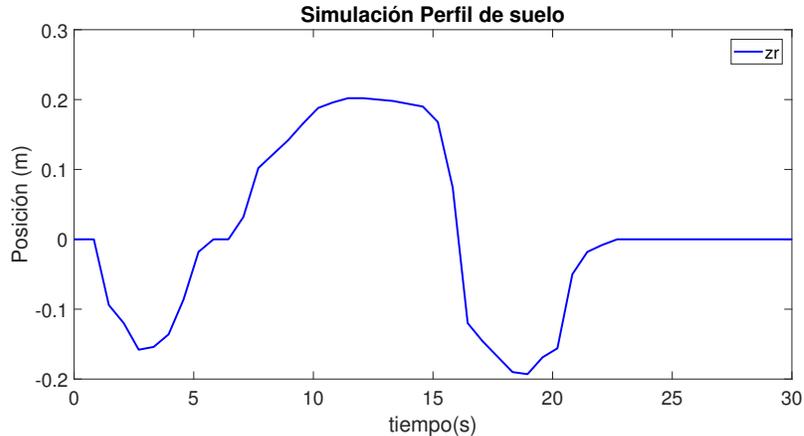


Figura 4.14: Perfil de suelo.

Simulando el perfil de suelo (z_r) de la Fig. 4.14 en nuestro sistema, comparamos los resultados obtenidos con los resultados del artículo teniendo en cuenta que se utiliza los mismos valores de los parámetros con la diferencia de que en el artículo utilizan incertidumbres paramétricas ocasionando oscilaciones en la trayectoria.

Utilizando el siguiente valor de $F_\delta(t)$:

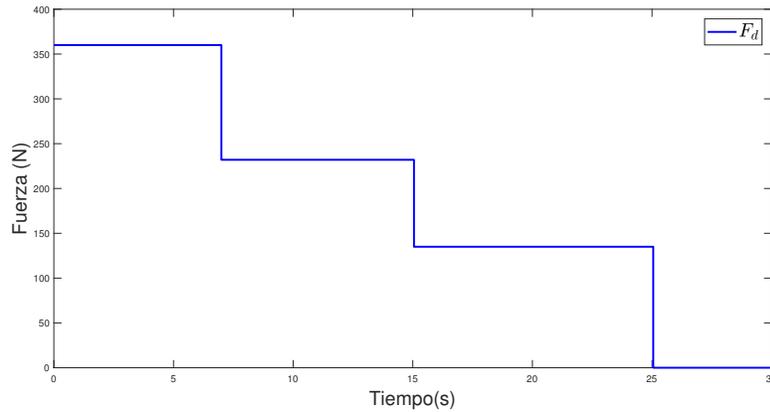
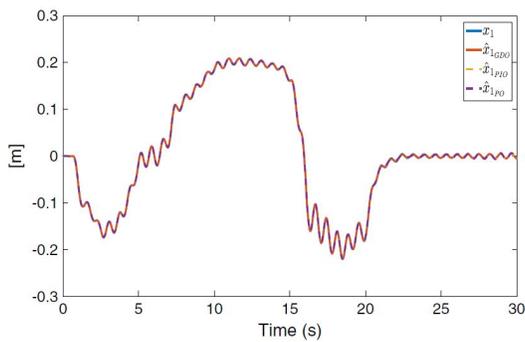


Figura 4.15: Entrada F_δ

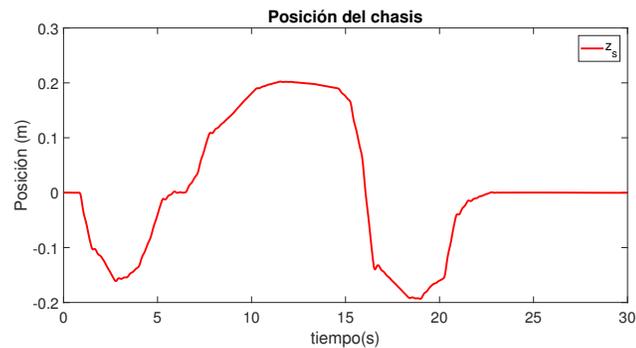
Teniendo como entrada una corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t < 1 \\ 1.1mA & 1 \leq t < 25 \\ 0 & t \geq 25 \end{cases}$$

En la Fig. 4.16 se observa el comportamiento vertical del chasis, al tener en contacto con el perfil del suelo. En el primer segundo de la simulación se presenta una pendiente negativa en el cual z_s sigue la trayectoria presentando ligeras ondulaciones debido a la rigidez del resorte, pasando el segundo 5 la pendiente va creciendo con el paso del tiempo hasta mantenerse en el segundo 10 a una altura de 0.2 m, para después decrecer en el segundo 16 hasta llegar a -0.2 m en el segundo 19, finalmente crece hasta llegar en la recta de origen manteniéndose hasta que finaliza la simulación.



(a) [Pérez-Estrada et al., 2018]



(b) Resultado obtenido

Figura 4.16: Posición del chasis

En la figura 4.17 se muestra la velocidad del desplazamiento vertical \dot{z}_s presentada por el chasis del vehículo. Se observa que al tener contacto con el primer bache al tener un desplazamiento vertical negativo presenta una velocidad negativa máxima de 0.25 m/seg. que va aumentando debido a la trayectoria trascurrída, de tal manera que en cada momento que se presenta un cambio en la trayectoria se presentan pequeñas oscilaciones, al terminar se observa que el sistema no se detiene al instante debido a la inercia del vehículo, pasando unos segundos se estabiliza con el perfil de suelo y se mantiene en cero.

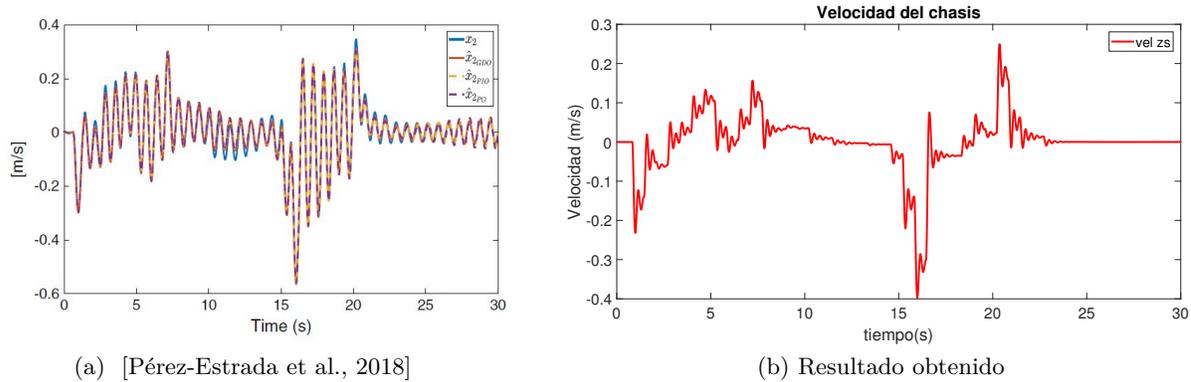


Figura 4.17: Velocidad del chasis

En la Fig. 4.18 se observa el comportamiento vertical de la llanta, al tener en contacto con el perfil del suelo. En el primer segundo de la simulación se presenta una pendiente negativa en el cual z_{us} sigue la trayectoria presentando ligeras ondulaciones debido a la rigidez del resorte, pasando el segundo 5 la pendiente va creciendo con el paso del tiempo hasta mantenerse en el segundo 10 a una altura de 0.2 m , manteniéndose para después decrecer en el segundo 16 hasta llegar a -0.2 m en el segundo 19, finalmente crece hasta llegar en la recta de origen manteniéndose hasta que finaliza la simulación.

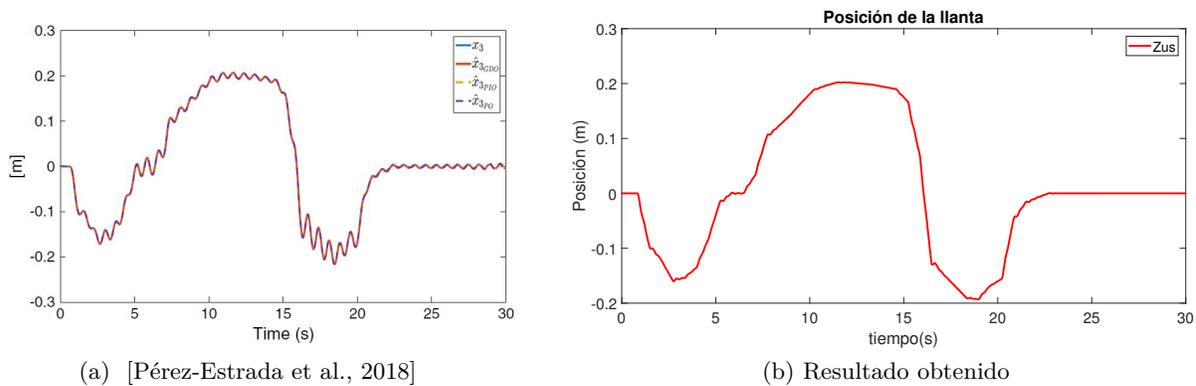


Figura 4.18: Posición de la llanta

En la Fig. 4.19 se muestra la velocidad del desplazamiento vertical \dot{z}'_{us} presentada por el chasis del vehículo. Se observa que al tener contacto con el primer bache al tener un desplazamiento vertical negativo presenta una velocidad negativa máxima de -0.2 m/seg que va aumentando debido a la trayectoria trascurrída, de tal manera que en cada momento que se presenta un cambio en la trayectoria se presentan pequeñas oscilaciones, al terminar se observa que el sistema no se detiene al instante debido a la inercia del vehículo, pasando unos segundos se estabiliza con el perfil de suelo y se mantiene en cero.

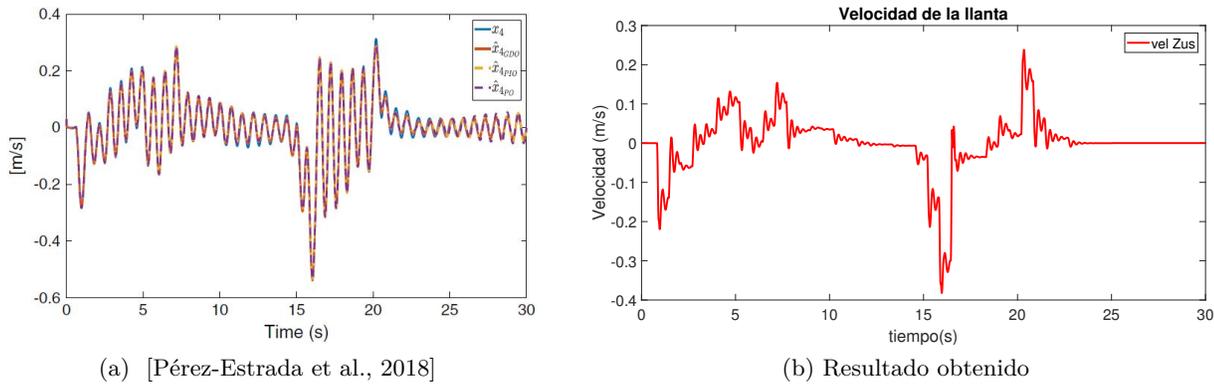


Figura 4.19: Velocidad de la llanta

Se puede observar que los estados si convergen con el perfil de suelo, debido a las grandes deformaciones del perfil, la suspensión necesita mayor fuerza de amortiguamiento para realizar el desplazamiento correcto y así reducir las oscilaciones en los cambios del recorrido, al compararlos con los resultados del artículo se observa que tienen la misma respuesta, teniendo como diferencia que el artículo [Pérez-Estrada et al., 2018] el sistema está siendo afectado por una incertidumbre paramétrica ocasionando oscilaciones, ya que el objetivo del artículo es comparar el rendimiento de los observadores, ya que al agregarle la incertidumbre paramétrica se sabe como reaccionan los observadores con el sistema en la vida real y así comprobar cual observador es mas eficaz.

4.3. Simulación del observador adaptable para la estimación de un parámetro para el sistema de una suspensión semiactiva

Objetivo: Simular el resultado de la estimación del parámetro.

La simulación se implementó en el programa MATLAB/Simulink 2017b, tomando en cuenta los valores de los parámetros (4.1). Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, con un tiempo de simulación de 10 segundos, el método de resolución fue el de Euler con un paso de integración de 0.0015s. Las respuestas de la simulación se muestran las Figs. (4.20-4.24).

En base a lo propuesto por [Besançon, 2000] al ser que las funciones que componen el observador adaptable sean globalmente Lipschitz para cualquier valor de $k_y > 0$ y $k_\theta > 0$ los valores de estimación convergerán a un valor aproximado a cero, por lo tanto, como estas funciones cumplen esa condición, se seleccionan los siguientes valores heurísticamente $k_y > 0.5$ y $k_\theta > 1.462$, ya que con estas ganancias la señal muestra menos oscilaciones.

K_y es la ganancia de corrección de la señal medida, para este caso se toma como señal medida la velocidad de la llanta, k_θ es la ganancia de corrección del valor del parámetro desconocido que en este caso es el coeficiente de rigidez de la llanta (k_t), se tomará como base el valor de $k_t = 270,000$ N/m, este valor es el proporcionado por [Tudón-Martínez et al., 2016], pero el valor obtenido por el observador adaptable se tomará como el verdadero, ya que este toma en consideración todos los factores ajenos al sistema que repercuten en el parámetro.

Utilizando las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.3mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.3mA & 7 \leq t < 10.5 \\ 0 & t \geq 10.5 \end{cases}$$

$$F_\delta(t) = \begin{cases} 400N & t \geq 0 \end{cases}$$

Tomando los valores de las entradas y el perfil de suelo Fig. 4.9, se sustituyen en las Ecs. de nuestro observador adaptable (3.5) y (3.6), obteniendo la estimación del coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$, teniendo como resultado el siguiente:

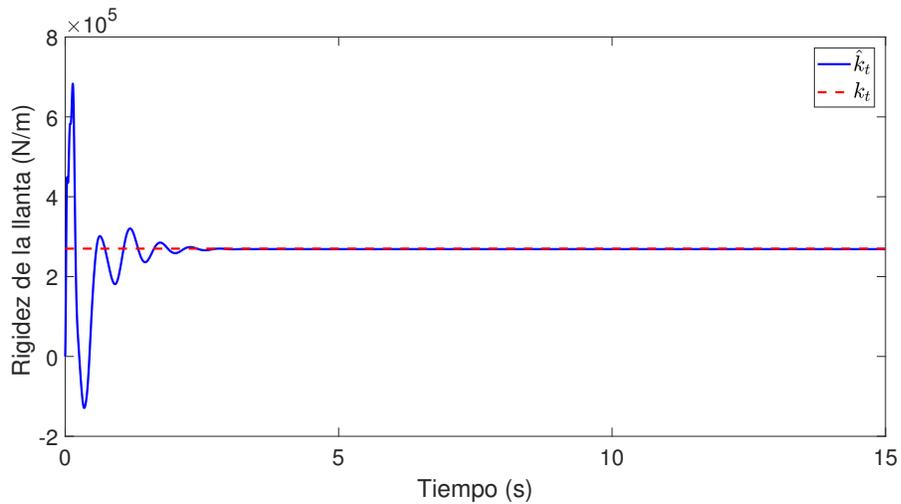


Figura 4.20: Simulación I: Rigidez de la llanta

Teniendo como resultado la convergencia del observador adaptable, en donde el error de estimación se va reduciendo a lo largo del tiempo.

En la Fig. 4.21 se observa la estimación de la posición del chasis por parte del observador adaptable con una condición inicial de $\hat{x}_2 = 3$ cm, comparándola con la posición del chasis nominal x_2 . Se observa la convergencia de las dos señales, en donde el error de estimación se va reduciendo a lo largo del tiempo.

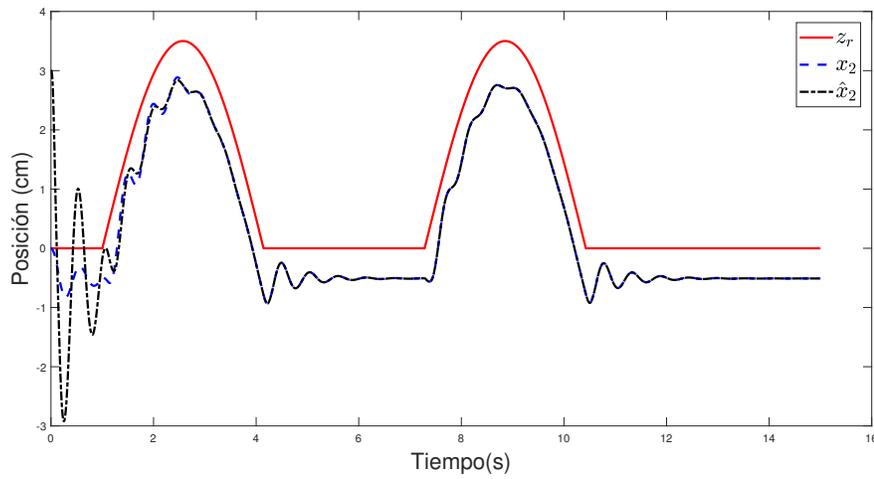


Figura 4.21: Simulación I: Comparación de posiciones del chasis

En la Fig. 4.22 se observa la estimación de la posición de la llanta por parte del observador adaptable con una condición inicial de $\hat{x}_4 = 3$ cm, comparándola con la posición de la llanta nominal x_4 . Se observa que le toma 1 segundo al \hat{x}_4 converger con la señal x_2 , teniendo la misma respuesta en el tiempo restante.

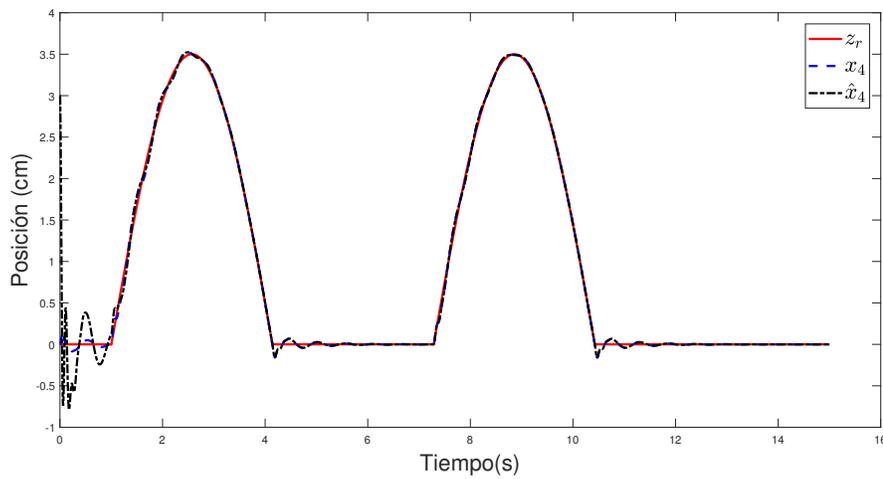


Figura 4.22: Simulación I: Comparación de posiciones de la llanta

En la Fig. 4.23 se plantea un escenario donde el vehículo presenta una llanta pochada, teniendo un valor $k_t = 165,000 \text{ N/m}$.

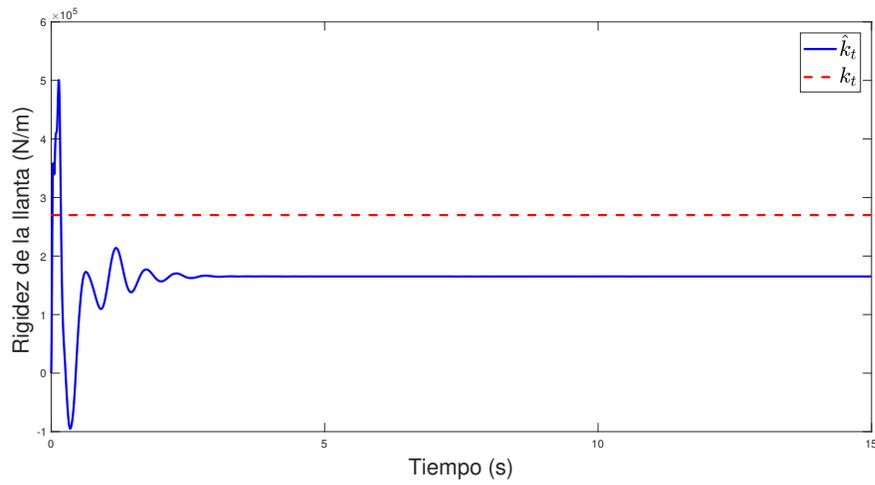


Figura 4.23: Simulación II: Rigidez de la llanta

En la Fig. 4.24 se observa la estimación de la posición del chasis al presentarse una falla por parte del observador adaptable, con una condición inicial de $\hat{x}_2 = 4 \text{ cm}$, comparándola con la posición del chasis nominal x_2 . Se observa que al tener la llanta pochada, le toma más esfuerzo al vehículo pasar los topes, ocasionando daño en el amortiguador.

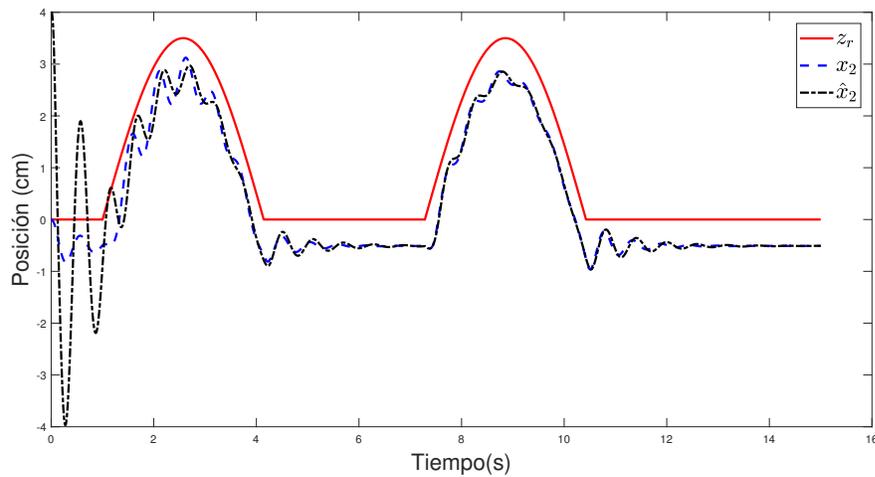


Figura 4.24: Simulación II: Comparación de posiciones del chasis

En la Fig. 4.25 se observa la estimación de la posición de la llanta al presentarse una falla por parte del observador adaptable, con una condición inicial de $\hat{x}_4 = 4$ cm, comparándola con la posición de la llanta nominal x_4 . Se observa que al tener la llanta pinchada, \hat{x}_4 presenta mayor oscilación esfuerzo al vehículo pasar los topes.

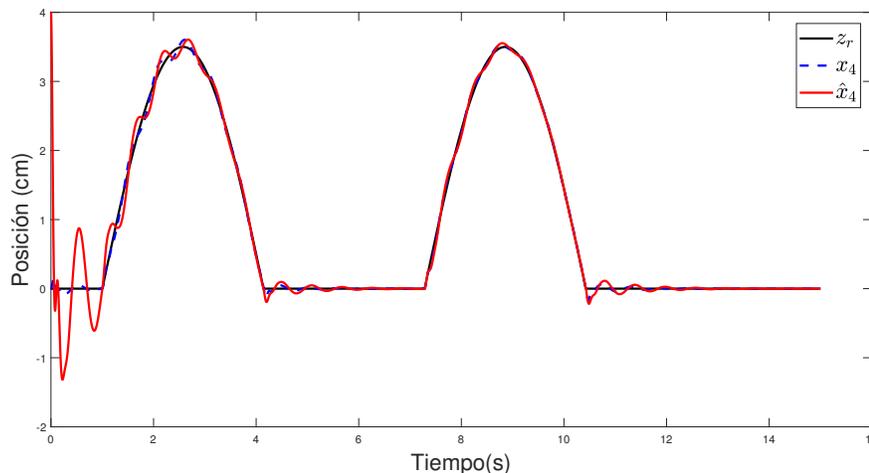


Figura 4.25: Simulación II: Comparación de posiciones de la llanta

Una vez obtenido este parámetro, al momento que el vehículo entra en funcionamiento con esa falla, observamos que hay más oscilaciones al pasar el tope ocasionando un sobre esfuerzo del amortiguador al recorrer el perfil de suelo, generando un desgaste en el amortiguador, en donde el error de estimación se va reduciendo a lo largo del tiempo.

4.4. Simulación del observador adaptable Lipschitz para la estimación de un parámetro para el sistema de una suspensión semiactiva

Objetivo: Simular el resultado de la estimación del parámetro.

La simulación se implementó en el programa MATLAB/Simulink 2017b, con un tiempo de simulación de 10 segundos, el método de resolución fue el de Euler con un paso de integración de 0.0015s, tomando en cuenta los valores de los parámetros (4.1). Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.03$, $\hat{x}_2(0) = 0.04$, $\hat{x}_3(0) = 0.01$, $\hat{x}_4(0) = 0.04$. La simulación se realizó con valores nominales, del mismo modo con las siguientes entradas.

Un perfil de suelo recto, como pueden ver en Fig. 4.26.

$$z_r(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \end{cases}$$

$$I(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

$$F_\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

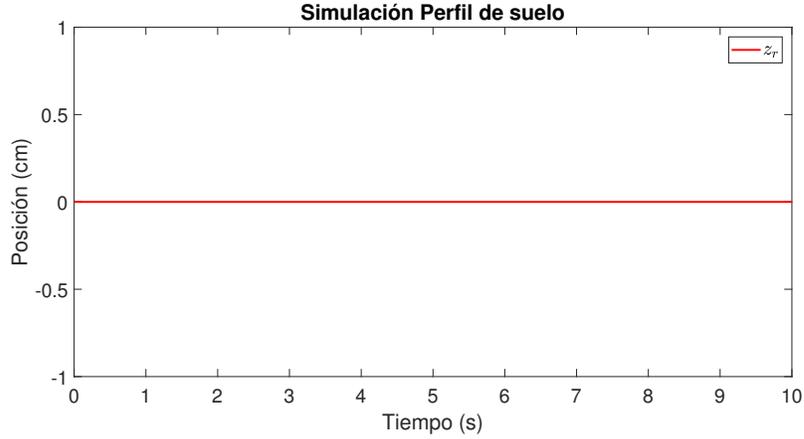


Figura 4.26: Perfil de suelo recto

Tomando en cuenta lo propuesto en [Ekramian et al., 2013] se obtuvieron las ecuaciones del modelo adaptable (3.40) y (3.41) y se diseñó el observador adaptable Ecs (3.42) y (3.43), gracias a esto podemos estimar el parámetro deseado y a su vez lograr la estimación de las variables de estado a pesar del parámetro desconocido.

Modelo adaptable:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \\ \dot{x}_4(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -6.0231 & -166.9787 & 6.0231 & 166.9787 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 25.7351 & 713.4545 & -25.7351 & -713.4545 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} + \\
 &\begin{bmatrix} 0.0181 \\ 0 \\ -0.0773 \\ 0 \end{bmatrix} I(t) + \begin{bmatrix} -0.0021 \\ 0 \\ 0.0091 \\ 0 \end{bmatrix} F_\delta(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{0-x_4(t)}{110} \right] \hat{\theta}(t)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Observador adaptable:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1(t) \\ \dot{\hat{x}}_2(t) \\ \dot{\hat{x}}_3(t) \\ \dot{\hat{x}}_4(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -6.0231 & -166.9787 & 6.0231 & 166.9787 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 25.7351 & 713.4545 & -25.7351 & -713.4545 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} 0.0181 \\ 0 \\ -0.0773 \\ 0 \end{bmatrix} I(t) + \begin{bmatrix} -0.0021 \\ 0 \\ 0.0091 \\ 0 \end{bmatrix} F_\delta(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \left[\frac{0-x_4(t)}{110} \right] \hat{\theta}(t) - \\ &L \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = 150 \left[\frac{-x_4(t)}{m_{us}} \right] K \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} \right) \quad (4.4)$$

donde:

$$\hat{x}(t) = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_3(t) \\ \hat{x}_4(t) \end{bmatrix} \quad u(t) = \begin{bmatrix} I(t) \\ F_\delta(t) \\ z_r(t) \end{bmatrix} \quad y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{bmatrix}$$

Para el cálculo de las ganancias del observador se resolvió la LMI que se obtuvo del análisis de estabilidad de Lyapunov (3.54), mediante el Yalmip de Matlab [Löfberg, 2019] es un software libre.

Una vez obtenidas las matrices P , ξ de la solución la LMI, se obtiene el valor de las ganancias del observador.

%%Entradas

```
A=[-b1/ms -c1/ms b1/ms c1/ms;1 0 0 0; b1/mus c1/mus -b1/mus -c1/mus;0 0 1 0 ];
C=[1 0 0 0;0 0 1 0;0 1 0 -1];
B=[0;0;1;0];
```

%%LMI

```
P=sdpvar(4,4);
zhi=sdpvar(1);
```

```
LMI=[A'*P+P*A-2*zhi*C'*C P;P -eye(4)];
```

```
s=[P>0,zhi>0,LMI<0];
    solvesdp(s);
    P =double(P); zhi=double(zhi);
```

```
L=-zhi*inv(P)*C'
K=B'*P*pinv(C)
```

Obteniendo las siguientes ganancias:

$$L = \begin{bmatrix} -139.1653 & 208.0810 & -23.1462 \\ -38.5440 & 273.1226 & -307.5176 \\ 208.0810 & -990.5141 & 100.0701 \\ -15.3978 & 173.0526 & -111.1465 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$K = \begin{bmatrix} 512350 & 356130 & 121090 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$P > 0$ y $Q > 0$, entonces, la estabilidad del observador se garantiza, al asegurar que $\dot{V}(t) \leq 0$ [Ekramian et al., 2013].

En base a las Ecs. (4.1), (4.2) y (4.3), se estima el coeficiente de rigidez de la llanta " k_t ", obteniendo el siguiente resultado:

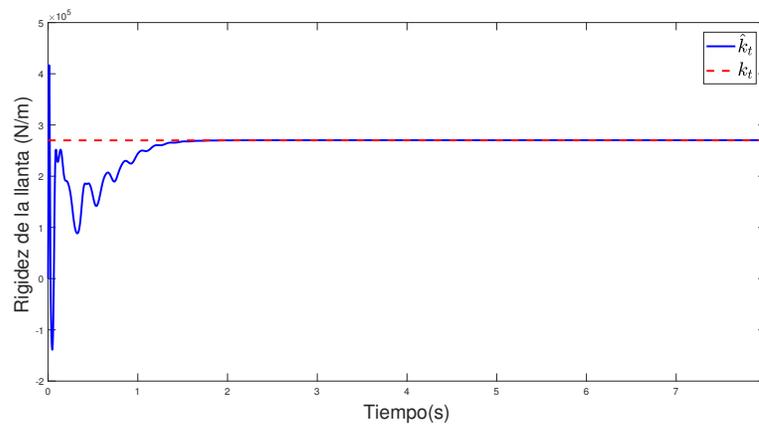


Figura 4.27: Simulación III: Rigidez de la llanta

Comparación de los estados del sistema y el del observador

Objetivo: Comparar la respuesta del sistema con los resultados del observador adaptable Lipschitz. Tomando en cuenta el valor del parámetro estimado Fig. 4.27 obtenido en el diseño del observador adaptable Lipschitz 3.42, se comparará el sistema con la respuesta del observador diseñado. La simulación se implementó en el programa MATLAB/Simulink 2017b, con un tiempo de simulación de 10 segundos, el método de resolución fue el de Euler con un paso de integración de 0.0015 segundos, tomando en cuenta los valores de los parámetros (4.1).

Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.03, \hat{x}_2(0) = 0.04, \hat{x}_3(0) = 0.01, \hat{x}_4(0) = 0.04$, las respuestas de la simulación se muestran en las Figs. (4.28-4.31).

En la Fig. 4.28 se observa el comportamiento de la posición vertical del chasis al tener contacto con el perfil del suelo Fig. 4.26. El sistema nominal no presenta anomalía desde que inicia la simulación se mantiene en cero hasta su finalización, en comparación del observador al tener diferentes condiciones iniciales le toma 2 segundos en converger con el sistema, obteniendo el siguiente resultado.

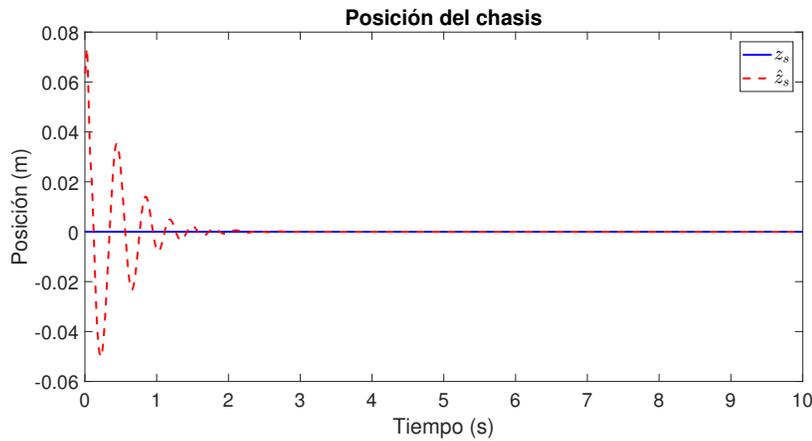


Figura 4.28: Simulación III: Posición vertical del chasis

En la Fig. 4.29 se observa el comportamiento de la posición vertical de la llanta al tener contacto con el perfil del suelo Fig. 4.26. El sistema nominal no presenta anomalía; desde que inicia la simulación se mantiene en cero hasta su finalización, en comparación del observador que al tener diferentes condiciones iniciales le toma 2.3 segundos en converger con el sistema, obteniendo el siguiente resultado.

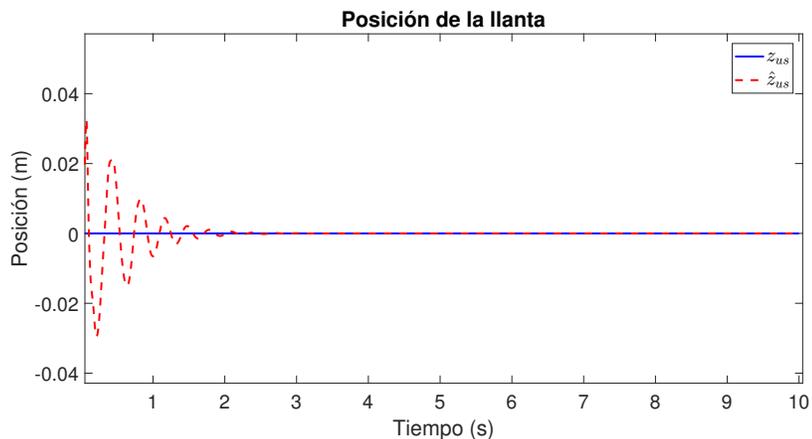


Figura 4.29: Simulación III: Posición vertical de la llanta

En la Fig. 4.30 se observa el comportamiento de la velocidad vertical del chasis al tener contacto con el perfil del suelo Fig. 4.26. Al no presentarse un desplazamiento o una alteración en el recorrido, no hay esfuerzo en el camino por lo tanto no hay velocidad, manteniéndose en cero, en comparación del observador al tener diferentes condiciones iniciales le toma 2.5 segundos en converger con el sistema, obteniendo el siguiente resultado.

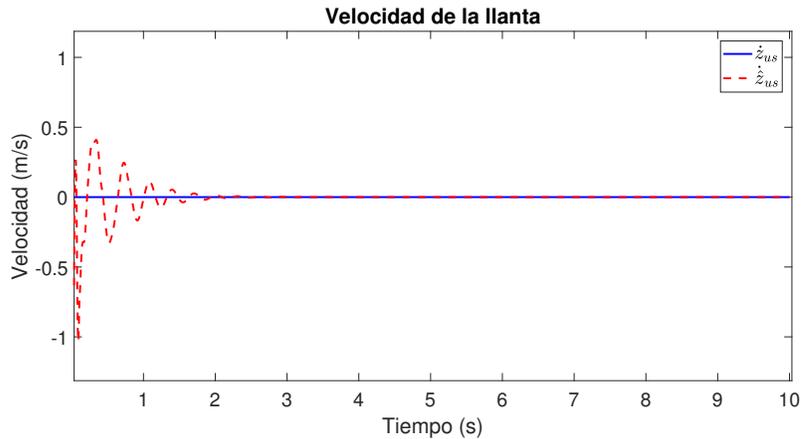


Figura 4.30: Simulación III: Velocidad vertical del chasis

En la Fig. 4.31 se observa el comportamiento de la velocidad vertical de la llanta al tener contacto con el perfil del suelo Fig. 4.26. Le toma 2.5 segundos en converger con la nominal, al no presentarse una alteración en el recorrido, no hay esfuerzo en el camino por lo tanto no hay velocidad, manteniéndose en cero, obteniendo el siguiente resultado.

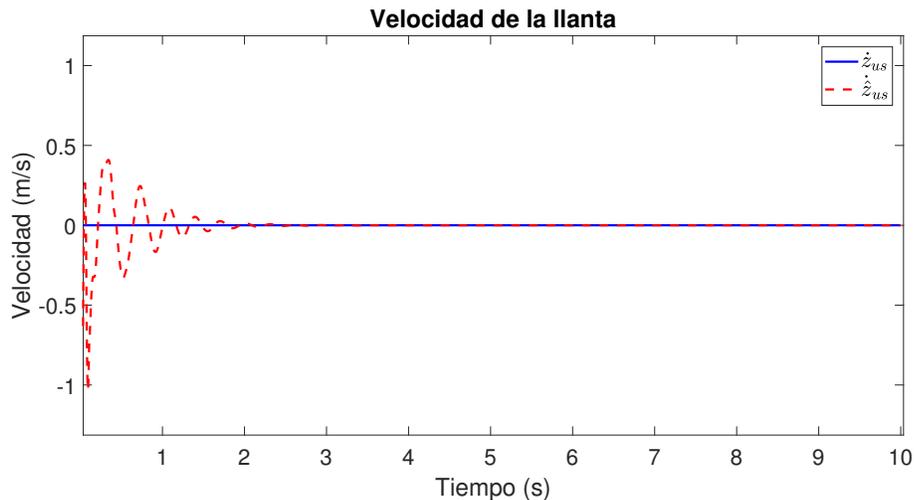


Figura 4.31: Simulación III: Velocidad vertical de la llanta

Se concluye que el observador adaptable Lipschitz, cumple con su función ya que al estimar el parámetro $k_t(t)$, logra estimar las variables de estados del sistema, teniendo un tiempo de convergencia muy pequeña.

4.5. Escenarios de fallas en suspensiones

A continuación se presentan varios escenarios de fallas en el cual se hace presente en el observador, y así detectar en que momento se presenta una falla.

Tabla 4.2: Escenario de fallas.

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
$k_t(t)$ disminuye gradualmente	$k_t(t)$ disminuye gradualmente	$k_t(t)$ disminuye gradualmente
Incremento en $F_\delta(t)$	Incremento en $F_\delta(t)$	Incremento en $F_\delta(t)$ en el segundo tope
Llanta ponchada ($k_t(t)$)	Llanta ponchada ($k_t(t)$)	Llanta ponchada ($k_t(t)$)

Se presentan 3 escenarios, uno para cada tipo de tope, donde se realizarán 3 pruebas a cada una.

Simulación del primer escenario cuando se presenta un tope Fig. 4.4 observando el comportamiento del sistema al presentar una serie de fallas en un determinado tiempo.

Prueba 1. Detección de una llanta ponchada.

Objetivo: Determinar si una llanta se encuentra en buenas condiciones o presenta una falla de falta de aire.

Se lleva a cabo la simulación de una llanta ponchada variando el coeficiente de rigidez de la llanta k_t . El valor nominal de este coeficiente se considera de $k_t = 270,000 \text{ N/m}$. A partir de $t = 3s$, se considera que la llanta empieza a desinflarse hasta el segundo 6 donde mantiene una rigidez constante. Esto se simula disminuyendo gradualmente el coeficiente de rigidez hasta un valor de $k_t = 220,000 \text{ N/m}$. Se implementa el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42) y (3.43), con la finalidad de estimar k_t . Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.04$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.04$, $\hat{x}_4(0) = 0.01$, el parámetro k_t tiene una condición inicial de $200,000 \text{ N/m}$.

Utilizando las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

$$F_\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

Se estima el coeficiente de rigidez de la llanta k_t obteniendo el siguiente resultado Fig. 4.32:

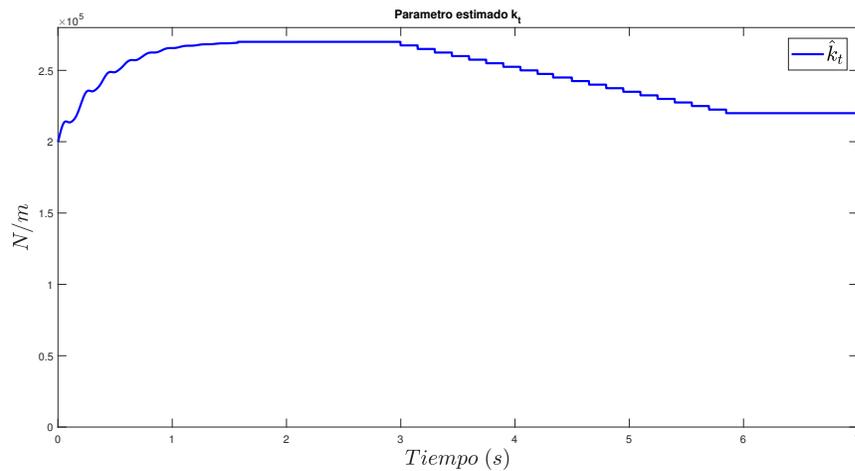


Figura 4.32: Escenario 1 Prueba 1: Rigidez de la llanta

Observamos que la rigidez de la llanta va disminuyendo de forma gradual, a partir del segundo 3 alcanzando una $k_t = 220,000 N/m$, para después mantenerse constante en ese valor. Una vez obteniendo esta nueva $k_t(t)$ Fig. 4.32, observamos el comportamiento de las posiciones utilizando la nueva $k_t(t)$ teniendo las siguientes respuestas.

En la Fig. 4.33 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con el perfil de suelo.

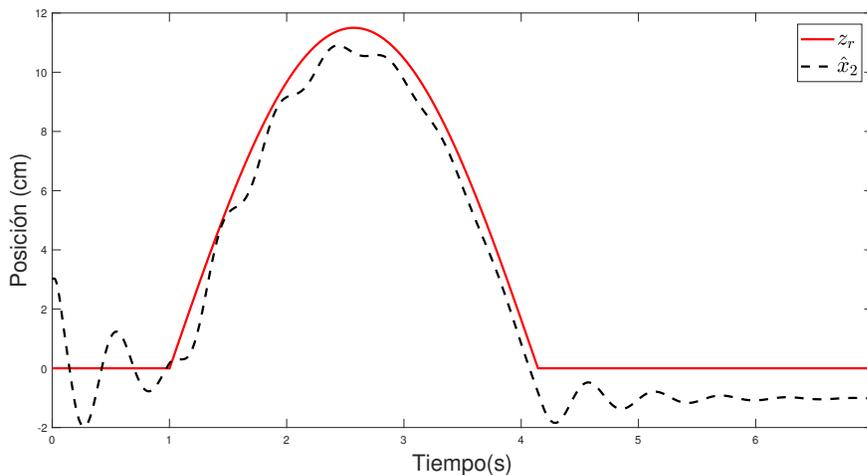


Figura 4.33: Escenario 1 Prueba 1: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de $k_t(t)$, no se mantiene en cero, ya que al irse desinflando la llanta $k_t(t)$ se va afectado la posición vertical del chasis ya que su posición va disminuyendo tomándole más esfuerzo al pasar el tope, una vez termina el tope y se queda el $k_t(t)$ constante, el recorrido tiene un decremento de 1 cm.

En la Fig. 4.34 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

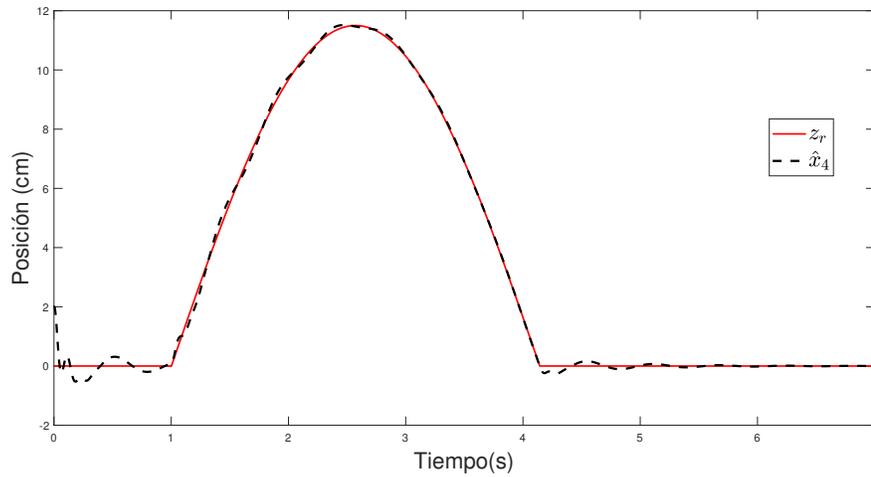


Figura 4.34: Escenario 1 Prueba 1: Posición de la llanta

En la Fig. 4.35 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, visualizando la deflexión del amortiguador con respecto al decremento de $k_t(t)$.

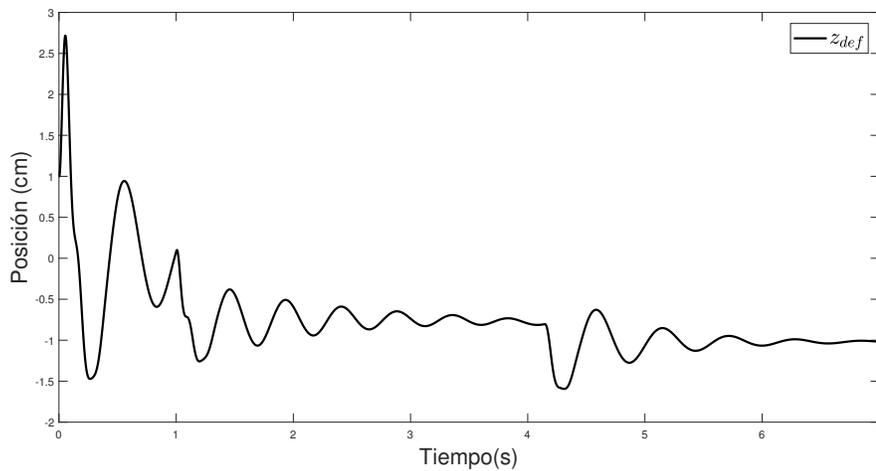


Figura 4.35: Escenario 1 Prueba 1: Comparación de posiciones

Se visualiza que el observador al verse afecto por el decremento de $k_t(t)$, no se mantiene en cero, ya que al pasar el tope sufren un desplazamiento negativo como se puede apreciar, las posiciones no se mantienen en sus condiciones originales, sufriendo un decremento en el amortiguador ocasionado por dicha pérdida.

Prueba 2. Detección de una variación en la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento cuando existe un incremento en el peso del vehículo.

El escenario siguiente muestra un exceso de carga en el vehículo, ocasionando que la posición del chasis z_s disminuya, afectando al amortiguador. En esta simulación, se variará la fuerza en el amortiguador, con la finalidad de simular un incremento de la carga en el vehículo. Se utilizará el observador adaptable Lipschitz dado por las ecuaciones (3.42) y (3.43) con la finalidad de estimar (detectar) un cambio en la fuerza de amortiguamiento. Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.03$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.02$, $\hat{x}_4(0) = 0.02$.

La entrada de corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

En la Fig. 4.36 se observa el perfil de variación de $F_\delta(t)$ durante un tiempo de simulación de $t = 7s$. Se visualiza que la fuerza de amortiguamiento cambia de 0 N a 800 N de forma escalar desde el segundo 1 que inicia la simulación.

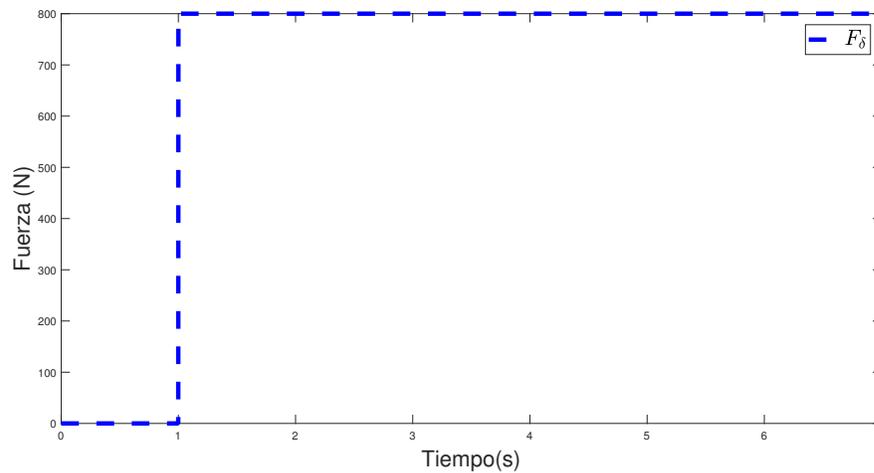


Figura 4.36: Escenario 1 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"

En la Fig. 4.37 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con el perfil de suelo.

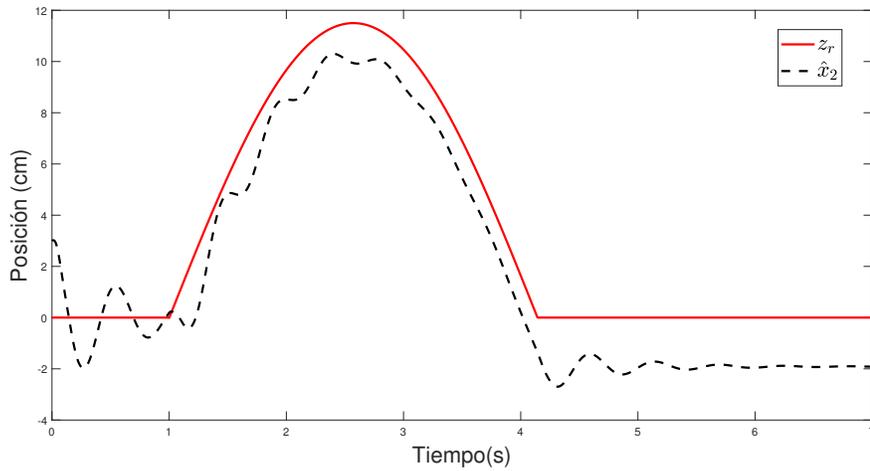


Figura 4.37: Escenario 1 Prueba 2: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al presentarse un aumento en $F_\delta(t)$ ocasiona un decremento de 1.9 cm, en la posición vertical del amortiguador, una vez termina el tope y se queda el $F_\delta(t)$ constante.

En la Fig. 4.38 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

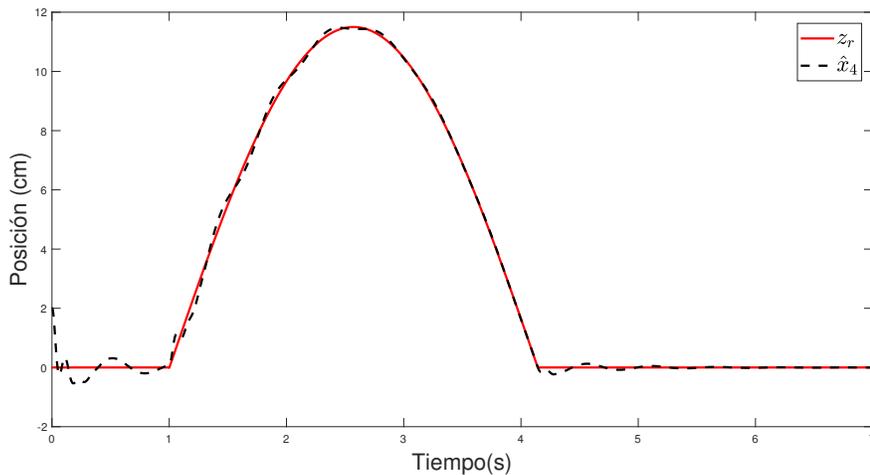


Figura 4.38: Escenario 1 Prueba 2: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_\delta(t)$, ya que la llanta no tiene falla alguna.

En la Fig. 4.39 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

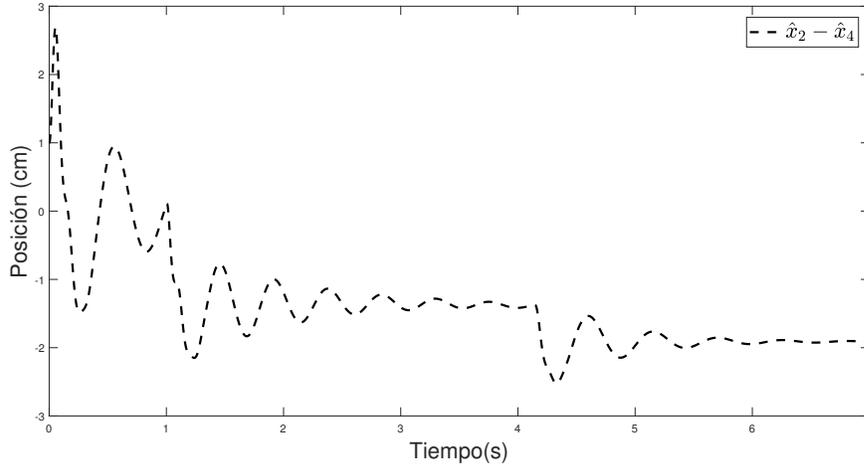


Figura 4.39: Escenario 1 Prueba 2: Comparación de posiciones

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento., en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_\delta(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continua con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_\delta(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Prueba 3. Variación de la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$ y llanta ponchada.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento y simultáneamente supervisar el estado de la llanta.

Esta simulación combina las acciones presentadas en las dos simulaciones anteriores: estimar la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$ ante cambios de carga presentado en el segundo 1 y supervisar el estado de la llanta mediante la estimación de parámetro k_t decrementando en el segundo 3. Para la estimación de las variables de estado del sistema, se utiliza el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42)-(3.43). Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.03$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.02$, $\hat{x}_4(0) = 0.02$.

La entrada de corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & t \geq 4 \end{cases}$$

En la figura 4.40 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con el perfil de suelo.

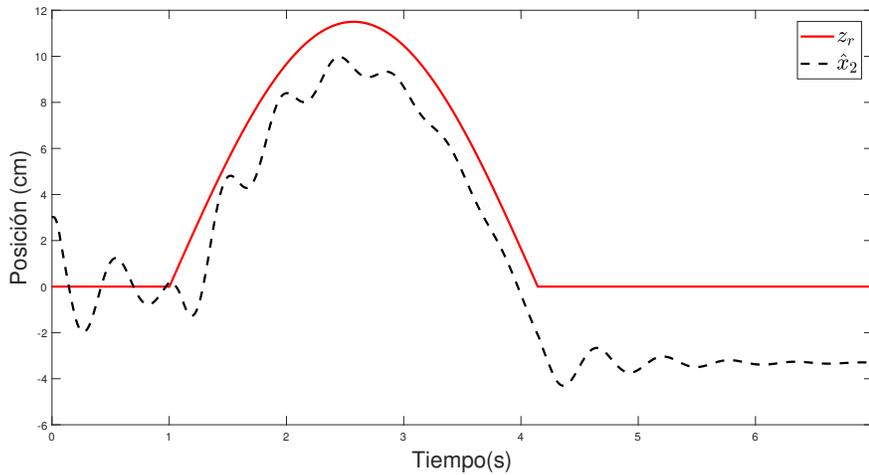


Figura 4.40: Escenario 1 Prueba 3: Posición del chasis

Se visualiza el comportamiento de la posición del chasis, al primer segundo que tiene contacto con el tope, al contar con la llanta pinchada $k_t(t)$ y el aumento de la carga $F_\delta(t)$, le toma más esfuerzo pasar el tope, ocasionando un decremento de 3.2 cm, en la posición vertical del amortiguador.

En la Fig. 4.41 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

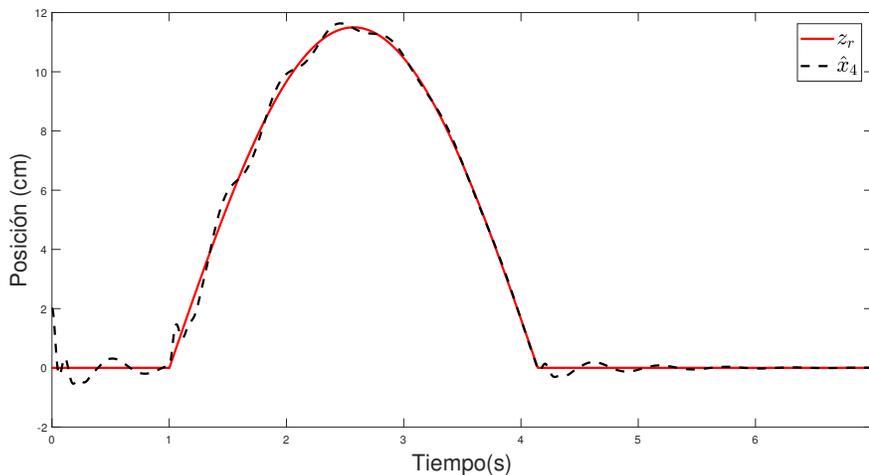


Figura 4.41: Escenario 1 Prueba 3: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_\delta(t)$, pero si por el decremento de rigidez de la llanta, ocasionando que el vehículo realice más esfuerzo para pasar el tope.

En la Fig. 4.42 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga y el decremento de $k_t(t)$, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

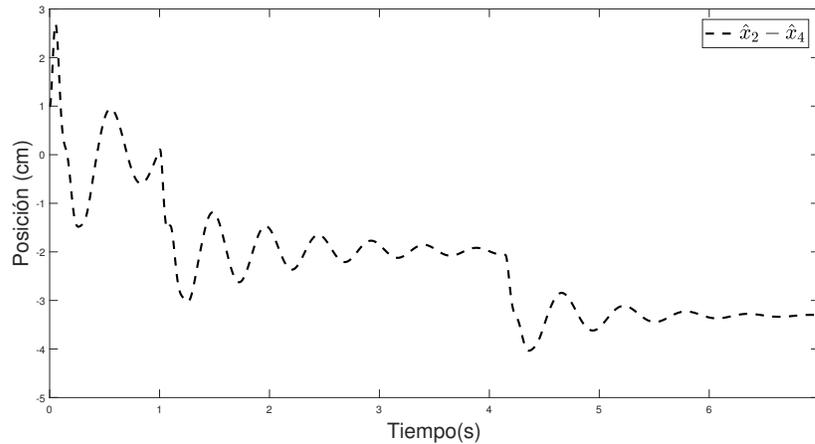


Figura 4.42: Escenario 1 Prueba 3: Comparación de posiciones

Se visualiza que por las fallas simuladas en el sistema, ocasiona una diferencia negativa, indicando que nuestro chasis ya está chocando con la llanta, ocasionando un daño en el amortiguador.

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento., en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_\delta(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continua con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_\delta(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Simulación del segundo escenario cuando se presenta tres topes Fig. 4.7 observando el comportamiento del sistema al presentar una serie de fallas en un determinado tiempo.

Prueba 1. Detección de una llanta pinchada.

Objetivo: Determinar si una llanta se encuentra en buenas condiciones o presenta una falla de falta de aire.

Se lleva a cabo la simulación de una llanta pinchada variando el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$. El valor nominal de este coeficiente se considera de $k_t = 270,000; N/m$. A partir de $t = 3s$, se considera que la llanta empieza a desinflarse. Esto se simula disminuyendo gradualmente el coeficiente de rigidez hasta un valor de $k_t = 170,000 N/m$. Se implementa el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42) y (3.43), con la finalidad de estimar $k_t(t)$. Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.04$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.04$, $\hat{x}_4(0) = 0.01$, el parámetro k_t tiene una condición inicial de $180,000 N/m$. El tiempo de simulación es de 20 segundos.

Utilizando las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.5mA & 7 \leq t < 11 \\ 0 & 11 \leq t < 14 \\ 1.5mA & 14 \leq t < 17 \\ 0 & t \geq 17 \end{cases}$$

$$F_{\delta}(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

Se estima el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$ obteniendo el siguiente resultado:

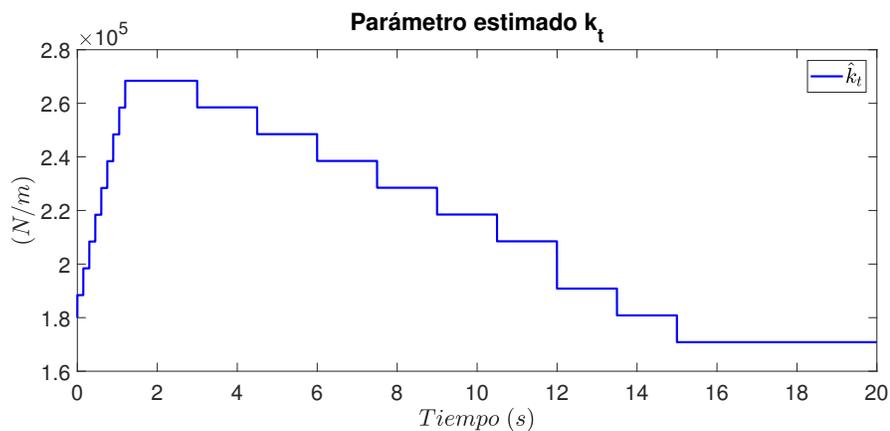


Figura 4.43: Escenario 2 Prueba 1: Rigidez de la llanta

Observamos que la rigidez de la llanta va disminuyendo de forma gradual, a partir del segundo 3 alcanzando una $k_t = 170,000 N/m$, para después mantenerse constante en ese valor. Una vez obteniendo esta nueva k_t Fig. 4.43, observamos el comportamiento de las posiciones utilizando la nueva $k_t(t)$ teniendo las siguientes respuestas.

En la Fig. 4.44 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con la respuesta del sistema sin falla.

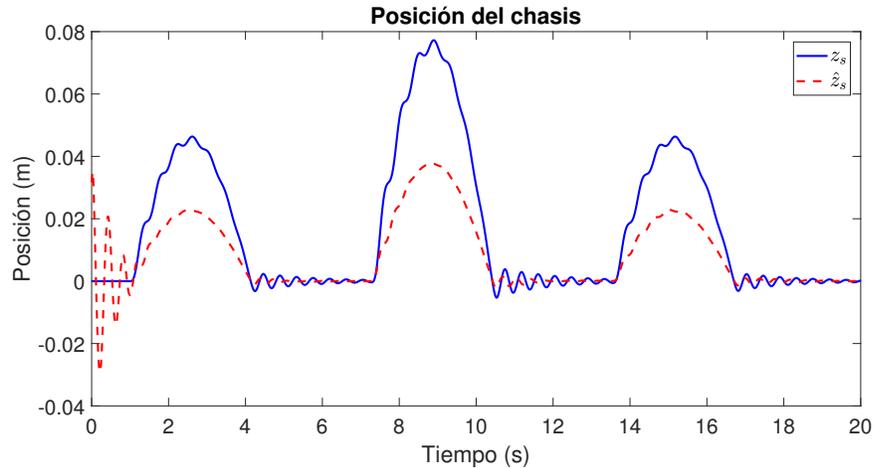


Figura 4.44: Escenario 2 Prueba 1: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de $k_t(t)$, no se mantiene en cero, ya que al ir ponchándose la llanta $k_t(t)$ se ve afectado la posición vertical del chasis ya que su posición va disminuyendo tomándole más esfuerzo al pasar cada uno de los topes, una vez termina el tope y se queda el $k_t(t)$ constante, ocasionándole al amortiguador un mayor esfuerzo, por la variante de $k_t(t)$ el resto de la simulación queda oscilando.

En la Fig. 4.45 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

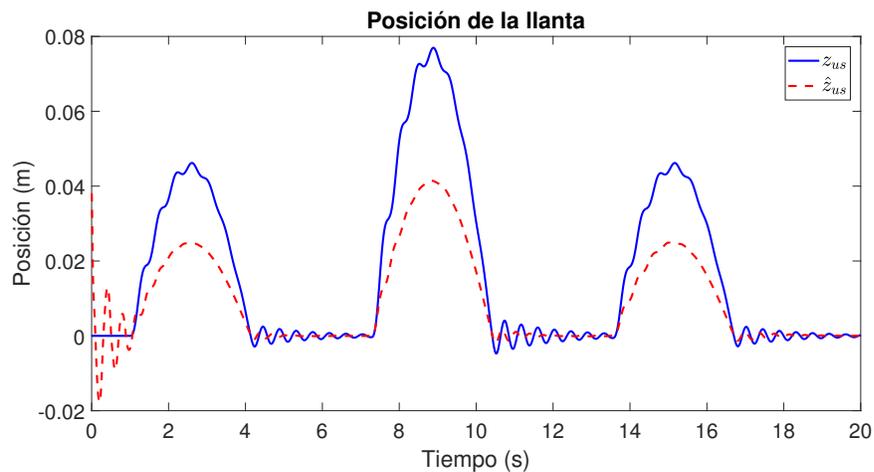


Figura 4.45: Escenario 2 Prueba 1: Posición de la llanta

Se visualiza que el observador le toma un segundo converger con el sistema nominal, al ir perdiendo aire ocasiona un decremento en la posición de la llanta, al pasar cada uno de los topes, ya que necesita más esfuerzo para pasar, por el nuevo $k_t(t)$ que afecta al observador al finalizar el paso de los topes continúa oscilando en un perfil recto.

En la Fig. 4.46 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, viendo cómo se decrementa ocasionado por la $k_t(t)$, teniendo la siguiente respuesta.

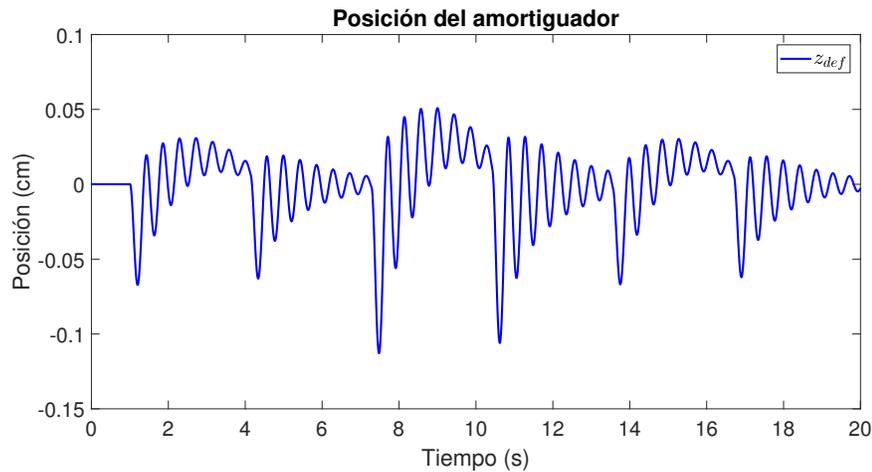


Figura 4.46: Escenario 2 Prueba 1: Comparación de posiciones

Se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de k_t , no se mantiene en cero, ya que al pasar cada uno de los topes sufren un desplazamiento negativo como se puede apreciar, las posiciones no se mantienen en sus condiciones originales, sufren un decremento ocasionado por dicha pérdida afectando al pistón del amortiguador.

Prueba 2. Detección de una variación en la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento cuando existe un incremento en el peso del vehículo.

El escenario siguiente muestra un exceso de carga en el vehículo, ocasionando que la posición del chasis z_s disminuya, afectando al amortiguador. En esta simulación, se variará la fuerza en el amortiguador, con la finalidad de simular un incremento de la carga en el vehículo. Se utilizará el observador adaptable Lipschitz dado por las ecuaciones (3.42) y (3.43) con la finalidad de estimar (detectar) un cambio en la fuerza de amortiguamiento.

La entrada de corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.5mA & 7 \leq t < 11 \\ 0 & 11 \leq t < 14 \\ 1.5mA & 14 \leq t < 17 \\ 0 & t \geq 17 \end{cases}$$

En la Fig. 4.47 se observa el perfil de variación de $F_\delta(t)$ durante un tiempo de simulación de $t = 20s$. Se visualiza que la fuerza de amortiguamiento cambia de 0 N a 1000 N de forma escalar pasando el segundo 4 que inicia la simulación. Las condiciones iniciales del sistema y del observador, son las mismas que en la simulación anterior.

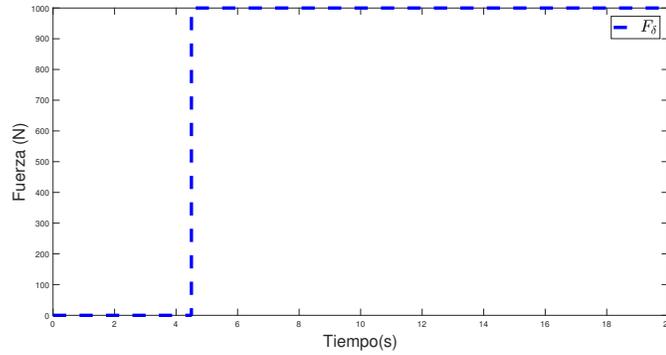


Figura 4.47: Escenario 2 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"

En la Fig. 4.48 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con el perfil de suelo.

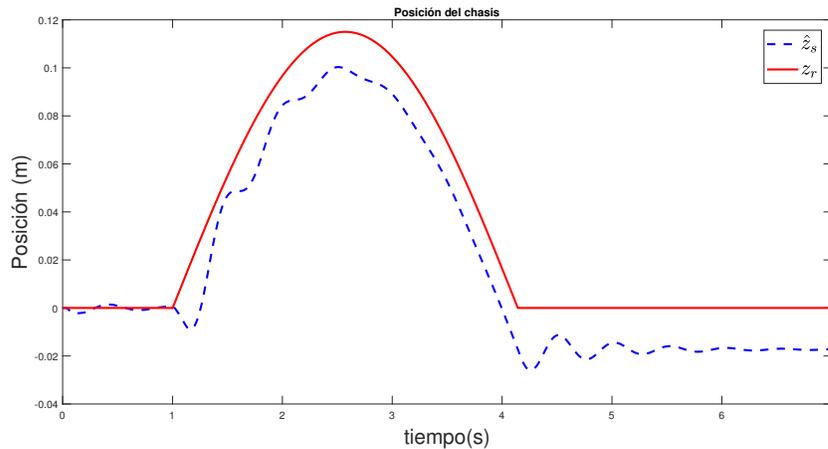


Figura 4.48: Escenario 2 Prueba 2: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al presentarse un aumento en $F_\delta(t)$ ocasiona un decremento de 0.019 m, en la posición vertical del amortiguador, una vez termina el tope y se queda el $F_\delta(t)$ constante.

En la Fig. 4.49 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

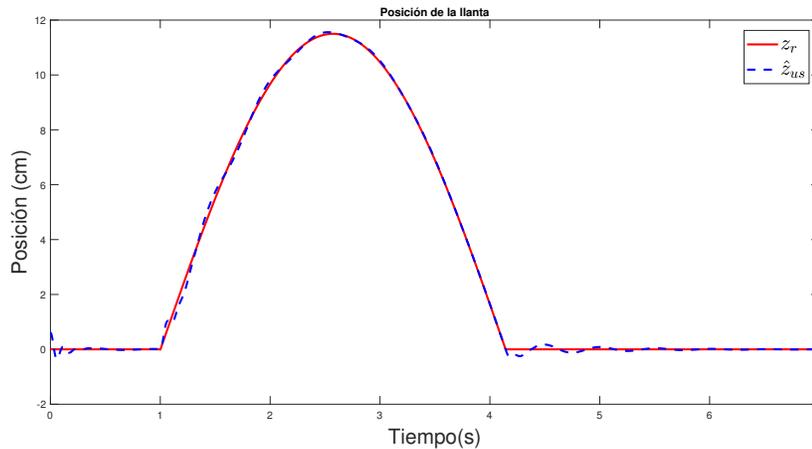


Figura 4.49: Escenario 2 Prueba 2: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_\delta(t)$, ya que la llanta no tiene falla alguno.

En la Fig. 4.50 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

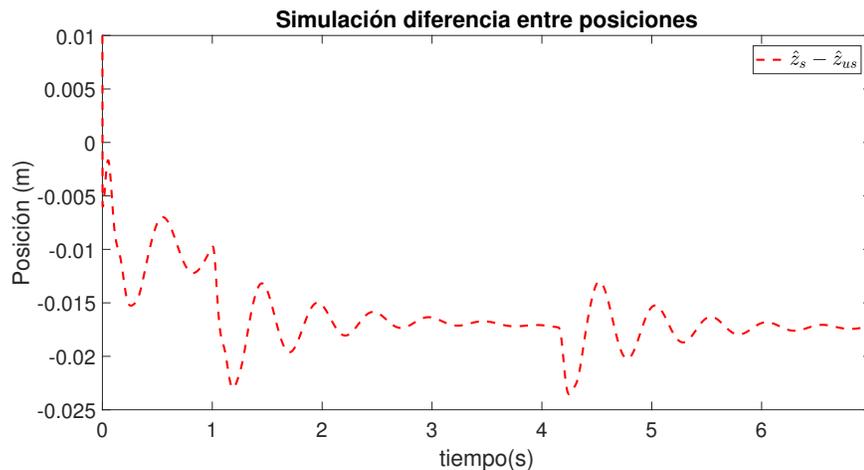


Figura 4.50: Escenario 2 Prueba 2: Comparación de posiciones

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento., en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_\delta(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continúa con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_\delta(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Prueba 3. Variación de la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$ y llanta pinchada.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento y simultáneamente supervisar el estado de la llanta.

Esta simulación combina las acciones presentadas en las dos simulaciones anteriores: estimar la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$ ante cambios de carga y supervisar el estado de la llanta mediante la estimación de parámetro k_t . Para la estimación de las variables de estado del sistema, se utiliza el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42) -(3.43).

En la Fig. 4.51 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con la respuesta del sistema.

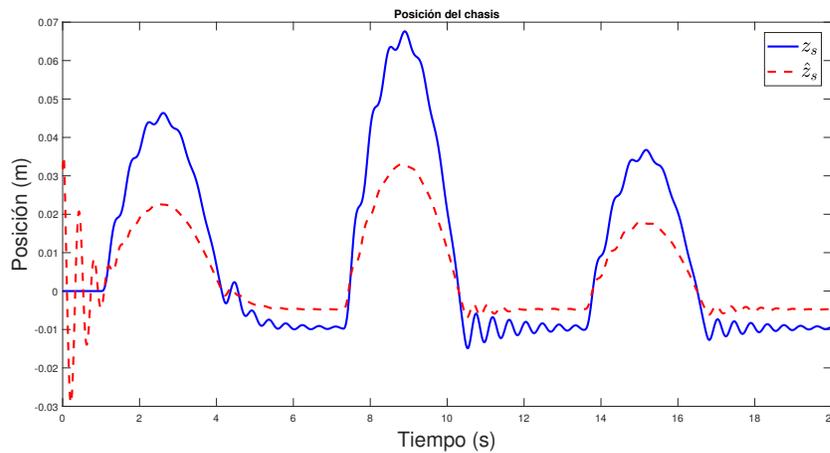


Figura 4.51: Escenario 2 Prueba 3: Posición del chasis

Se visualiza el comportamiento de la posición del chasis, al primer segundo que tiene contacto con el tope, al contar con la llanta pinchada $k_t(t)$ y el aumento de la carga $F_\delta(t)$, le toma mas esfuerzo pasar el tope, ocasionando un decremento de 0.019 m, en la posición vertical del amortiguador.

En la Fig. 4.52 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

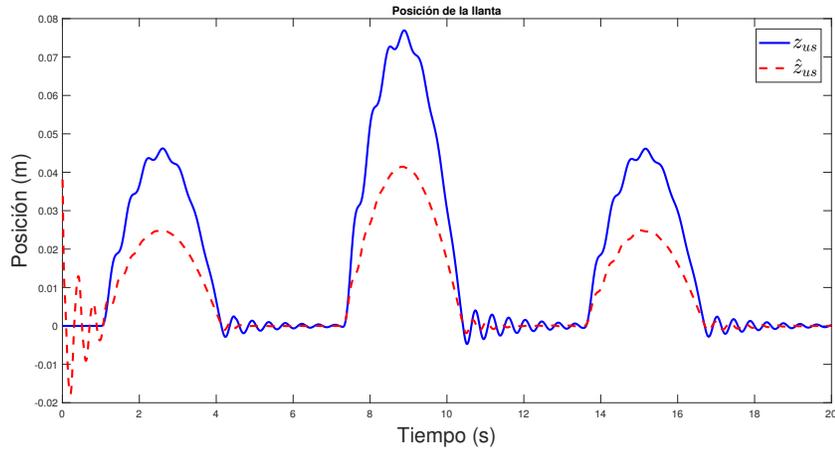


Figura 4.52: Escenario 2 Prueba 3: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_{\delta}(t)$, pero si por el decremento de rigidez de la llanta, ocasionando que el vehículo realice mas esfuerzo para pasar el tope.

En la Fig. 4.53 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga y el decremento de $k_t(t)$, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

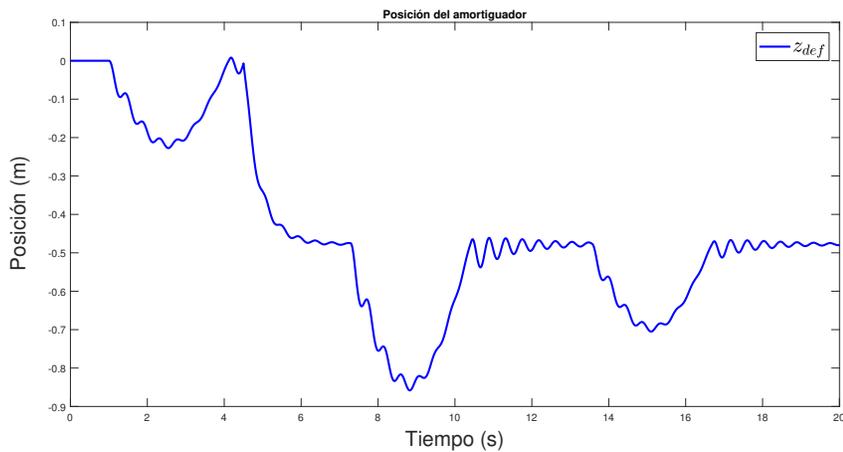


Figura 4.53: Escenario 2 Prueba 3: Comparación de posiciones

Se visualiza que por las fallas simuladas en el sistema, ocasiona una diferencia negativa, indicando que nuestro chasis ya está chocando con la llanta, ocasionando un daño en el amortiguador.

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento., en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_{\delta}(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continua con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_{\delta}(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Simulación del tercer escenario cuando se presentan dos reductores Fig. 4.9 observando el comportamiento del sistema al presentar una serie de fallas en un determinado tiempo.

Prueba 1. Detección de una llanta ponchada.

Objetivo: Determinar si una llanta se encuentra en buenas condiciones o presenta una falla de falta de aire.

Se lleva a cabo la simulación de una llanta ponchada variando el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$. El valor nominal de este coeficiente se considera de $k_t = 270,000; N/m$. A partir de $t = 3s$, se considera que la llanta empieza a desinflarse. Esto se simula disminuyendo gradualmente el coeficiente de rigidez hasta un valor de $k_t = 219,000 N/m$. Se implementa el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42) y (3.43), con la finalidad de estimar $k_t(t)$. Las condiciones iniciales del sistema fueron; $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, las condiciones iniciales del observador fueron: $\hat{x}_1(0) = 0.04$, $\hat{x}_2(0) = 0.03$, $\hat{x}_3(0) = 0.04$, $\hat{x}_4(0) = 0.01$, el parámetro k_t tiene una condición inicial de $150,000 N/m$. Tiempo de simulación 15 segundos.

Utilizando las siguientes entradas:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.5mA & 7 \leq t < 11 \\ 0 & t \geq 11 \end{cases}$$

$$F_{\delta}(t) = \begin{cases} 0 & t \geq 0 \end{cases}$$

Se estima el coeficiente de rigidez de la llanta $k_t(t)$ obteniendo el siguiente resultado:

Observamos que la rigidez de la llanta va disminuyendo de forma gradual, a partir del segundo 3 alcanzando una $k_t = 220,000 N/m$, para después mantenerse constante en ese valor. Una vez obteniendo está nueva k_t Fig. 4.54, observamos el comportamiento de las posiciones utilizando la nueva k_t teniendo las siguientes respuestas.

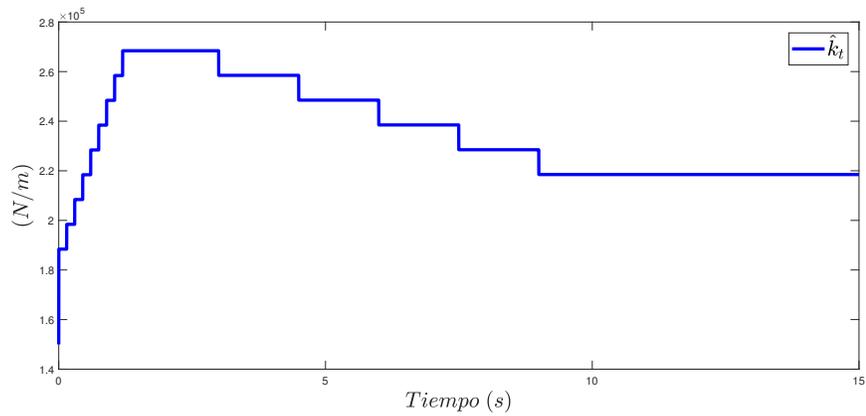


Figura 4.54: Escenario 3 Prueba 1: Rigidez de la llanta

En la Fig. 4.55 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con la respuesta del sistema sin falla.

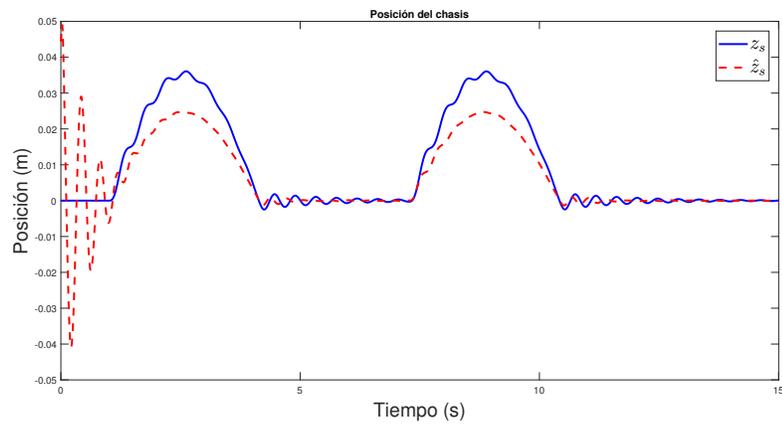


Figura 4.55: Escenario 3 Prueba 1: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de $k_t(t)$, no se mantiene en cero, ya que al ir ponchándose la llanta $k_t(t)$ se ve afectado la posición vertical del chasis ya que su posición va disminuyendo tomándole más esfuerzo al pasar cada uno de los topes, una vez termina el tope y se queda el $k_t(t)$ constante, ocasionándole al amortiguador un mayor esfuerzo, por la variante de $k_t(t)$ el resto de la simulación queda oscilando.

En la Fig. 4.56 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

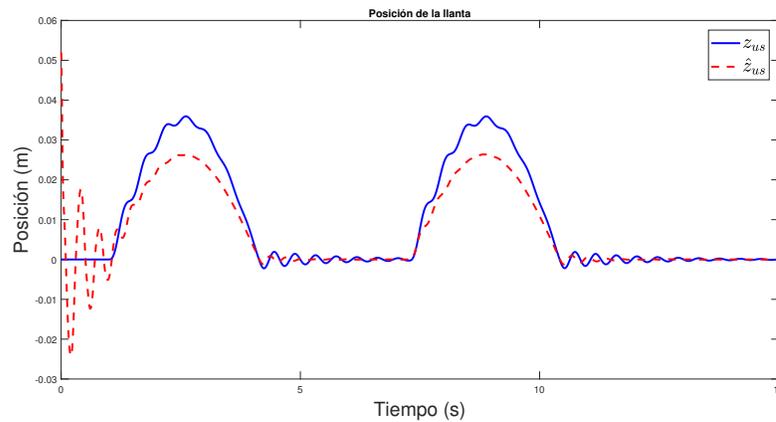


Figura 4.56: Escenario 3 Prueba 1: Posición de la llanta

Se visualiza que el observador le toma un segundo converger con el sistema nominal, al ir perdiendo aire ocasiona un decremento en la posición de la llanta, al pasar cada uno de los topes, ya que necesita más esfuerzo para pasar, por el nuevo $k_t(t)$ que afecta al observador al finalizar el paso de los topes continúa oscilando en un perfil recto.

En la Fig. 4.57 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, visualizando como se decrementa la deflexión del amortiguador al momento que pasa por los topes, teniendo la siguiente respuesta.

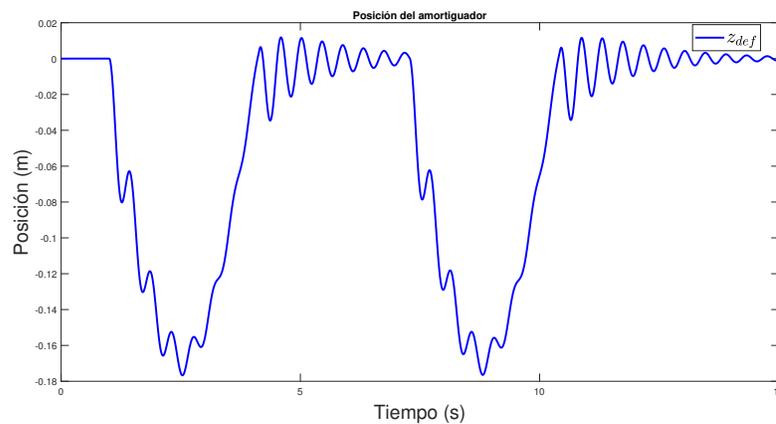


Figura 4.57: Escenario 3 Prueba 1: Comparación de posiciones

Se visualiza que el observador al tener contacto con el decremento de k_t , no se mantiene en cero, ya que al pasar cada uno de los topes sufren un desplazamiento negativo como se puede apreciar, las posiciones no se mantienen en sus condiciones originales, sufren un decremento ocasionado por dicha pérdida afectando al pistón del amortiguador.

Prueba 2. Detección de una variación en la fuerza de amortiguamiento $F_\delta(t)$.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento cuando existe un incremento en el peso del vehículo.

El escenario siguiente muestra un exceso de carga en el vehículo, ocasionando que la posición del chasis z_s disminuya, afectando al amortiguador. En esta simulación, se variará la fuerza en el amortiguador, con la finalidad de simular un incremento de la carga en el vehículo. Se utilizará el observador adaptable Lipschitz dado por las ecuaciones (3.42) y (3.43) con la finalidad de estimar (detectar) un cambio en la fuerza de amortiguamiento.

En la Fig. 4.58 se observa el perfil de variación de F_δ durante un tiempo de simulación de $t = 20s$. Se visualiza que la fuerza de amortiguamiento cambia de 0 N a 1200 N de forma escalar pasando el segundo 1 que inicia la simulación, finalmente después del segundo 10 se cae dicha carga quitando el peso extra.

Las condiciones iniciales del sistema y del observador, son las mismas que en la simulación anterior.

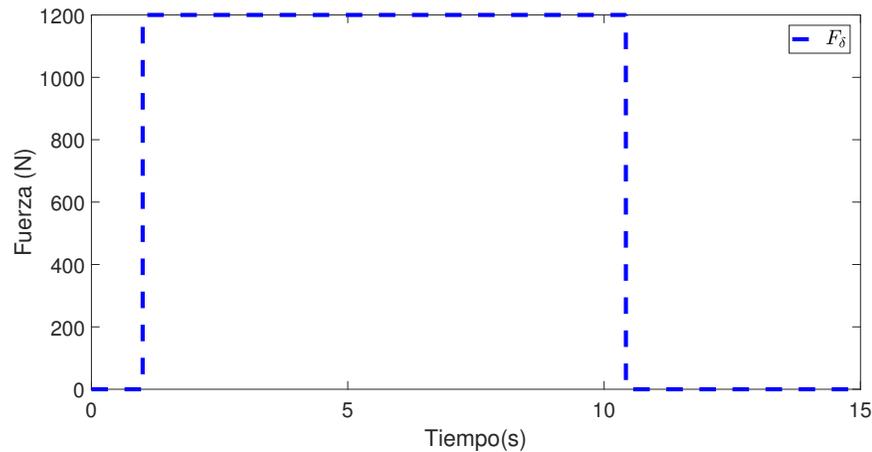


Figura 4.58: Escenario 3 Prueba 2: Falla aditiva en la fuerza "MR"

Con una entrada de corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t \leq 4 \\ 0 & 4 \leq t \leq 7 \\ 1.5mA & 7 \leq t \leq 11 \\ 0 & t \geq 11 \end{cases}$$

En la Fig. 4.59 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con la respuesta del sistema.

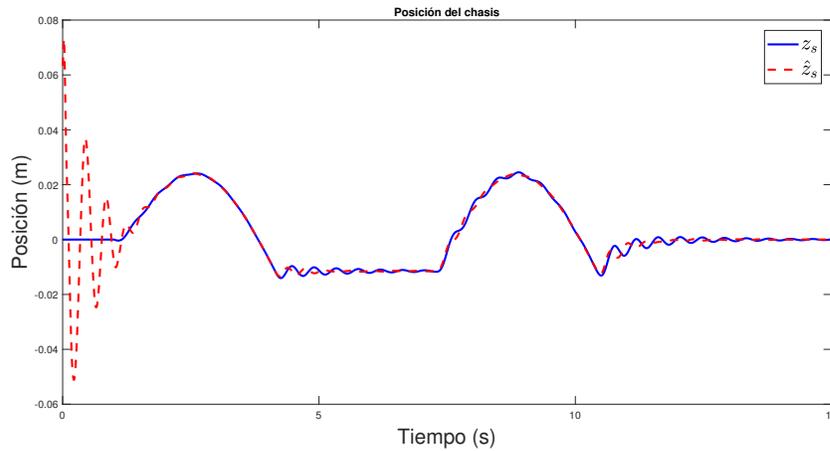


Figura 4.59: Escenario 3 Prueba 2: Posición del chasis

Se visualiza que el observador al presentarse un aumento en $F_\delta(t)$ ocasiona un decremento de 0.017 m, en la posición vertical del amortiguador, una vez termina el tope y se queda el $F_\delta(t)$ constante.

En la Fig. 4.60 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

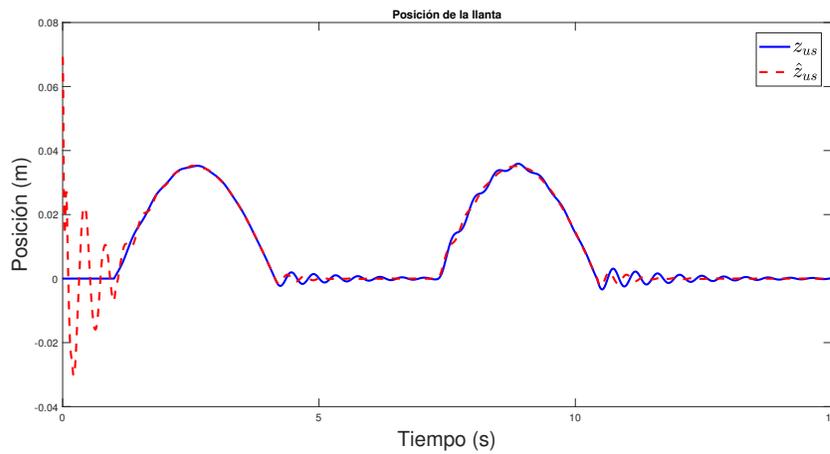


Figura 4.60: Escenario 3 Prueba 2: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_\delta(t)$, ya que la llanta no tiene falla alguna.

En la Fig. 4.61 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

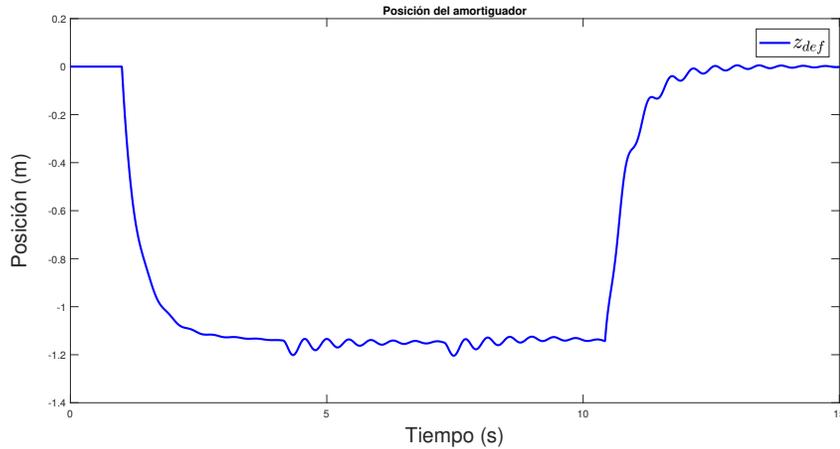


Figura 4.61: Escenario 3 Prueba 2: Comparación de posiciones

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento., en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_{\delta}(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continua con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_{\delta}(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Prueba 3. Variación de la fuerza de amortiguamiento $F_{\delta}(t)$ y llanta ponchada.

Objetivo: Estimar la fuerza de amortiguamiento y simultáneamente supervisar el estado de la llanta.

Esta simulación combina las acciones presentadas en las dos simulaciones anteriores: estimar la fuerza de amortiguamiento $F_{\delta}(t)$ ante cambios de carga Fig. 4.58 y supervisar el estado de la llanta mediante la estimación de parámetro k_t Fig. 4.54. Para la estimación de las variables de estado del sistema, se utiliza el observador adaptable Lipschitz dado por las Ecs. (3.42)-(3.43).

Con una entrada de corriente:

$$I(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 0.5 \\ 1.5mA & 0.5 \leq t < 4 \\ 0 & 4 \leq t < 7 \\ 1.5mA & 7 \leq t < 11 \\ 0 & t \geq 11 \end{cases}$$

En la Fig. 4.62 observamos la respuesta del observador de la posición vertical del chasis comparándose con la respuesta del sistema.

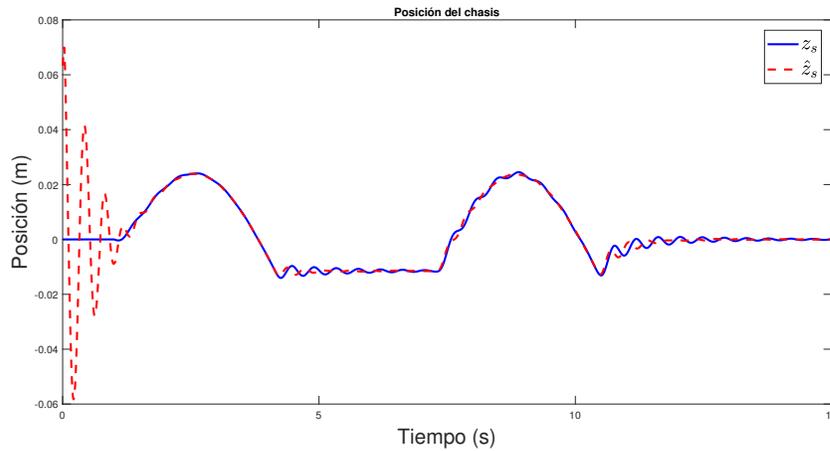


Figura 4.62: Escenario 3 Prueba 3: Posición del chasis

Se visualiza el comportamiento de la posición del chasis, al primer segundo que tiene contacto con el tope, al contar con la llanta ponchada $k_t(t)$ y el aumento de la carga $f_\delta(t)$, le toma mas esfuerzo pasar el tope, ocasionando un decremento de 0.019 m, en la posición vertical del amortiguador.

En la Fig. 4.63 observamos la respuesta del observador de la posición vertical de la llanta, teniendo la siguiente respuesta.

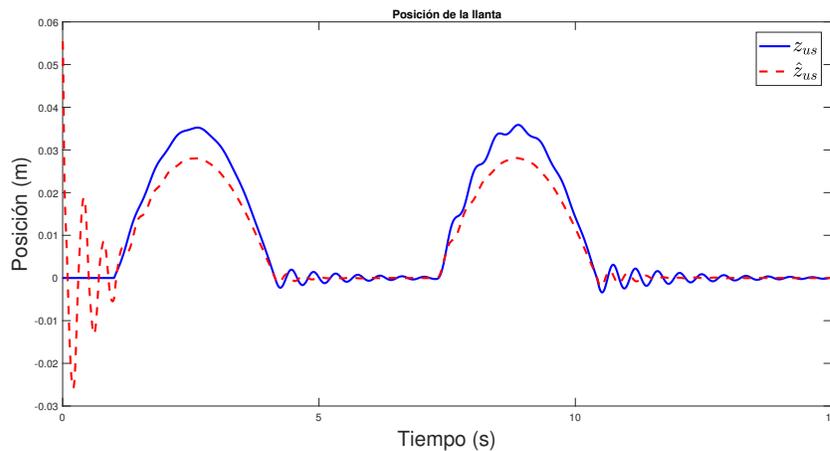


Figura 4.63: Escenario 3 Prueba 3: Posición de la llanta

En la figura anterior observamos que la respuesta de la posición de la llanta no se ve afectado con el aumento de $F_\delta(t)$, pero si por el decremento de rigidez de la llanta, ocasionando que el vehículo realice mas esfuerzo para pasar el tope.

En la Fig. 4.64 observamos la respuesta del observador, comparando las dos posiciones verticales, dicha respuesta muestra que por el exceso de carga y el decremento de $k_t(t)$, el amortiguador no regresa a su valor nominal, ocasionando una falla, hasta que dicha carga desaparezca o se dañe en su totalidad el amortiguador.

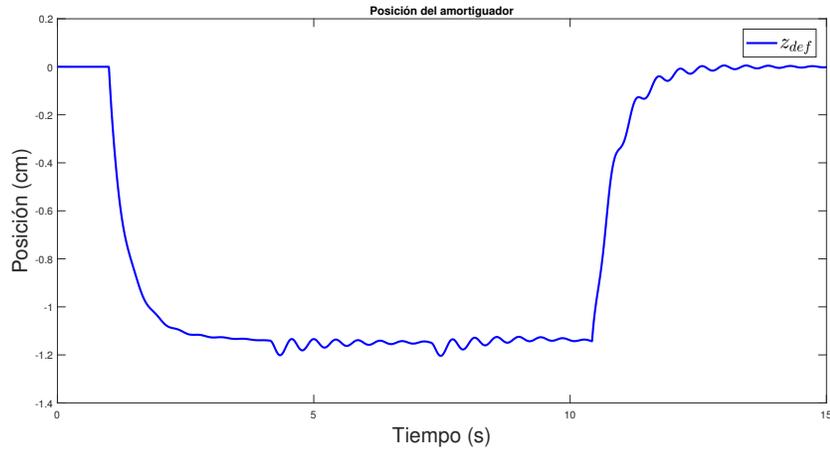


Figura 4.64: Escenario 3 Prueba 3: Comparación de posiciones

Se visualiza que por las fallas simuladas en el sistema, ocasiona una diferencia negativa, indicando que nuestro chasis ya está chocando con la llanta, ocasionando un daño en el amortiguador.

Como conclusión de esta simulación se deduce que es posible detectar cambios en el comportamiento de la suspensión ante variaciones de la fuerza de amortiguamiento, en el caso de la estimación de la llanta el cambio de $F_\delta(t)$ no le afecta mucho, ya que la llanta continua con su trayectoria, solo al incrementar y decrementar $F_\delta(t)$, ocasiona una pequeña oscilación eso se debe al esfuerzo que realiza la llanta para amortiguar la fuerza agregada.

Capítulo 5

Propuesta de instrumentación

El escenario de falla que se presenta a continuación es del amortiguador F_{MR} cuya falla se hace presente al desgaste de esa pieza ocasionada por superar su tiempo de vida de 60,000 km., ocasionando una deficiencia en su confort, también al pasar por terrenos en muy mal estado, por el exceso de peso que soporta el vehículo, ocasionando que la llanta pierda contacto con la carretera en zona de baches.

Una de las salidas del sistema y_3 es la deflexión del amortiguador, que es la diferencia de posiciones verticales entre las masas (suspendida y no suspendida), es decir, es un monitoreo del desplazamiento del pistón del amortiguador.

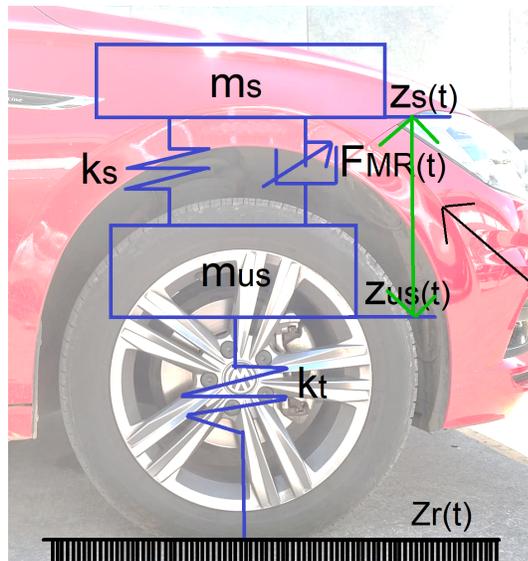
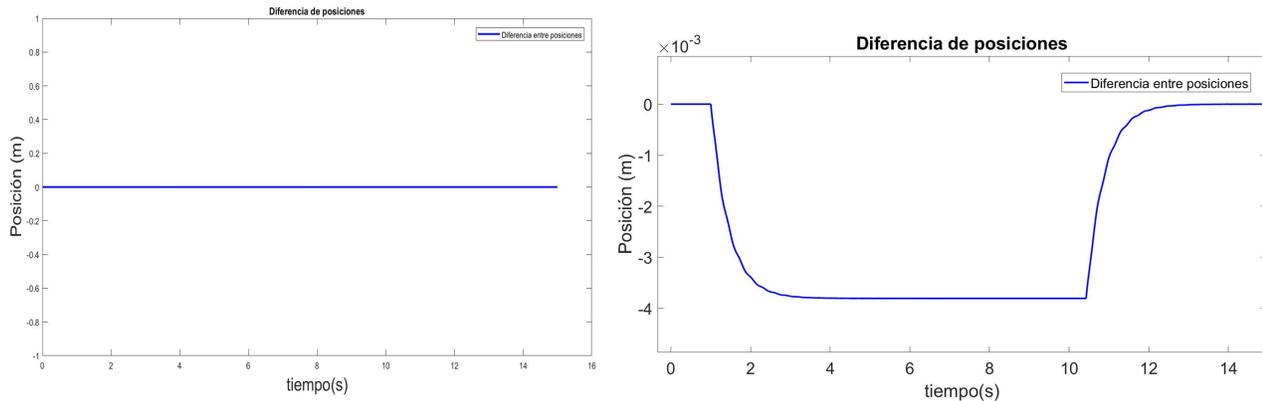


Figura 5.1: Deflexión del amortiguador

Para la medición de $y_3 = z_{def}$ no es necesario conocer las posiciones verticales z_s y z_{us} , ya que con el sensor propuesto se puede dar la señal eléctrica de z_{def} .

Los escenarios son tomando en cuenta los valores nominales del sistema, con un perfil de suelo 4.26.



(a) Amortiguador sin daño, $F_{\delta}(t) = 0$ y sin peso adicional. (b) Amortiguador sin daño $F_{\delta}(t) = 0$ y con peso adicional.

Figura 5.2: Desplazamiento del pistón del amortiguador

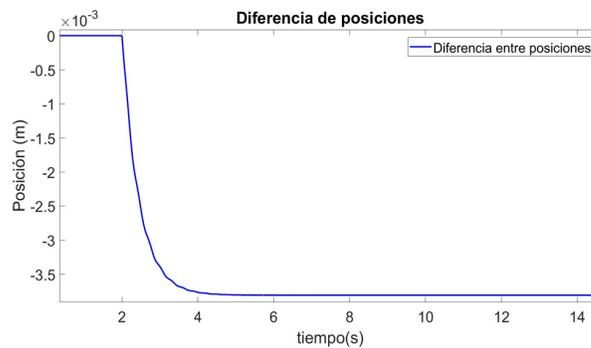


Figura 5.3: Amortiguador dañado, $F_{\delta}(t) \neq 0$.

En la figura 5.2a nos muestra un amortiguador funcionando correctamente sin presencia de anomalías, es decir, que los valores de los parámetros del amortiguador (por ejemplo la fuerza dinámica en el modelo del amortiguador f_c , los parámetros en la zona pre-esfuerzo del amortiguador a_i y los parámetros de la zona post-esfuerzo b_i) corresponden a los valores nominales (por valores nominales nos referimos a los valores que establece el fabricante). En este trabajo de tesis se dice que un amortiguador no funciona correctamente si cualquiera de estos parámetros ocasiona una falla aditiva en la fuerza del amortiguador $F_{\delta}(t) \neq 0$. En caso contrario $F_{\delta}(t) = 0$, entonces el amortiguador funciona correctamente. En esta figura no existe desplazamiento vertical del chasis, debido a que no se adiciona peso al vehículo.

La figura 5.2b muestra la posición vertical del chasis utilizando un amortiguador sano ($F_{\delta}(t) = 0$). En esta simulación se considera que existe un incremento de peso en el vehículo en el segundo 1. En el segundo 10 se retira el peso adicional del vehículo. Como es de esperarse, el chasis regresa a su posición original.

En la figura 5.3 se muestra la posición vertical del chasis, repitiendo la prueba anterior de incrementar el peso del vehículo y posteriormente retirando el peso adicional. En esta ocasión, se asume que existe una falla en el amortiguador $F_{\delta}(t) \neq 0$. Como se puede apreciar, una vez que se presenta la falla, la posición vertical del chasis no regresa a su posición original una vez que el peso adicional en el vehículo ha desaparecido.

El diseño de la propuesta de instrumentación consta de un sensor que es totalmente sin contacto, utilizando la tecnología de inducción para detectar la posición de un objeto metálico (activador), que se acopla a la parte móvil, con el fin de medir el desplazamiento del amortiguador, detectando cuando el desplazamiento está fuera del umbral predeterminado.



Figura 5.4: Propuesta de instrumentación (Diseñado en Solidworks)

Gracias al Software de **Solidworks** se diseñó el prototipo de la instrumentación propuesta Fig 5.4, utilizando el sensor podemos saber la deflexión del amortiguador en tiempo real, al presentarse varios escenarios de falla, el sensor seguirá tomando lectura de sus deflexiones, el sensor utilizado es un sensor de posición inductivo (se muestra en el Anexo A.5.1).

Capítulo 6

Conclusión

6.1. Principales resultados

Se desarrolló un primer observador adaptable para supervisar el estado en que se encuentra una suspensión semiactiva. Basándose en las mediciones de las posiciones verticales del chasis y de la llanta, el observador estima el coeficiente de rigidez de la llanta k_t , el cual es un indicativo del estado en que se encuentra la llanta, ya que por lo regular, no es posible determinar a simple vista si la llanta cuenta con la rigidez necesaria para trasladar al usuario de un lado a otro.

Una de las ventajas del observador diseñado es que las ganancias k_y y k_θ son constantes, y en consecuencia, no es necesario resolver un sistema dinámico para calcularlas. Además, debe señalarse que el observador propuesto necesita un conocimiento limitado del comportamiento del sistema (es decir, un simple modelo puede proporcionar suficiente información sobre el estado del sistema). El observador adaptable, se emplea para estimar las variables de estado y los parámetros del sistema simultáneamente.

Posteriormente, se diseña un segundo observador adaptable para sistemas Lipschitz, que se utiliza para lograr la estimación de las variables de estado a pesar de los parámetros desconocidos. Los resultados de la simulación finalmente demuestran la efectividad del enfoque de síntesis propuesto al tratar con un sistema práctico.

En un escenario real, las entradas de los observadores son las salidas de los sensores donde las aceleraciones verticales \ddot{z}_s y \ddot{z}_{us} se obtienen con la señal eléctrica de los acelerómetros. La diferencia de las dos posiciones $z_{def} = z_s - z_{us}$ se conoce a partir de la señal eléctrica del sensor propuesto en el Capítulo 5. Con el diseño del observador adaptable Lipschitz se obtiene la estimación de las variables de estado y de los parámetros desconocidos asociados a la degradación de los componentes de la suspensión.

6.2. Contribuciones

En este trabajo de tesis se diseñó un observador adaptable para estimar la rigidez de la llanta, con la finalidad de determinar el estado en que se encuentra, siendo esta una primera contribución.

Como segunda contribución, se diseñó un observador adaptable para sistemas no lineales Lipschitz, el cual consiste en un modelo de una suspensión semiactiva, con el fin de estimar la rigidez de la llanta, y detectar fallas en los componentes de la suspensión, a partir de la estimación de los parámetros asociados a estos componentes.

Finalmente, se propuso un esquema de instrumentación con el fin de supervisar el estado de salud de la suspensión.

En cuanto a divulgación del conocimiento, el diseño del observador adaptable para la supervisión del estado de la suspensión semiactiva, dio como resultado una publicación tipo póster en la 1a Jornada de Ciencia y Tecnología Aplicada 2018, realizada en el CENIDET (ver Anexo A.3). Por otra parte, se sometió un artículo al Congreso Nacional de Control Automático del AMCA. Este artículo fue aceptado y será publicado el octubre del 2019 en Puebla, México (ver Anexo A.4).

Bibliografía

- [Aguilera-González et al., 2010] Aguilera-González, A., Téllez-Anguiano, A., Astorga-Zaragoza, C., Juárez-Romero, D., and Quintero-Mármol, E. (2010). Validación experimental de un observador de alta ganancia constante continuo-discreto para una columna de destilación binaria. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 7(2):31–38.
- [Alberdi, 2004] Alberdi, J. (2004). Amortiguadores y suspensión. *Manuales de Automoción, Tecnum*.
- [Alcorta-García, 2002] Alcorta-García, E. (2002). Diagnóstico de fallas usando observadores no lineales: un caso de estudio. *Ingenierías*, 5(16):38–43.
- [Alleyne and Hedrick, 1992] Alleyne, A. and Hedrick, J.-K. (1992). Nonlinear control of a quarter car active suspension. In *American Control Conference*, pages 21–25. IEEE.
- [Besançon, 2000] Besançon, G. (2000). Remarks on nonlinear adaptive observer design. *Systems & Control Letters*, 41(4):271–280.
- [Besançon, 2007] Besançon, G. (2007). *Nonlinear observers and applications*, volume 363. Springer.
- [Blanke et al., 2006] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M., and Schröde, J. (2006). *Diagnosis and fault-tolerant control*, volume 2. Springer.
- [Calle-Chojeda, 2017] Calle-Chojeda, E.-T. (2017). Diseño de un sistema de diagnóstico de fallas para la suspensión semi-activa de un vehículo por medio de observadores de entradas desconocidas, estimación paramétrica y redes neuronales. Master’s thesis, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [Carlson et al., 1996] Carlson, J.-D., Catanzarite, D., and St. Clair, K. (1996). Commercial magnetorheological fluid devices. *International Journal of Modern Physics B*, 10(23n24):2857–2865.
- [Chamseddine et al., 2006] Chamseddine, A., Noura, H., and T., R. (2006). Full vehicle active suspension: sensor fault diagnosis and fault tolerance. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(13):468–473.
- [Chung and Shin, 2004] Chung, S.-K. and Shin, H.-B. (2004). High-voltage power supply for semi-active suspension system with er-fluid damper. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 53(1):206–214.
- [Cúpich-Rodríguez and Elizondo-Garza, 1998] Cúpich-Rodríguez, M. and Elizondo-Garza, F.-J. (1998). Amortiguadores magnetoreológicos. *Ingenierías*, 1(2):50–54.
- [Duan and Yu, 2013] Duan, G.-R. and Yu, H.-H. (2013). *LMI in control systems: analysis, design and applications*. CRC press.
- [Ekramian et al., 2013] Ekramian, M., Sheikholeslam, F., Hosseinnia, S., and Yazdanpanah, M.-J. (2013). Adaptive state observer for Lipschitz nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 62(4):319–323.

- [Ezeta et al., 2013] Ezeta, J.-H., Mandow, A., and Cerezo, A. (2013). Los sistemas de suspensión activa y semiactiva: una revisión. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 10(2):121–132.
- [Félix-Herrán et al., 2006] Félix-Herrán, L., Rodríguez-Ortiz, J.-d.-J., and Ramírez-Mendoza, R. (2006). Modelo de una suspensión semiactiva con un amortiguador magnetoreológico. In *AMCA Congreso Nacional, México*.
- [Flores-Montiel, 2012] Flores-Montiel, M. (2012). Detección y estimación de fallas en sistemas singulares LPV con aplicación a una columna de destilación. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- [Frank and Keller, 1980] Frank, P. and Keller, L. (1980). Sensitivity discriminating observer design for instrument failure detection. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, (4):460–467.
- [Frank, 1990] Frank, P.-M. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459–474.
- [Gauthier et al., 1992] Gauthier, J.-P., Hammouri, H., and Othman, S. (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6):875–880.
- [Gauthier and Kupka, 1994] Gauthier, J.-P. and Kupka, I.-A. (1994). Observability and observers for nonlinear systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 32(4):975–994.
- [Gertler, 2013] Gertler, J. (2013). *Fault detection and diagnosis*. Springer.
- [Hassan, 1986] Hassan, S.-A. (1986). *Fundamental studies of passive, active and semi-active automotive suspension systems*. PhD thesis, University of Leeds.
- [Hedrick et al., 1994] Hedrick, J.-K., Rajamani, R., and Yi, K. (1994). Observer design for electronic suspension applications. *Vehicle System Dynamics*, 23(1):413–440.
- [Hernández-Alcántara et al.,] Hernández-Alcántara, D., Tudón-Martínez, J. C., Amezquita-Brooks, L., Morales-Menéndez, R., and Ramírez-Mendoza, R. A. Sistemas de control tolerante a fallas en suspensiones automotrices.
- [Isermann, 1984] Isermann, R. (1984). Process fault detection based on modeling and estimation methods—a survey. *Automatica*, 20(4):387–404.
- [Isermann, 2005] Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis—status and applications. *Annual Reviews in Control*, 29(1):71–85.
- [John, 2011] John, S. and Pedro, J. O. (2011). Performance of vehicle wheel slip controller combined with passive suspension. *IEEE Africon'11*, pages 1–6.
- [Khalil, 2002] Khalil, H. K. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice-Hall.
- [Kim et al., 2018] Kim, S., Oh, J.-J., and Choi, S.-B. (2018). Driveline torque estimations for a ground vehicle with dual-clutch transmission. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(3):1977–1989.
- [Li et al., 2011] Li, X., Zhang, Q., and Su, H. (2011). An adaptive observer for joint estimation of states and parameters in both state and output equations. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 25(9):831–842.

- [Lozoya-Santos et al., 2012a] Lozoya-Santos, J., Tudón-Martínez, J.-C., Morales-Menendez, R., Ramírez-Mendoza, R., and Molina-Gutierrez, A. (2012a). Fault detection for an automotive mr damper. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(6):1023–1028.
- [Lozoya-Santos et al., 2012b] Lozoya-Santos, J.-d.-J., Morales-Menendez, R., Ramirez-Mendoza, R., Tudon-Martinez, J.-C., Sename, O., and Dugard, L. (2012b). Magnetorheological damper—an experimental study. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 23(11):1213–1232.
- [Luders and Narendra, 1973] Luders, G. and Narendra, K. (1973). An adaptive observer and identifier for a linear system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 18(5):496–499.
- [Luenberger, 1964] Luenberger, D.-G. (1964). Observing the state of a linear system. *IEEE Transactions on Military Electronics*, 8(2):74–80.
- [Löfberg, 2019] Löfberg, J. (09/2019). <https://yalmip.github.io/>.
- [Martínez et al., 2009] Martínez, C., Millán, A., Pérez, J., Jiménez, C., Arcila, J., and Sanz, W. (2009). Aplicación para la evaluación de un sistema de suspensión neumático semi-activo basada en métodos numéricos de euler, heun y runge-kutta de cuarto orden (rk4). *Revista INGENIERÍA UC*, 16(1).
- [Mouyon and Didierjean, 1999] Mouyon, P. and Didierjean, L. (1999). Nonlinear observers applied to car suspension fault detection. *European Control Conference (ECC)*, pages 4426–4431.
- [Nguyenf et al., 2017] Nguyenf, S.-D., Nguyen, Q.-H., and Truong, N.-T. (2017). Designing optimal fuzzy-compensator-enhanced sliding controller for train-car semi-active suspensions. In *2017 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, pages 1–6. IEEE.
- [Pérez-Estrada et al., 2018] Pérez-Estrada, A.-J., Osorio-Gordillo, G.-L., Darouach, M., Alma, M., and Olivares-Peregrino, V.-H. (2018). Generalized dynamic observers for quasi-lpv systems with unmeasurable scheduling functions. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 28(17):5262–5278.
- [Savaresi et al., 2010] Savaresi, S.-M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O., and Dugard, L. (2010). *Semi-active suspension control design for vehicles*. Elsevier.
- [Sellami and Zanzouri, 2017] Sellami, A. and Zanzouri, N. (2017). Fault diagnosis of a vehicular active suspension system by luenberger observer using bond graph approach. *International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, pages 1–8.
- [Sharp and Hassan, 1986] Sharp, R. and Hassan, S. (1986). The relative performance capabilities of passive, active and semi-active car suspension systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Transport Engineering*, 200(3):219–228.
- [Spencer Jr et al., 1997] Spencer Jr, B., Dyke, S., Sain, M., and Carlson, J. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(3):230–238.
- [Torres-Ortiz, 2005] Torres-Ortiz, F. (2005). *Observación y control no lineal de columnas de destilación*. PhD thesis, Tesis de Maestría, CENIDET.
- [Tudón-Martínez et al., 2016] Tudón-Martínez, J.-C., Varrier, S., Morales-Menéndez, R., and Sename, O. (2016). Control tolerante a fallas en una suspensión automotriz semi-activa. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 13(1):56–66.

- [Varrier et al., 2013] Varrier, S., Vivas-Lopez, C.-A., Lozoya-Santos, J.-d.-J., Tudón-Martínez, J.-C., Koenig, D., Martínez, J.-J., and Morales-Menéndez, R. (2013). Applicative fault tolerant control for semi-active suspension system: Preliminary results. In *2013 European Control Conference (ECC)*, pages 3803–3808. IEEE.
- [Verde et al., 2012] Verde, C., Gentil, S., and Morales-Menéndez, R. (2012). *Monitoreo y diagnóstico automático de fallas en sistemas dinámicos*. Trillas, 1 edition.
- [Villarreal-González, 2005] Villarreal-González, L.-S. (2005). Fundamental constitutive modeling of magnetorheological fluid and its application on reconfigurable systems. semi-active damper and transmission actuator. Master’s thesis, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [Weispfenning and Isermann, 1997] Weispfenning, T. and Isermann, R. (1997). Fault detection of vehicle suspensions. *IFAC Proceedings Volumes*, 30(18):801–806.
- [Zhu et al., 2014] Zhu, X., Xia, Y., Chai, S., and Shi, P. (2014). A finite-frequency domain approach to fault detection filter design for vehicle active suspension systems. In *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation*, pages 485–490. IEEE.

Capítulo A

Anexos

A.1. Parámetros

Valores nominales [Tudón-Martínez et al., 2016]:

Tabla A.1.1: Parámetros del sistema nominal

Parámetro	Descripción	Valor
f_c	Fuerza dinámica en el modelo de amortiguador MR	600.95 N/A
k_s	Rigidez del resorte	86378 N/m
k_t	Rigidez de la llanta	270000 N/m
m_s	Masa suspendida	470 Kg
m_{us}	Masa no suspendida	110 Kg
a_1	Parámetro en zona pre-esfuerzo del modelo FMR	37.85 Ns/m
a_2	Parámetro en zona pre-esfuerzo del modelo FMR	22.15 N/m
b_1	Parámetro en zona post-esfuerzo del modelo FMR	2830.86 Ns/m
b_2	Parámetro en zona post-esfuerzo del modelo FMR	-7897.21 N/m

A.2. Regiones LMI

El inicio del análisis de sistemas dinámicos viene desde hace más de 100 años atrás. Fue en 1890, cuando Lyapunov publicó su trabajo donde introdujo lo que hoy llamamos como Teoría de Lyapunov. Se demostró que una ecuación diferencial.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) \tag{A.2.1}$$

es estable (que todas las trayectorias convergen a cero) si y solo si existe una matriz P positiva definida, tal que

$$A^T P + PA < 0$$

Los requerimientos $P > 0$, $A^T P + PA < 0$ son conocidos como desigualdad de Lyapunov en P , en otras palabras una Desigualdad matricial lineal (LMI por sus siglas en inglés: linear matrix inequality). Lyapunov mostró que esta primer LMI podría ser resuelta explícitamente, eligiendo alguna matriz $Q = Q^T > 0$ y entonces resolver la ecuación lineal $A^T P + PA = -Q$ para la matriz P , lo cual garantiza ser definida si el sistema (A.2.1) es estable.

Un caso de estabilidad de una matriz, donde se requiere que los eigenvalores de la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se encuentre en la parte sombreada del plano complejo Fig. A.2.1 [Duan and Yu, 2013].

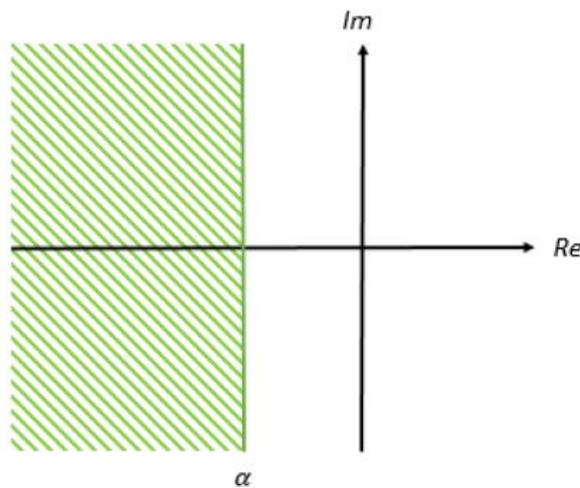


Figura A.2.1: Región LMI

Acorde a la teoría de estabilidad de Lyapunov $(A + \alpha I)$ es estable si existe una $P_\alpha = P_\alpha^T > 0$, tal que se cumpla la siguiente desigualdad:

$$(A + \alpha I)^T P_\alpha + P_\alpha (A + \alpha I) < 0$$

entonces para esta región de estabilidad tenemos las siguientes LMI's:

$$\begin{aligned} P_\alpha &> 0 \\ A^T P_\alpha + P_\alpha A + 2\alpha P_\alpha &< 0 \end{aligned}$$

A.3. Poster



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Monitoreo del rendimiento de una suspensión semiactiva a través de un observador adaptable

Pedro E. Alvarado Méndez¹, Carlos M. Astorga Zaragoza¹, Gloria L. Osorio Gordillo¹ y Ruben Morales Menendez²

¹Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Interior Internado Palmira S/N, Colonia Palmira, Cuernavaca, MOR. 62490, México.
²Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Av. E. Garza Sada 2501, 64849 Monterrey N.L., México.

ANTECEDENTES

Las suspensiones activas y semiactivas (Fig.1), aumentan la seguridad del automóvil, al mejorar la estabilidad, permitiendo aumentar el confort de los pasajeros, disminuir el movimiento del vehículo, y aumentar la absorción de los esfuerzos transmitidos por los neumáticos[1].

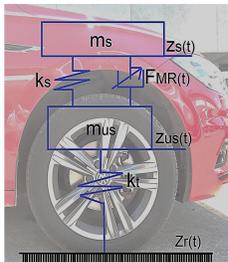


Fig.1.- Suspensión Semiactiva.

Los observadores basados en modelos matemáticos, generalmente conocidos como sensores de software. Se utilizan para estimar parámetros desconocidos o variables de estado no medidas.

OBJETIVO

Diseñar un observador adaptable [4] para la detección del coeficiente de rigidez de la llanta k_t .

PROPUESTA DE SOLUCIÓN

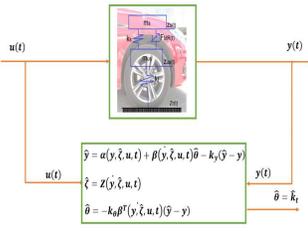


Fig. 2. Diagrama de solución.

Suposiciones:

- * 'y' son las salidas medidas.
- * Los estados medidos son observables o en caso de no ser medidos que sean detectables.
- * α y β son funciones Lipschitz.

RESULTADOS

En la Fig.2, se muestra la respuesta del perfil del suelo y la posición de la llanta, en la cual se observa que la llanta siempre converge al perfil del suelo.

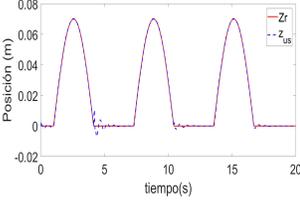


Fig. 3. Perfil de suelo (Zr) vs Posición de la llanta (Zs)

Con base en la entrada anterior se estima el coeficiente de rigidez de la llanta k_t .

CONCLUSIÓN

Se presenta un observador adaptativo para la estimación del parámetro k_t . La ventaja de usar este observador es la facilidad para la adaptación del modelo del sistema, así como la obtención de las ganancias del observador.

REFERENCIAS

[1]Savaresi, S. M., Poussot-Vassal, C., Spelta, C., Sename, O., & Dugard, L. (2010). Semi-active suspension control design for vehicles. Elsevier.

[2]Martínez, J. C. T., Varrier, S., Menéndez, R. M., & Sename, O. (2016). Control Tolerante a Fallas en una Suspensión Automotriz Semi-Activa. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial, 13(1), 56-66.

[3]Guo, S., Yang, S., & Pan, C. (2006). Dynamic modeling of magnetorheological damper behaviors. Journal of Intelligent Material Systems and Structures. 17(1), 3-14.

[4]Besançon, G. (2000). Remarks on nonlinear adaptive observer design. Systems & Control Letters, 41(4), 271-280.

Los resultados de la convergencia del observador adaptable se muestran en la Fig. 4.

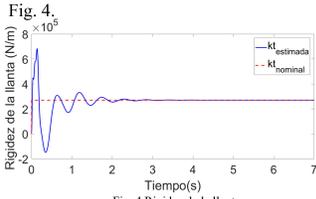


Fig. 4 Rigidez de la llanta

A su vez, si se presenta un incremento de pasajeros, se tendrá una reducción de rigidez de la llanta como se muestra en la Fig.5, esta reducción de rigidez también puede deberse a una llanta dañada (Fig.6).

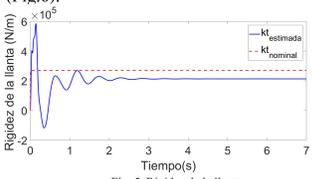


Fig. 5. Rigidez de la llanta



Fig. 6. Ejemplo de llanta dañada.

A.4. AMCA



Monitoreo de una suspensión semiactiva a través de un observador adaptable

P. E. Alvarado Méndez* C. M. Astorga Zaragoza*
 G. L. Osorio Gordillo* G. V. Guerrero Ramírez*
 R. Morales Menéndez** E. Quintero-Mármol Márquez*

* CENIDET, Internado Palmira s/n, C.P. 62490 Cuernavaca, Mor., México (e-mail: {pedro.alvarado17ea, astorga, gloriaosorio, gerardog, eqm}@cenidet.edu.mx).

** ITESM Campus Monterrey, Av. Eugenio Garza Sada 2501 Sur, Tecnológico, C.P. 64849 Monterrey, N.L., México (e-mail: rnm@itesm.mx).

Resumen. En este artículo, se presenta un método para supervisar el desempeño de una suspensión automotriz semiactiva. Dicho método está basado en el uso de un observador adaptable para sistemas Lipschitz que estima el coeficiente de rigidez de la llanta. El monitoreo de este parámetro es útil para determinar la presión del neumático, indicando así el exceso o falta de aire en el mismo. Se considera un modelo matemático simplificado de la suspensión semiactiva para sintetizar el observador adaptable. La efectividad del método propuesto se demuestra mediante simulaciones numéricas.

Keywords: Suspensión semiactiva, observador adaptable, sistemas no lineales Lipschitz.

1. INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo los medios de transporte han facilitado las tareas de las personas, tanto para transportarse de un lugar a otro, como para transportar objetos a diferentes partes del mundo. Uno de los medios más usados son los automóviles, que ya son parte de la vida cotidiana de la mayoría de las personas. Un automóvil, es un medio de transporte que tiene la capacidad de realizar una trayectoria, la cual tiene como fin dar al usuario un funcionamiento seguro y duradero. Para esto, los fabricantes han aumentado la cantidad de sistemas de detección de fallas, diseñando sistemas más completos e integrados.

La situación que se presenta, es que las variables: confort y estabilidad, son inversamente proporcionales, teniendo elementos pasivos para frecuencias altas, favoreciendo el confort pero comprometiendo la estabilidad. Es por esto que el vehículo ha ido evolucionando, desde su diseño mecánico hasta sus suspensiones. Una suspensión consta de una serie de elementos, que tienen como fin, unir las masas suspendidas y no suspendidas de un vehículo.

la suspensión pasiva requiere un compromiso para poder cumplir con las dos características, pues para mantener una buena maniobrabilidad en la dirección se requiere una rigidez intermedia, que además evita la reducción de la carrera de trabajo, al incrementar la carga del vehículo, mientras que el confort le proporciona una suspensión suave. En respuesta a este compromiso, muchas veces complicado de resolver, surgen los sistemas de suspensión activa y semiactiva, que tienen propiedades para realizar ambas tareas. Las suspensiones activas y semiactivas, aumentan la seguridad del automóvil, al mejorar la estabilidad en cualquier circunstancia, y a su vez permiten aumentar el confort de los pasajeros, al disminuir el movimiento del vehículo, y aumentar la absorción de los esfuerzos transmitidos por los neumáticos (Sharp and Hassan, 1986).

A menudo ocurre que algunos valores de parámetros de los procesos no están físicamente disponibles para la medición o varían en el tiempo. Es donde surge el uso de los observadores, generalmente conocidos como sensores de software, estos son un sensores virtuales capaces de estimar los estados y variables de interés de un proceso, a partir de mediciones de las entradas y salidas. Los observadores se utilizan para estimar parámetros desconocidos o variables

A.5. Sensor

A.5.1. Ficha técnica del sensor Blade 60

Blade60
POSITION SENSOR
Non-Contact Position Sensor



Key Features

- Non-Contact
- No Moving Sensor Parts
- Up to 60mm Linear Measurement
- Up to 90° Angular Measurement
- Fully Configurable Range
- Analogue/Digital Output
- Unlimited Mechanical Life
- Submersible

The Blade60 Position Sensor accurately senses the linear or angular position of a metallic 'activator' mounted away from the face of the sensor. The unique non-contact two-part design utilises Gill's patented inductive technology to provide a reliable, accurate output that will not deteriorate through use.

Small, light and robust, the sensor is fully electronic with on-board processing. The supplied software facilitates a fully configurable measurement range. Output signals are provided in three different formats and diagnostic information is given to assist in system fail-safe functionality.

At just 6mm thick installation is simple. Accuracy and durability are increased with the absence of mechanical linkages and the U-shaped activator can be formed as part of your application for minimum installation overhead. The sensor is available in standard and high-temperature formats and is available with standard or custom requested wiring options. Sealed to IP67, this sensor is ideal for a variety of applications where grime, moisture, temperature and vibration can have an adverse affect on other types of sensor.



SENSOR



ACTIVATOR



SIDE VIEW OF SENSOR/ACTIVATOR CONFIGURATION



Electrical

Supply Voltage	+4.8 VDC to +30 VDC
Over Voltage Protection	>31 VDC
Supply Current	<10mA with comms
Reverse Polarity Protection	up to -30 VDC
Resolution	10 bit over configured range
Sample Rate	1KHz
Rise Time	2ms*
Pulse Energy Absorption	1.0J

Analogue Output

Measuring Range	Linear: ±30mm (configurable) Rotary: ±45° (configurable)
Voltage Output Range	0-4.2 V
Range Accuracy	±0.1mm or equivalent

PWM Output

Measuring Range	Linear: ±30mm (configurable) Rotary: ±45° (configurable)
Frequency	250Hz or 1KHz

Serial Output

Data Type	RS232 19.2K 8N
-----------	----------------

Switch Output

Type	Switch to GND 30 VDC Max, 8mA
------	-------------------------------

Mechanical

Size	6 x 77 x 32.5mm (DxWxL)
Sensor-Activator Clearance	0.5-2mm
Mounting	2 x Ø4mm holes on a 65.5mm pitch
Weight	25.6 grams (0.90 ounces) excluding cable
Activator Materials	See notes overleaf
Materials Compatibility	Water, engine oil, engine coolant, diesel fuel, gasoline, salt spray, degreaser, degreaser tsp, ammonia and dust. All common automotive liquids and materials

Environmental

Protection Class	IP67
Operational Temperature	-40°C to +85°C (standard) -40°C to +125°C (optional)
Dither Life	Non-contact: no deterioration through use

Options

Wiring	- Standard (30/28AWG) 85°C/125°C - Heavy duty (20AWG) 85°C/125°C - Customer specified
--------	---

*The sensor samples the position at 1ms intervals. Each sample is processed then made available via an analogue filter with a rise time of 1.5ms. The total delay to 50% output is approximately 2ms.



60mm Non-Contact Position Sensor

Activator Options

- Tinned steel
- EN3B painted mild steel or similar
- Plastic/Copper Foil
- Others compatible, contact Gill with your requirement.

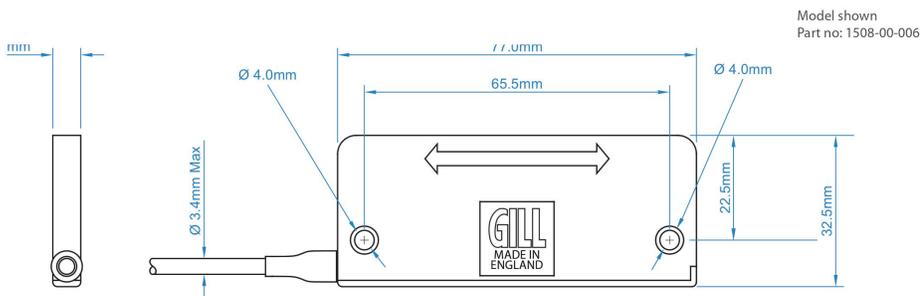
Blade60 Sensor Options

- 30 AWG 6 wire version (85°C max)
Part No:1508-00-006
- 28 AWG 6 wire version (125°C max)
Part No:1508-00-010
- 24 AWG 5 wire version (85°C max)
No switch output
Part No:1508-00-026
- Demo Kit
Part No:1508DK
- Tinned mild steel activator
Part No:1484-30-050

Wiring

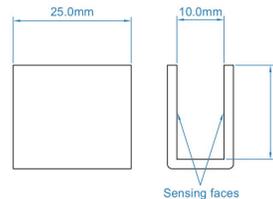
Red	+4.8VDC to +30VDC Supply
Black	System & Power Ground (GND)
Blue	Switch Output
Green	Serial Comms Input (Rx), RS232 Compatible
White	Serial Comms Output (Tx), RS232 Compatible
Yellow	Analogue Output: Voltage or PWM

Other custom wiring options available. Contact Gill for more information.



Activator

The sensor requires a metallic activator to be mounted 0.5-2mm away from the sensing face. This can either be mechanically mounted to the moving object or machined into the application for minimal installation overhead. Below is a drawing showing the dimensions of our recommended standard activator. Please consult Gill for more information on activator design.



*All undefined dimensions are non-critical



Gill Sensors
Saltmarsh Park
67 Gosport Street
Lymington
Hampshire
SO41 9EG, UK

T: +44 (0) 1590 613 400
F: +44 (0) 1590 613 401
E: info@gillsensors.co.uk

www.gillsensors.co.uk



Copyright © Gill Sensors 2013
PD1508 - Iss 4
Gill Research & Development Ltd
Reg No. 3154453 Registered Office: The George Business Centre, Christchurch Road, New Milton, BH25 6QJ

A.6. Amortiguador Magnetoreológico

A.6.1. Ficha técnica de un amortiguador magnetoreológico

LORD TECHNICAL DATA

MRF-132DG Magneto-Rheological Fluid

Description

LORD MRF-132DG fluid is a hydrocarbon-based magneto-rheological (MR) fluid formulated for general use in controllable, energy-dissipating applications such as shocks, dampers and brakes.

MRF-132DG fluid is a suspension of micron-sized, magnetizable particles in a carrier fluid. When exposed to a magnetic field, the rheology of MRF-132DG fluid reversibly and instantaneously changes from a free-flowing liquid to a semi-solid with controllable yield strength. Altering the strength of the applied magnetic field precisely and proportionally controls the consistency or yield strength of the fluid.

MRF-132DG fluid can be used in *valve mode* (fluid flowing through an orifice) or in *shear mode* (fluid shearing between two surfaces). In the absence of a magnetic field, MRF-132DG fluid flows freely or allows free movement. Upon application of a magnetic field, the fluid's particles align with the direction of the field in chain-like fashion, thereby restricting the fluid's movement within the gap in proportion to the strength of the magnetic field.

Features and Benefits

Fast Response Time – responds instantly and reversibly to changes in a magnetic field.

Dynamic Yield Strength – provides high yield strength in the presence of a magnetic field and very low yield strength in the absence of a magnetic field; allows for a wide range of controllability.

Temperature Resistant – performs consistently throughout a broad temperature range, meeting the requirements of demanding applications such as automotive shock absorbers.

Hard Settling Resistant – provides high resistance to hard settling; easily redispersed.

Non-Abrasive – formulated to not abrade the devices in which the MR fluid is used.

Application

Mixing – Under common flow conditions, no separation is observed between particles and the carrier fluid. However, a degree of separation may eventually occur under static conditions. If needed, use a paint shaker to redisperse the particles into a homogeneous state prior to use.

Storage

Keep container tightly closed when not in use.

Typical Properties*

Appearance	Dark Gray Liquid
Viscosity, Pa-s @ 40°C (104°F) Calculated as slope 800-1200 sec ⁻¹	0.112 ± 0.02
Density g/cm ³ (lb/gal)	2.95-3.15 (24.6-26.3)
Solids Content by Weight, %	80.98
Flash Point, °C (°F)	>150 (>302)
Operating Temperature, °C (°F)	-40 to +130 (-40 to +266)

*Data is typical and not to be used for specification purposes.

LORD
AskUsHow™

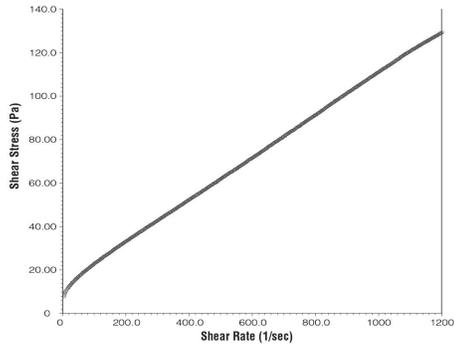
LORD TECHNICAL DATA

Cautionary Information

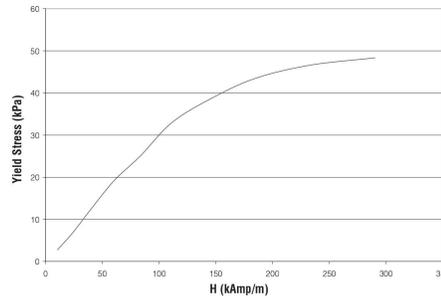
Before using this or any LORD product, refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) and label for safe use and handling instructions.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. Not for consumer use.

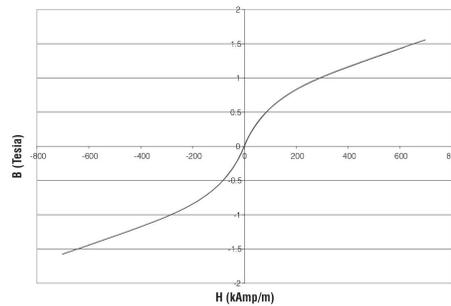
Shear Stress as a function of Shear Rate with no Magnetic Field applied at 40°C (104°F)



Yield Stress vs. Magnetic Field Strength



Typical Magnetic Properties



Values stated in this technical data sheet represent typical values as not all tests are run on each lot of material produced. For formalized product specifications for specific product end uses, contact the Customer Support Center.

Information provided herein is based upon tests believed to be reliable. In as much as LORD Corporation has no control over the manner in which others may use this information, it does not guarantee the results to be obtained. In addition, LORD Corporation does not guarantee the performance of the product or the results obtained from the use of the product or this information where the product has been repackaged by any third party, including but not limited to any product end-user. Nor does the company make any express or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose concerning the effects or results of such use.

*Ask Us How™ is a trademark of LORD Corporation or one of its subsidiaries.

LORD provides valuable expertise in adhesives and coatings, vibration and motion control, and magnetically responsive technologies. Our people work in collaboration with our customers to help them increase the value of their products. Innovative and responsive in an ever-changing marketplace, we are focused on providing solutions for our customers worldwide ... Ask Us How.

LORD Corporation

World Headquarters

111 Lord Drive
Cary, NC 27511-7923
USA

Customer Support Center (in United States & Canada)
+1 877 ASK LORD (275 5673)

www.lord.com

For a listing of our worldwide locations, visit LORD.com.

©2011 LORD Corporation OD_DS7015 (Rev.2 11/11)

LORD
AskUsHow™