



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**EL PROBLEMA DEL DIAGNÓSTICO DE FALLAS: UN ESTUDIO
COMPARATIVO BASADO EN OBSERVADORES DEDICADOS Y
DE ENTRADAS DESCONOCIDAS**

Tesis que para obtener el título de:

Ingeniero en Electrónica

Presenta:

P.I.E. David Cortés Vega

Asesor: Doctor en Control Automático

Juan Anzures Marín

Morelia, Michoacán. Octubre de 2013





Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Eléctrica



Morelia, Michoacán., a 5 de Septiembre de 2013.

Dra. Elisa Espinosa Juárez.
Directora de la Facultad de Ingeniería
Eléctrica de la U.M.S.N.H.
P R E S E N T E:

Atendiendo a sus indicaciones se hizo la revisión del manuscrito de Tesis presentado por el pasante de Ingeniería en Electrónica **C. David Cortés Vega.**

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado.

Atentamente:

JURADO	FIRMA	FECHA
Dr. Juan Anzures Marin Presidente		23/sep/13
M. I. Salvador Ramirez Zavala Vocal 1		24/sep/13
Dr. Jaime Cerda Jacobo Vocal 2		25/sep/13
M.C. José Alberto Ávalos González Suplente 1		23/Sep/2013
Dr. Antonio Ramos Paz Suplente 2	Antonio Ramos Paz	19/sep/2013

JAM/cmj



AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Juan Anzurez Marín**, mi asesor de tesis, por todo el tiempo dedicado a este trabajo, gracias por todas sus explicaciones y correcciones en el desarrollo de esta tesis así como por las diversas clases que me impartió a lo largo de la carrera siempre demostró ser un excelente profesor y una excelente persona.

A mis sinodales de tesis: **Dr. Jaime Cerda Jacobo, M. I. Salvador Ramírez Zavala, Dr. Antonio Ramos Paz y M.C. José Alberto Ávalos González**, por todas sus observaciones para mejorar el presente trabajo.

A la **UMSNH** y la **Facultad de Ingeniería Eléctrica** por toda la educación y preparación que recibí en sus aulas, gracias por permitirme ser parte de instituciones de tan altos valores tanto académicos como éticos.

A todos mis **Profesores**, ya que cada uno de ellos contribuyo en mayor o menor medida a mi formación académica y personal, gracias por siempre dar su mayor esfuerzo y por todos los conocimientos que tuvieron a bien transmitirme.

DEDICATORIA

A **DIOS** primeramente, porque ha sido la luz que me ha guiado no solo a través de estos años de mi formación profesional sino a lo largo de toda mi vida, gracias a ÉL estoy aquí el día de hoy para terminar este trabajo y sin ÉL nada de esto habría sido posible.

A mis padres **J.GUADALUPE CORTÉS RESENDIZ** y **ROSAURA VEGA GONZALEZ** por todo el apoyo que me han brindado no solo a lo largo de mi carrera sino a través de toda mi vida, este logro es suyo ya que siempre me dieron todo lo necesario para concluir mis estudios simplemente me encomendaron la parte más sencilla... estudiar. Gracias por todo su amor y dedicación a mi formación así como por ser un ejemplo y un modelo a seguir, lo que soy el día de hoy es fruto de su esfuerzo de tantos años.

A mis hermanos **FERNANDO DANIEL CORTÉS VEGA** y **EDUARDO CORTÉS VEGA**, por estar siempre conmigo en los buenos y malos momentos, por estar siempre dispuestos a ayudarme y porque a pesar de que somos diferentes en muchas cosas sé que siempre estarán para apoyarme en cualquier situación.

Índice general

Resumen	IX
Notación y símbolos básicos	XI
1. Introducción	1
1.1. Importancia de los observadores y sus aplicaciones	1
1.2. Objetivo General	2
1.3. Objetivos Particulares	3
1.4. Justificación	3
1.5. Descripción de Capítulos	3
2. Técnicas para el diagnóstico de fallas	5
2.1. Introducción	5
2.2. Tipos de fallas	6
2.2.1. Fallas aditivas	6
2.2.2. Fallas multiplicativas	6
2.2.3. Fallas en sensores	6
2.2.4. Fallas en actuadores	7
2.3. Métodos no basados en el modelo	7
2.3.1. Redundancia física	7
2.3.2. Sensores especiales	8
2.3.3. Análisis de espectro	8
2.3.4. Razonamiento lógico	8

2.4.	Métodos basados en el modelo	9
2.4.1.	Métodos basados en observadores	10
2.4.2.	Métodos basados en estimación de parámetros	11
2.4.3.	Métodos basados en espacio de paridad	12
2.4.4.	Métodos robustos de diagnóstico de fallas	12
3.	Diseño de observadores	15
3.1.	Introducción	15
3.2.	Ecuaciones en el espacio de estados	15
3.2.1.	Introducción	15
3.2.2.	Forma Canónica Controlable	17
3.2.3.	Controlabilidad	19
3.3.	Forma Canónica Observable	21
3.3.1.	Observabilidad	23
3.4.	Observadores con entradas desconocidas	25
3.4.1.	Procedimiento general de diseño para un UIO	31
3.4.2.	Esquemas robustos de detección y aislamiento de fallas basados en UIO's.	33
3.4.3.	Esquemas robustos de aislamiento de fallas basados en UIO's.	33
3.5.	Observadores dedicados	35
4.	Casos de Estudio	39
4.1.	Modelo del sistema hidráulico de dos tanques	39
4.1.1.	Modelado del sistema	40
4.1.2.	Aplicación del esquema de UIO's al modelo del SHDT	45
4.1.3.	Aplicación del esquema de observadores dedicados (DOS) al modelo del SHDT	55
4.2.	Sistema de suspensión de un autobús	61

4.2.1. Modelado del sistema	62
4.2.2. Aplicación del esquema de UIO's al modelo de suspensión de un autobús	64
4.2.3. Diseño de un UIO con esquema de aislamiento de fallas robusto en sensores	67
4.2.4. Simulación del UIO con esquema de aislamiento	70
4.2.5. Aplicación del esquema de observadores dedicados (DOS) al modelo de suspensión de un autobús	70
5. Conclusiones y trabajo futuro	81
5.1. Conclusiones	81
5.2. Trabajo futuro	83
A. Programas en MatLab	85
A.1. Programa para el diseño de un UIO	85
A.2. Programa para el diseño de observadores dedicados	89
B. Programas en Simulink	91
B.1. Programa para un UIO de orden completo	91
B.2. Programa para un UIO con esquema de aislamiento para SHDT	92
B.3. Programa de observadores dedicados de orden completo	93
B.4. Programa de observadores dedicados para el SHDT	94
B.5. Programa de observadores dedicados suspensión de autobús	95
B.6. Programa UIO con esquema de aislamiento suspensión de autobús	96

Índice de figuras

3.1. Representación de un sistema en espacio de estados.	17
3.2. Esquema general de un controlador	20
3.3. Estructura de un observador de estado.	23
3.4. Estructura de un observador con entradas desconocidas de orden completo .	26
3.5. Esquema de observadores dedicados	36
4.1. Sistema Hidráulico de Dos Tanques	40
4.2. Residuo en condiciones libres de fallas	48
4.3. Residuo en condición de falla en el sensor 1	48
4.4. Residuo en condición de falla en el sensor 2	49
4.5. Residuo en condiciones de falla en ambos sensores	49
4.6. Residuos generados en condiciones libres de fallas.	52
4.7. Residuos generados en condición de falla en el sensor 1	53
4.8. Residuos generados en condición de falla en el sensor 2	54
4.9. Residuos en condiciones de falla en ambos sensores.	54
4.10. Residuo generado en condiciones libres de falla	56
4.11. Residuo generado en condición de falla en el sensor 1	56
4.12. Residuo generado en condición de falla en el sensor 2	57
4.13. Residuo generado en condición de falla en ambos sensores	57
4.14. Residuos generados en condiciones libres de falla	59
4.15. Residuos generados en condición de falla en el sensor 1	60
4.16. Residuos generados en condiciones de falla en el sensor 2	60

4.17. Residuos generados en condición de falla en ambos sensores	61
4.18. Modelo del sistema de suspensión de $\frac{1}{4}$ de autobús	62
4.19. Residuos generados en condiciones libres de falla	66
4.20. Residuos generados en condición de falla en el estado 1	67
4.21. Residuos generados en condición de falla en el estado 3	68
4.22. Residuos generados en condiciones libres de fallas	71
4.23. Residuos generados en condición de falla en el estado 1	72
4.24. Residuos generados en condición de falla en el estado 3	73
4.25. Residuos generados en condiciones libres de falla	74
4.26. Residuos generados en condición de falla en el estado 1	75
4.27. Residuos generados en condición de falla en el estado 3	76
4.28. Residuos generados en condiciones libres de falla	78
4.29. Residuos generados en condición de falla en el estado 1	79
4.30. Residuos generados en condición de falla en el estado 3	80
B.1. Programa en Simulink para el modelo de un UIO de orden completo	91
B.2. Programa en Simulink para el modelo de UIO con aislamiento aplicado al SHDT	92
B.3. Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados de orden completo	93
B.4. Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados	94
B.5. Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados aplicados a la suspensión de un autobús	95
B.6. Programa en Simulink para un UIO con esquema de aislamiento aplicado a la suspensión de un autobús	96

Resumen

El problema del diagnóstico de fallas en sistemas no lineales ha tomado gran importancia en los años recientes debido a la gran necesidad de crear sistemas seguros y eficientes. El diseño de sistemas de diagnóstico de fallas se motiva por la necesidad de conocer y en su caso predecir las posibles fallas en los sistemas de control. En la presente tesis se aborda este problema dirigido hacia fallas en sensores únicamente mediante métodos basados en el modelo matemático del sistema, como lo son esquemas de observadores dedicados y de entradas desconocidas. Se presenta un procedimiento completo de diseño para cada esquema y se aplica a dos modelos distintos, un sistema hidráulico de nivel de líquido y la suspensión de un autobús. La principal contribución del presente trabajo está enfocada a la obtención de resultados comparativos entre los dos esquemas implementados, con esto se obtendrá información que permita saber en qué tipo de sistemas es más adecuado cada uno de estos esquemas de diagnóstico de fallas, para así emplearlos de manera eficiente, conociendo ventajas y posibles deficiencias de ambos esquemas.

Notación y símbolos básicos

A continuación se enlistan algunos símbolos y definiciones básicas utilizadas a lo largo de la presente tesis.

n	Orden del sistema.
$x(t)$	Estados del sistema, donde $x(t) \in R^n$.
$u(t)$	Entradas del sistema, donde $u(t) \in R^m$.
$y(t)$	Salidas del sistema, donde $y(t) \in R^q$.
$r(t)$	Residuos.
$d(t)$	Perturbaciones o entradas desconocidas.
A, B, C	Matrices constantes para representar el modelo del sistema.
f_1	Falla en el sensor 1.
f_2	Falla en el sensor 2.
ω_i	Factor de apertura de válvulas.
$h_i(t)$	Niveles de líquido en los tanques.
L	Matriz de ganancias para observadores dedicados
K	Matriz de ganancias para observadores con entradas desconocidas
UIO	Unknown Input Observer (Observador con entradas desconocidas)
DOS	Dedicated Observer Scheme (Esquema de observadores dedicados)

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo está dedicado a la presentación de los antecedentes referentes al problema del diagnóstico de fallas en sistemas no lineales, definiciones básicas acerca del tema de diagnóstico de fallas, además se define la motivación y el objetivo del presente trabajo y por último la organización del mismo.

1.1. Importancia de los observadores y sus aplicaciones

Desde que el ser humano comenzó a construir maquinaria y diversos equipos ha tenido siempre la preocupación sobre la condición de los mismos. Por siglos la única forma de detectar fallas y su localización fue mediante sus sentidos biológicos, buscando cambios en el color o la forma de la máquina, escuchando sonidos inusuales, tocando para sentir calor o vibración o percibiendo aromas para detectar fugas o sobrecalentamiento del equipo. Con el paso del tiempo, surgieron los dispositivos de medición los cuales brindaron información más precisa sobre algunas variables físicas importantes. Sin embargo, estos dispositivos de medición, llamados sensores, probaron también el hecho de ser propensos a fallar en su medición incrementando con esto el problema de las falsas alarmas.

Hoy en día debido al aumento en la automatización de los procesos así como en la importancia de los mismos ya sea en sistemas industriales, de transporte, etc. los esquemas de control necesarios para estos se hacen más sofisticados y complejos. Por lo tanto, la disponi-

bilidad, confiabilidad, operación segura y protección ambiental en estos procesos son temas de gran importancia tanto en sistemas en donde la seguridad es un factor crítico, tales como reactores nucleares, equipos de aviación y plantas químicas así como en otros sistemas de control avanzados de uso común por ejemplo en automóviles y trenes de alta velocidad. Para todos estos tipos de sistemas las consecuencias debido a un mal funcionamiento pueden llegar a ser extremadamente serias desde pérdidas humanas hasta el ámbito económico y de impacto ambiental. Debido a todo esto, existe una imperante necesidad de desarrollo y aplicación de esquemas de supervisión en línea y diagnóstico de fallas para incrementar la seguridad y confiabilidad de todos los sistemas en general. Por lo que el problema del diagnóstico de fallas genera un campo importante de aplicación para los esquemas de supervisión basados en observadores de estado en una amplia variedad de procesos desde detección de fallas en esquemas de control de nivel de líquido en sistemas de varios tanques [4], [26] hasta procedimientos como el control de los actuadores en un misil [32]. Algunos otros ejemplos del uso de observadores para detección de fallas se presentan en [28], [13], [33].

Otro tipo de aplicaciones para los observadores son como medidores virtuales, estos son utilizados cuando físicamente o por cuestiones propias del proceso es imposible la medición directa de una variable del sistema, por lo que mediante el modelo matemático del mismo es posible estimar el comportamiento que tendrá. En [22] se desarrolla un sistema de estimación de los movimientos laterales y longitudinales de una avioneta por medio de un observador de orden completo basando su diseño en la fórmula de Bass-Gura. Algunas otras referencias importantes de trabajos recientes asociados al tema de la estimación de parámetros se encuentran en [34], [14], [5], [10].

1.2. Objetivo General

La presente tesis se enfoca en la realización de un estudio comparativo de las características de diferentes tipos de observador para diagnóstico de fallas en sensores en sistemas no lineales.

1.3. Objetivos Particulares

El presente trabajo tiene como objetivos particulares primeramente el diseño de diferentes esquemas de diagnóstico de fallas incluyendo las técnicas de observadores con entradas desconocidas así como observadores dedicados seguido a esto se implementarán estos esquemas al modelo de un sistema de control de nivel de líquido de 2 tanques para obtener información del desempeño de cada tipo de observador.

1.4. Justificación

Al incrementarse la cantidad de equipos de automatización para todos los procesos actuales es necesaria la implementación de esquemas de detección y aislamiento de fallas con lo cual sea posible prever y corregir accidentes antes de que estos ocurran consiguiendo con esto mayor seguridad y confiabilidad en los procesos automatizados y por tanto reducir pérdidas tanto humanas como económicas. En base a esto es necesario el conocimiento de las características y eficiencia de cada tipo de observador para poder hacer una elección adecuada dependiendo de las necesidades del proceso a supervisar.

1.5. Descripción de Capítulos

La organización del presente trabajo se divide de la siguiente forma:

El Capítulo 2 presenta una breve introducción de los antecedentes más importantes así como algunas referencias bibliográficas de trabajos recientes en los que se presentan alternativas y diversos enfoques al problema del diagnóstico de fallas.

En el Capítulo 3, para abordar el problema del diagnóstico de fallas basado en el modelo, se presentan las bases para el diseño y aplicación de dos esquemas de observadores de estado, los observadores con entradas desconocidas y los observadores dedicados aplicados a sistemas no lineales. Se presentan resultados de simulación de los esquemas propuestos para un sistema hidráulico de dos tanques interconectados y la suspensión de un autobús.

Finalmente, en el Capítulo 4, se presentan algunas conclusiones importantes obtenidas

en base a la comparación de los diferentes esquemas de observadores.

Capítulo 2

Técnicas para el diagnóstico de fallas

2.1. Introducción

El interés por el tema de detección y aislamiento de fallas ha sido desde principios del año 1970. Los inicios de las investigaciones estuvieron principalmente concentrados en el área de la aeronáutica, la aviación y algunos procesos en plantas químicas. Debido a las numerosas contribuciones de los diferentes grupos de investigación se ha producido una cantidad importante de literatura referente al tema. Dichos grupos proponen enfoques para el diagnóstico de fallas basados en la experiencia del propio campo y/o la experiencia con una clase específica de sistemas. La gran diversidad de soluciones a este problema ha sido gracias al incremento del interés de la industria por el diagnóstico de fallas principalmente debido a la necesidad de mejorar la eficiencia, seguridad y confiabilidad del proceso de automatización.

El objetivo del proceso de detección y aislamiento de fallas es crear un sistema inteligente capaz de seguir operando aun cuando ha ocurrido una falla y recuperarse de los efectos de la misma. El proceso de detección y aislamiento de fallas cuenta con varios niveles. El primer nivel es la detección de la falla, el cual indica simple y sencillamente que ha ocurrido una falla en alguna parte del sistema. El siguiente nivel es el aislamiento de la falla el cual indica específicamente la localización de la misma en el sistema. El nivel final es la identificación de la falla en el cual se indica la magnitud y naturaleza de esta.

Los métodos de detección y diagnóstico de fallas pueden ser clasificados en dos grandes grupos: aquellos que no utilizan el modelo matemático de la planta como se aprecia en [20], [36], y los que si lo hacen [4], [32], [26]. El presente trabajo se enfoca en la utilización del método basado en el modelo de la planta, sin embargo se revisarán brevemente algunas técnicas de detección y diagnóstico de fallas no basadas en el modelo.

2.2. Tipos de fallas

En general, definimos una falla como una desviación del comportamiento normal esperado de la planta o de su equipo de instrumentación. En el proceso de diagnóstico de fallas es importante mencionar las fallas aditivas, fallas multiplicativas, fallas en sensores y por último fallas en actuadores.

2.2.1. Fallas aditivas

Al hablar de fallas aditivas se hace referencia a todas aquellas entradas desconocidas actuando en la planta las cuales normalmente son cero, pero al estar presentes pueden producir un cambio en las salidas de la planta dependientes de las entradas conocidas. Un ejemplo conciso de este tipo de fallas son fugas en la planta.

2.2.2. Fallas multiplicativas

Este tipo de fallas son cambios (abruptos o graduales) en algunos parámetros de la planta. Estos cambios pueden causar alteraciones posteriores en las salidas de la planta que dependen de la magnitud de las entradas conocidas del sistema. Este tipo de fallas describen el deterioro del equipo de la planta como son contaminación de la superficie, atasco del equipo o una pérdida parcial de energía.

2.2.3. Fallas en sensores

Estas fallas son diferencias entre el valor medido por el sensor y el valor real existente en cada variable individual de la planta. Estas fallas usualmente son consideradas aditivas, a

pesar de esto existen algunos tipos de fallas en sensores, como una falla catastrófica o total del sistema, que pueden ser clasificadas más acertadamente como fallas multiplicativas.

2.2.4. Fallas en actuadores

Un actuador es un dispositivo capaz de generar una cierta salida dependiendo de alguna entrada indicada por el operador o por el sistema de control automático, por lo que la magnitud de la salida está sujeta a la magnitud de la entrada. Las fallas en actuadores son todas aquellas discrepancias de la relación entre la señal de referencia enviada a un actuador y su salida generada por dicha entrada. Las fallas en actuadores son manejadas como fallas aditivas y, al igual que las fallas en sensores, existen algunos tipos de fallas, como una falla catastrófica o total del sistema, que se pueden considerar como fallas multiplicativas.

2.3. Métodos no basados en el modelo

Los métodos de detección y aislamiento de fallas sin utilizar el modelo matemático del sistema tienen un rango muy variado de opciones que van desde la redundancia física, el uso de sensores especiales y análisis espectral hasta técnicas basadas en razonamiento lógico.

2.3.1. Redundancia física

Este enfoque consiste en instalar varios sensores para la medición de la misma variable. Cualquier discrepancia significativa entre la medición de cada uno de los sensores indica una falla en alguno de ellos. Cabe mencionar que para implementar este esquema son necesarios como mínimo tres sensores para cada variable con lo cual es posible aislar el sensor que presenta una falla en base a un esquema de comparación mayoritaria de valores. Un esquema de redundancia física es sumamente confiable sin embargo involucra un mayor costo además de incrementar el peso del equipo, esto último llega a ser vital en ciertos procesos, por ejemplo en aplicaciones aeroespaciales.

2.3.2. Sensores especiales

Este método consiste en la instalación de sensores de límite los cuales se encargan de supervisar características físicas del equipo como presión o temperatura, al salir la medición de cierto rango preestablecido se considera que pudiera existir una falla. Algunas otras variables físicas que pueden ser sensadas para detectar fallas son sonido, vibración, elongación, etc.

2.3.3. Análisis de espectro

Existe también un método basado en el análisis de espectro de la planta con el cual es posible realizar detección y aislamiento de fallas. La mayoría de las variables de un proceso presentan una frecuencia de espectro típica bajo condiciones normales de operación por lo que cualquier desviación de esta frecuencia es un indicativo de un estado anormal o de posible falla en el sistema. Ciertos tipos de falla pueden incluso tener características propias fácilmente identificables en el espectro con lo que se hace posible aislar la falla.

2.3.4. Razonamiento lógico

Este grupo está conformado por un amplio rango de técnicas que son complementarias a los métodos mencionados anteriormente, todo este razonamiento lógico hace la evaluación de los síntomas en base a la detección hecha por los sensores. La técnica más simple de razonamiento lógico consiste de esquemas de reglas lógicas compuestas de este tipo "IF - síntoma - AND - síntoma - THEN - conclusión". Cada conclusión puede servir como un síntoma para la regla siguiente, hasta alcanzar la conclusión final. El sistema puede procesar la información recabada por los sensores de forma independiente o puede interactuar con un operador humano brindándole los síntomas particulares detectados y guiándolo a través de todo el proceso lógico.

2.4. Métodos basados en el modelo

El diagnóstico de fallas basado en el modelo es una de las técnicas más usadas para la detección y aislamiento de fallas, este método se basa en la identificación del nivel o tendencia de una señal en particular conocida como residuo y al llegar ésta a un umbral previamente establecido realiza alguna acción predeterminada lo cual puede ser un indicativo de una falla. Estas técnicas mediante límites o umbrales son sencillas de implementar, sin embargo, existe la probabilidad de generar falsas alarmas a causa de ruido, variaciones en las entradas y cambios en los puntos de operación si no se realiza una adecuada selección de umbrales.

La principal ventaja del enfoque de diagnóstico de fallas basado en el modelo es el hecho de que no requiere componentes físicos adicionales, como en algunos métodos de redundancia física, para desarrollar un algoritmo de detección de fallas, ya que este se implementa mediante software. De esto se deriva que la condición necesaria para los métodos basados en el modelo es una alta capacidad computacional.

La mayoría de los métodos de detección y diagnóstico de fallas basados en el modelo centran su funcionamiento en el concepto de la redundancia analítica. Contrariamente a la redundancia física, donde las mediciones de cada sensor son comparadas entre ellas, ahora estas mismas mediciones son comparadas con valores calculados analíticamente para cada variable del sistema. Siguiendo este enfoque de comparación con valores calculados analíticamente se generan nuevos valores conocidos como residuos. Los residuos son medidas de la discrepancia entre el comportamiento de las mediciones físicas del sistema y los valores estimados analíticamente, el análisis de estos residuos nos permite la detección y aislamiento de fallas en un sistema con base en el modelo.

A partir del conjunto de residuos se define una matriz de firma de fallas o código de fallas, la cual contiene información de la relación entre el residuo y una determinada falla en el sistema. La falla es representada por la columna k de la matriz, los residuos son representados por el renglón j de la matriz. Un elemento (j,k) de la matriz es 1 si la falla de la columna k influye en el residuo de la fila j , en caso contrario será 0 [2]. Entonces los residuos pueden ser diseñados para que respondan a un subconjunto diferente de fallas y a la

vez que sea insensible a otras, por lo que cuando ocurre una falla en particular se activarán algunos residuos mientras otros permanecen en reposo [13].

El campo de la detección y aislamiento de fallas basado en el modelo para sistemas lineales ha sido estudiado ampliamente, algunas referencias importantes de esto se pueden encontrar en [28], [13]. En el caso de los sistemas no lineales se ha demostrado que para algunos de ellos es suficiente usar una linealización cerca de puntos de operación y posteriormente proceder con la aplicación de técnicas de diagnóstico lineales.

Una tarea importante del esquema de diagnóstico de fallas basado en el modelo es la detección de fallas incipientes¹, en el sistema antes de que se manifiesten como problemas que requieran intervención automática del propio sistema o por parte del operador humano. Una falla incipiente no presenta un grave riesgo para el sistema ni para su desempeño en una etapa temprana sin embargo al ser continua puede llegar a generar serios problemas en el equipo, debido a esto es necesario que el esquema de detección de fallas sea capaz de detectar estas fallas incipientes brindando al operador o sistema de monitoreo automático suficiente información y tiempo para tomar medidas que prevengan cualquier daño severo en la planta. Este tipo de fallas tienen un efecto relativamente pequeño en los residuos el cual puede no ser detectado debido a la incertidumbre existente en el modelado del sistema por lo que es un tema de gran importancia en el diseño de algoritmos de detección y diagnóstico de fallas.

2.4.1. Métodos basados en observadores

La idea original del diagnóstico de fallas basado en observadores surge con los trabajos de R.V. Beard (1971) y Harold Jones (1973) del MIT junto a Robert Clark de la Universidad de Washington, como se expone en [28]. Clark y sus colaboradores por primera vez en 1975 aplican el observador de Luenberger al problema de detección de fallas y posteriormente surgen varios esquemas para aislamiento de fallas en sensores. Entre estos se encuentran los

¹Fallas pequeñas y de lento desarrollo son comúnmente llamadas fallas incipientes, en algunas ocasiones también se conocen como fallas suaves.

observadores con entradas desconocidas, observadores dedicados y observadores con modos deslizantes los cuales han sido utilizados ampliamente en los últimos años para una gran variedad de procesos y sistemas. El método de observadores con entradas desconocidas ha generado muchas investigaciones tanto para los sistemas lineales como los no lineales, con diferentes variantes como son los observadores con entradas desconocidas de orden reducido [18], [16], y los observadores con entradas desconocidas de orden completo [15], [8], por mencionar algunos. Algunos trabajos recientes sobre observadores con modos deslizantes² se presentan en [2], [26], [6].

Los esquemas de observadores tienen un gran campo de aplicación en la generación de residuos para sistemas de detección y diagnóstico de fallas. Técnicas como observadores con entradas desconocidas pueden ser usadas para desacoplar los residuos de un número finito de perturbaciones. En este enfoque la libertad en el diseño del observador puede ser utilizada para contribuir en el proceso de aislamiento de la falla por medio de los residuos generados [30]. La dinámica de respuesta a una falla puede ser controlada, dentro de ciertos límites, asignando adecuadamente los polos del observador.

2.4.2. Métodos basados en estimación de parámetros

El método de estimación de parámetros es un enfoque natural hacia la detección y aislamiento de fallas paramétricas (multiplicativas). Se obtiene un modelo de referencia tomando como primer paso la identificación de la planta en una situación libre de fallas. A continuación los parámetros de la planta son reidentificados en línea repetidamente. Cualquier desviación del modelo de referencia libre de fallas sirve como base para la detección y aislamiento de fallas. Los métodos basados en estimación de parámetros pueden ser más confiables que los métodos de redundancia analítica, pero también tienen mayores requerimientos en términos de capacidad computacional.

Este método ha sido estudiado ampliamente por Rolf Isermann y sus colaboradores [17] en Darmstadt, Alemania. Algunos otros investigadores que han incursionado en este campo

²También conocidos como observadores de estructura variable

son A.Rault (1984) de Adersa-Gerbios, Francia y B. Ninness y G.C. Goodwin (1991) de Newcastle, Australia, como se muestra en [13].

2.4.3. Métodos basados en espacio de paridad

Una alternativa más al problema de diagnóstico de fallas, es el método conocido como espacio de paridad el cual fue propuesto por primera vez a fines de los años setentas. Este enfoque consiste en determinar si las mediciones de entrada-salida del sistema son consistentes con el modelo matemático a través de un reacomodo de estas relaciones entrada-salida mediante una transformación dinámica lineal. Con esta transformación se generan los residuos o vector de paridad con los cuales es posible realizar detección y aislamiento de fallas. La libertad de diseño provista por la transformación lineal puede ser usada para desacoplar perturbaciones y mejorar el proceso de aislamiento de fallas. Además, la dinámica de la respuesta puede ser asignada, dentro de los límites marcados por los requerimientos de causalidad y estabilidad. Este método fue propuesto originalmente por Mironovski en 1980 [23], y posteriormente fue presentado de manera independiente por Chow y Willisky en 1984 [7]. Esta línea de investigación fue seguida por Gertler y en 1988 desarrolló un método de diseño de espacio de paridad en el dominio Z [12], Chen y Zhang, desarrollan un método utilizando redundancia por hardware, desde el punto de vista estocástico basado en la evolución del vector de paridad.

2.4.4. Métodos robustos de diagnóstico de fallas

El diagnóstico y detección de fallas mediante el modelo hace uso del modelo matemático del sistema supervisado, sin embargo nunca se dispondrá de un modelo matemático exacto y completo del sistema físico. Usualmente, los parámetros del sistema pueden variar con el tiempo en una forma desconocida, y las características de las perturbaciones y el ruido son muchas veces impredecibles por lo tanto no pueden ser modeladas de manera precisa, entonces siempre habrá un error entre el proceso y su modelo matemático aun si no hay fallas en el proceso.

Para hacer frente a las dificultades generadas por la incertidumbre en el modelado, un esquema de detección y aislamiento de fallas tiene que ser robusto, es decir, ser insensible o incluso invariante a esa incertidumbre del modelado. Algunas ocasiones, una simple reducción de la sensibilidad a esa incertidumbre no resolverá el problema porque dicha reducción de sensibilidad puede estar asociada a una reducción de sensibilidad a las fallas. Por lo tanto el objetivo de un esquema de detección de fallas robusto es incrementar la capacidad de ignorar o ser menos sensible a los problemas derivados de la incertidumbre en el modelado, a la vez que mantiene (o incluso incrementa) la sensibilidad a las fallas. Un sistema que es capaz de proveer una sensibilidad a fallas en un rango aceptable a la vez que mantiene esa capacidad de ser robusto a la incertidumbre del modelo es llamado un esquema robusto de detección y aislamiento de fallas, ejemplos de esto se presentan en [28], [4], [31].

Frank y sus colaboradores han estudiado ampliamente el uso de observadores con entradas desconocidas (UIO) para resolver el problema de diagnóstico de fallas robusto. Por ejemplo, en [27],[11] Frank evita los errores de linealización al generar residuos mediante observadores no lineales con entradas desconocidas, y para propósito de evaluación de residuos emplea un enfoque de análisis funcional. Un análisis muy claro de la teoría y diseño de UIO's se presenta en [28] para detección de fallas en sensores y actuadores.

Otro método que se ha utilizado y estudiado ampliamente en los últimos años para resolver el problema de diagnóstico robusto de fallas es el uso de técnicas relacionadas con la teoría de sistemas de estructura variable también conocidos como modos deslizantes como se muestra en [26], [6]. En [2] se presenta un esquema de detección de fallas en base a observadores con modos deslizantes para un modelo difuso tipo Takagi-Sugeno.

Basándonos en los resultados de investigaciones recientes acerca de métodos robustos de diagnóstico de fallas, es fácil observar que, los métodos de diagnóstico que únicamente utilizan información de sus salidas pueden generar información incorrecta lo que se verá reflejado en la detección de falsas alarmas al cambiar las entradas del sistema (caso no lineal). Para resolver este problema se puede utilizar la generación de residuos, en la cual, son consideradas las salidas y entradas del sistema monitoreado. Un diseño adecuado de este generador de residuos dará información confiable puesto que el efecto de la entrada puede

ser desacoplado de las fallas tal como se presenta en [1].

Capítulo 3

Diseño de observadores

3.1. Introducción

Los sistemas modernos tienden a ser muy complejos con gran cantidad de entradas y salidas que se relacionan entre si de una forma complicada. Para analizar este tipo de sistemas, es de vital importancia reducir la complejidad de las expresiones matemáticas implicadas, además de recurrir al uso de computadoras que realicen la mayor parte de los cálculos necesarios. El enfoque en el espacio de estados para el análisis de sistemas es el más conveniente desde este punto de vista por lo cual en este capítulo se analizará el problema del diagnóstico de fallas desde la obtención del modelo en espacio de estados hasta el diseño del observador con entradas desconocidas.

3.2. Ecuaciones en el espacio de estados

3.2.1. Introducción

Mientras que la teoría de control convencional tiene como base la relación formada entre entradas y salidas (función de transferencia), la teoría de control moderna se basa en la descripción de las ecuaciones de un sistema en términos de n ecuaciones diferenciales de

primer orden, las cuales se combinan en ecuaciones diferenciales vectoriales de primer orden. El uso de la notación matricial simplifica enormemente la representación matemática de estos sistemas de ecuaciones. Un punto importante de la teoría de espacio de estados es que al incrementarse el número de variables de estado, entradas o salidas no aumenta la complejidad de las ecuaciones. De hecho, el análisis de sistemas complicados con múltiples entradas y salidas es realizado mediante procedimientos de un nivel de complejidad ligeramente superior a los requeridos para el análisis de sistemas de ecuaciones diferenciales escalares de primer orden.

La representación de espacio de estados provee un modo compacto y conveniente de modelar y analizar sistemas con múltiples entradas y salidas. Con q entradas y p salidas, tendríamos que escribir n veces la transformada de Laplace para procesar toda la información del sistema. A diferencia de la aproximación en el dominio de la frecuencia, el uso de la representación de espacio de estados no está limitada a sistemas con componentes lineales ni con condiciones iniciales iguales a cero. El espacio de estados se refiere al espacio de dimensiones cuyos ejes coordenados están formados por variables de estados.

El estado de un sistema se define como el conjunto más pequeño de cantidades físicas que se requiere especificar para determinar completamente la evolución del sistema. Un estado representa la historia de un sistema, a las variables que se utilizan para especificar el estado del sistema se les llama variables de estado. Las variables de estado son el subconjunto más pequeño de variables de un sistema que pueden representar su estado dinámico completo en un determinado instante. Estas variables de estado deben ser linealmente independientes por lo que una variable de estado no puede ser una combinación lineal de otras variables de estado. El número mínimo de variables de estado necesario para representar un sistema dado es normalmente igual al orden de la ecuación diferencial que define al sistema.

Una forma general de representación de espacio de estados de un sistema lineal que presenta p entradas, q salidas y n variables de estado se escribe en la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas, A es la matriz de estados, B es la matriz de entradas, C es la matriz de salidas y D es la matriz de transición¹, todas de valores conocidos y constantes.

En la Figura (3.1) se muestra la representación de un sistema en espacio de estados por medio de un diagrama de bloques de acuerdo a la ecuación (3.1).

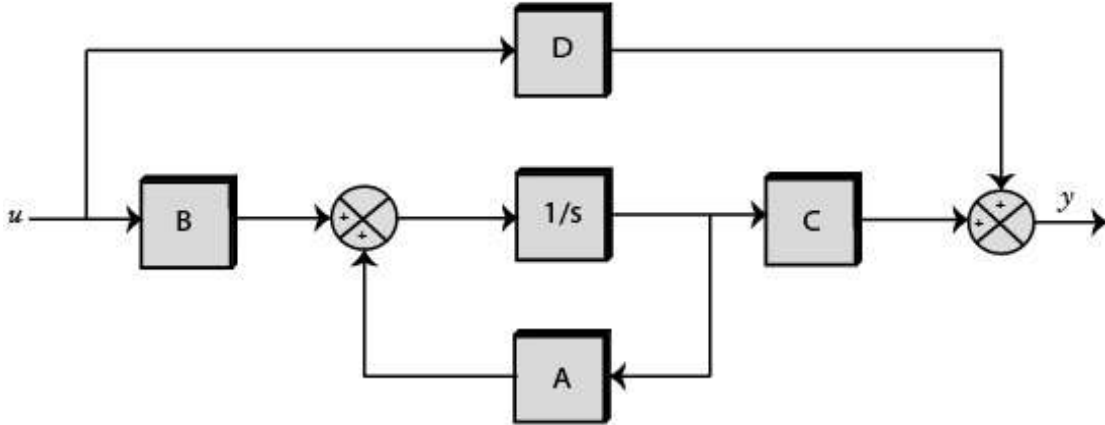


Figura 3.1: Representación de un sistema en espacio de estados.

3.2.2. Forma Canónica Controlable

Esta forma de representar un sistema recibe su nombre debido a que sus características permiten su aplicación para el diseño de controladores para el lazo de retroalimentación de variables de estado. Vale la pena mencionar que un sistema en esta forma será siempre controlable [25]. Para llegar a la forma canónica controlable se partirá de una función de transferencia general en el dominio s como se muestra a continuación:

$$G(s) = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (3.2)$$

De aquí se obtienen un par de funciones de transferencia:

¹Por simplicidad D se elimina al asumir que su valor es de cero, eliminando con esto que el sistema tenga transición.

$$\frac{Y(s)}{Z(s)} = b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0 \quad (3.3)$$

$$\frac{Z(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (3.4)$$

Estas funciones representan la función de transferencia (3.2) por medio de su interpretación como funciones en cascada:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Y(s)}{Z(s)} \times \frac{Z(s)}{U(s)} \quad (3.5)$$

Despejando $Y(s)$ de la ecuación (3.3):

$$\begin{aligned} Y(s) &= (b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0)Z(s) \\ Y(s) &= b_{n-1}s^{n-1}Z(s) + b_{n-2}s^{n-2}Z(s) + \dots + b_1sZ(s) + b_0Z(s) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Se transforma la ecuación (3.6) al dominio del tiempo:

$$y(t) = b_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} z + b_{n-2} \frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}} z + \dots + b_1 \frac{d}{dt} z + b_0 z \quad (3.7)$$

Despejando $U(s)$ de la ecuación (3.4):

$$U(s) = (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)Z(s) \quad (3.8)$$

Transformando al dominio del tiempo la ecuación (3.8):

$$\frac{d^n}{dt^n} z = -a_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} z - a_{n-2} \frac{d^{n-2}}{dt^{n-2}} z - \dots - a_1 \frac{d}{dt} z - a_0 z + u \quad (3.9)$$

Ahora se definen las variables de estado:

$$\begin{aligned}
x_1 &= z \\
x_2 &= \frac{dz}{dt} = \frac{dx_1}{dt} = \dot{z} = \dot{x}_1 \\
x_3 &= \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{dx_2}{dt} = \dot{x}_2 \\
&\vdots \\
x_n &= \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}}z = \frac{dx_{n-1}}{dt} = \dot{x}_{n-1}
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Sustituyendo estos estados en las ecuaciones (3.7) y (3.9):

$$\begin{aligned}
y(t) &= b_{n-1}x_n + b_{n-2}x_{n-1} + \dots + b_1x_2 + b_0x_1 \\
\frac{d^n z}{dt^n} &= -a_{n-1}x_n - a_{n-2}x_{n-1} - \dots - a_1x_2 - a_0x_1 + u(t)
\end{aligned} \tag{3.11}$$

Por último, transformando las variables de estado seleccionadas en (3.10) y la salida $y(t)$ en (3.11) a su forma matricial:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-2} & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\
y &= \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & \cdots & b_{n-2} & b_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.12}$$

3.2.3. Controlabilidad

De manera general el concepto de controlabilidad define que es completamente posible el control de todos los estados de un sistema mediante la adecuada selección de la entrada.

Para llegar a este resultado se vuelve necesaria la construcción de un controlador el cual se encargará de llevar la señal al valor deseado, la estructura general para un controlador se muestra a continuación:

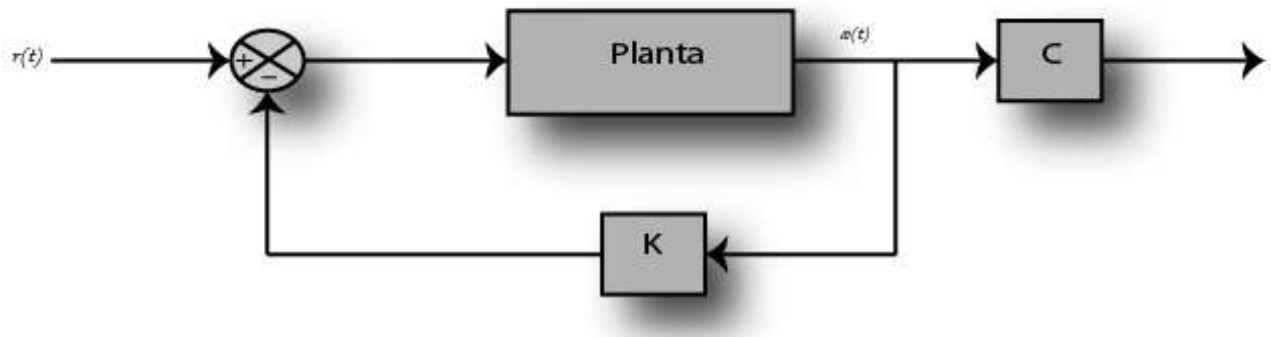


Figura 3.2: Esquema general de un controlador

Definición 1 *Un sistema se dice completamente controlable si es posible encontrar una entrada $u(t)$ que pueda llevar al sistema de cualquier estado inicial $x(t_0)$ a cualquier estado final $x(t_f)$ para un intervalo de tiempo finito especificado $(t_f - t_0)$.*

Sabiendo esto, a continuación se enuncia el teorema de controlabilidad:

Teorema 2 *El sistema descrito por (3.13) es controlable si y solo si la matriz de controlabilidad R es no singular.*

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \tag{3.13}$$

$$R = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix}$$

Observación 3 *Cabe destacar que el concepto de controlabilidad no significa que una vez alcanzado un estado sea siempre posible mantenerlo ahí, sino solamente que puede alcanzarse ese estado en un intervalo de tiempo determinado.*

3.3. Forma Canónica Observable

Esta forma obtiene su nombre debido a que se pueden construir observadores de estado para cualquier sistema representado de esta manera. Para generar la estructura general de la forma canónica observable se considerara la función de transferencia descrita en (3.2):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}$$

Reacomodando términos de la ecuación anterior:

$$(s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0)Y(s) = (b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_1s + b_0)U(s)$$

$$s^n Y(s) + s^{n-1}[a_{n-1}Y(s) - b_{n-1}U(s)] \quad (3.14)$$

$$+ \dots + s[a_1Y(s) - b_1U(s)] + [a_0Y(s) - b_0U(s)] = 0$$

Despejando $sY(s)$:

$$\begin{aligned} sY(s) &= -[a_{n-1}Y(s) - b_{n-1}U(s)] - \frac{1}{s}[a_{n-2}Y(s) - b_{n-2}U(s)] \quad (3.15) \\ &\quad - \dots - \frac{1}{s^{n-2}}[a_1Y(s) - b_1U(s)] - \frac{1}{s^{n-1}}[a_0Y(s) - b_0U(s)] \end{aligned}$$

Se definen las expresiones siguientes como variables de estado:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -(a_0y - b_0u) \\ \dot{x}_2 &= x_1 - (a_1y - b_1u) \\ \dot{x}_3 &= x_2 - (a_2y - b_2u) \\ &\vdots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_{n-2} - (a_{n-2}y - b_{n-2}u) \\ \dot{x}_n &= x_{n-1} - (a_{n-1}y - b_{n-1}u) \end{aligned} \quad (3.16)$$

Aplicando la teoría de Laplace obtenemos:

$$\begin{aligned}
sx_1(s) &= -(a_0y - b_0u) \\
sx_2(s) &= -\frac{1}{s}(a_0y - b_0u) - (a_1y - b_1u) \\
sx_3(s) &= -\frac{1}{s^2}(a_0y - b_0u) - \frac{1}{s}(a_1y - b_1u) - (a_2y - b_2u) \\
&\vdots \\
sx_{n-1}(s) &= -\frac{1}{s^{n-2}}(a_0y - b_0u) - \frac{1}{s^{n-3}}(a_1y - b_1u) - \dots - (a_{n-2}y - b_{n-2}u) \\
sx_n(s) &= -\frac{1}{s^{n-1}}(a_0y - b_0u) - \frac{1}{s^{n-2}}(a_1y - b_1u) - \dots - \frac{1}{s}(a_{n-2}y - b_{n-2}u) \\
&\quad - (a_{n-1}y - b_{n-1}u)
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Comparando (3.17) con (3.15) se puede ver que:

$$y = x_n \tag{3.18}$$

Al hacer el reacomodo de todas las ecuaciones anteriores en su forma matricial se obtiene:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -a_0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -a_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & -a_{n-2} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{n-2} \\ b_{n-1} \end{bmatrix} u(t) \\
y &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Observación 4 Se puede observar que el valor de la matriz A en la forma canónica observable es la transpuesta de esta misma en la forma canónica controlable.

3.3.1. Observabilidad

Si por restricciones físicas del sistema no se tiene acceso a las variables requeridas se construye un observador de estado para resolver este problema. Un observador de estado es utilizado para describir un esquema virtual que nos permite estimar las variables o estados de un sistema en base a mediciones de las señales de entrada (o de señales de control) y salida. Los observadores nos permiten obtener información estimada acerca del valor que toman los estados observados, permitiendo con esto conocer un valor aproximado al valor real.

La estructura general de un observador se muestra en la Figura (3.3).

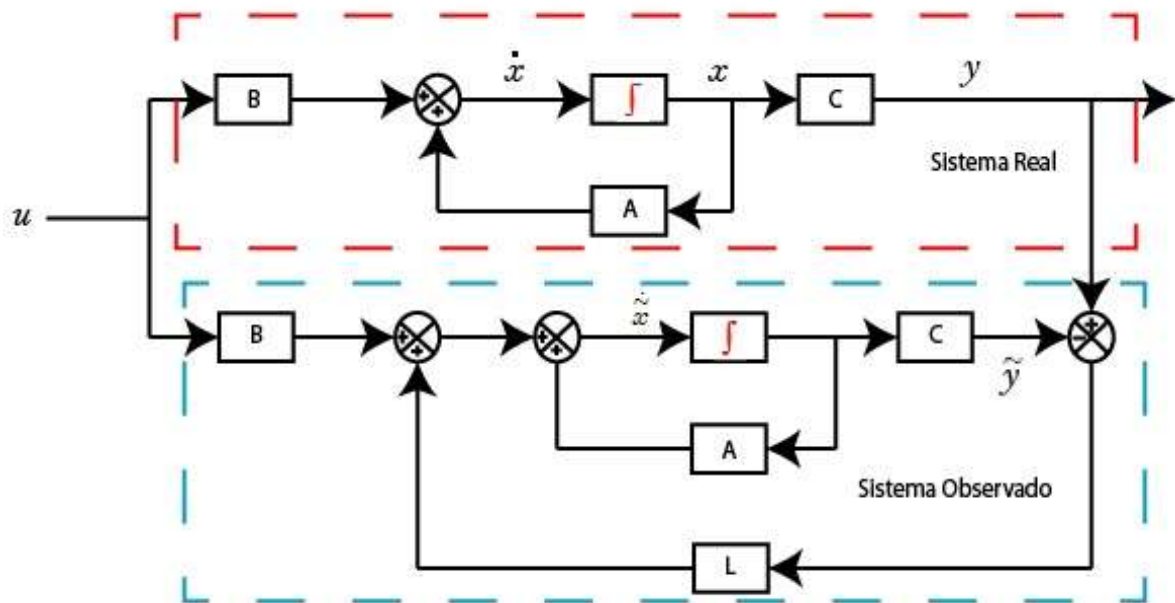


Figura 3.3: Estructura de un observador de estado.

Existen varios tipos de observadores de estado, el presente trabajo se enfoca en el uso de los observadores de Luenberger, observadores con entradas desconocidas y observadores dedicados todos aplicados al área de diagnóstico de fallas.

Para la realización de cualquiera de estos tipos de observador de estado es necesario tomar en cuenta el concepto de observabilidad, el cual se presenta en la definición 1.

Definición 5 *Un sistema se dice observable si es completamente posible la reconstrucción*

de los estados del sistema a partir de las entradas y salidas del mismo en un intervalo finito de tiempo.

Para obtener la observabilidad de un sistema comenzaremos tomando en cuenta la ecuación de salida del sistema:

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.20)$$

Derivando la ecuación anterior:

$$\dot{y}(t) = C\dot{x}(t) \quad (3.21)$$

Se sustituye el valor de \dot{x} de la ecuación (3.13) y se desarrollan las operaciones correspondientes:

$$\dot{y}(t) = C[Ax(t) + Bu(t)] \quad (3.22)$$

$$\dot{y}(t) = CAx(t) + CBu(t) \quad (3.23)$$

Derivando nuevamente la ecuación (3.23):

$$\ddot{y}(t) = CA\dot{x}(t) + CB\dot{u}(t) \quad (3.24)$$

Sustituyendo \dot{x} y desarrollando las operaciones resultantes:

$$\ddot{y}(t) = CA[Ax(t) + Bu(t)] + CB\dot{u}(t) \quad (3.25)$$

$$\ddot{y}(t) = CA^2x(t) + CABu(t) + CB\dot{u}(t)$$

El proceso de derivación y sustitución se continua n veces para obtener:

$$y^{(n)}(t) = CA^{n-1}x(t) + CA^{n-2}Bu(t) + \dots + CBu^{(n-2)}(t) \quad (3.26)$$

Ahora se obtiene la representación matricial de la ecuación anterior:

$$\begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ \vdots \\ y^{n-1} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}}_O x + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ Cb & 0 & \cdots & 0 \\ CA b & Cb & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{n-2} b & CA^{n-1} b & \cdots & 0 \end{bmatrix}}_P \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \\ \ddot{u} \\ \vdots \\ u^{n-2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Teorema 6 *El sistema descrito por la ecuación (3.13) es observable si y solo si la matriz de observabilidad O es de rango pleno.*

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

3.4. Observadores con entradas desconocidas

Esta sección está enfocada al diseño de observadores para una clase particular de sistema, en el cual la incertidumbre del sistema se puede considerar como una perturbación aditiva desconocida en la ecuación dinámica del sistema como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.29)$$

donde $x(t) \in R^n$ es el vector de estado, $y(t) \in R^m$ es el vector de salida, $u(t) \in R^r$ es el vector de entradas conocidas y $d(t) \in R^q$ es el vector de entradas desconocidas (o perturbaciones). A, B, C y E son matrices conocidas de dimensiones adecuadas.

Definición 7 *Observador con Entradas Desconocidas.*

Un observador se define como observador con entradas desconocidas para el sistema descrito por la ecuación (3.29), si su vector de error de estados estimados $e(t)$ se aproxima a cero asintóticamente, sin importar la presencia de entradas desconocidas (perturbaciones) en el sistema.

La estructura de un observador con entradas desconocidas de orden completo esta descrita de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Fz(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x} &= z(t) + Hy(t)\end{aligned}\quad (3.30)$$

donde $\hat{x} \in R^n$ es el vector de estados estimados, $z \in R^n$ es el estado del observador de orden completo, y F, T, K, H son matrices que serán diseñadas para cumplir con el desacoplamiento de entradas desconocidas y algunos otros requerimientos de diseño. El observador descrito por la ecuación (3.30) se ilustra en la Figura (3.4):

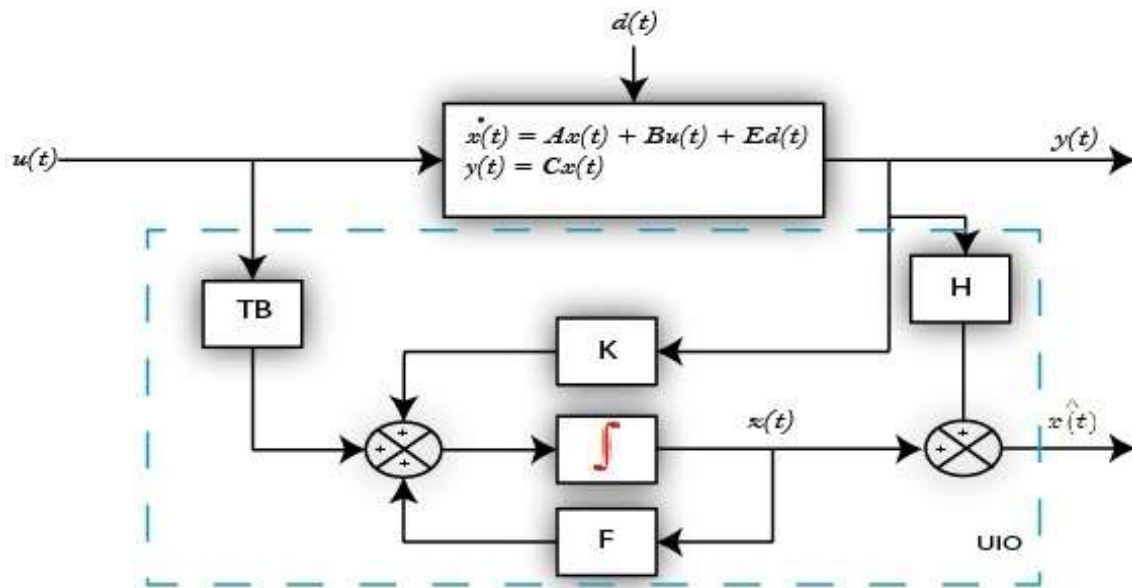


Figura 3.4: Estructura de un observador con entradas desconocidas de orden completo

Al aplicar el observador descrito en (3.30) al sistema (3.29) la estimación del error

$e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ es gobernada por la ecuación (3.31) como se muestra a continuación:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (3.31)$$

Primeramente hay que tomar en cuenta que el valor de K indicado en (3.30) es igual a:

$$K = K_1 + K_2 \quad (3.32)$$

Al derivar $y(t)$ de la ecuación(3.29) se obtiene lo siguiente:

$$\dot{y}(t) = C\dot{x}(t) \quad (3.33)$$

Sustituyendo valores de (3.29) y (3.30) en (3.31) obtenemos:

$$\dot{e}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) - [z(t) + Hy(t)] \quad (3.34)$$

Sustituyendo $z(t)$ de (3.30) en (3.34):

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ &\quad - [Fz(t) + T Bu(t) + Ky(t) + Hy(t)] \end{aligned} \quad (3.35)$$

Sustituyendo (3.32) y (3.33):

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ &\quad - \left[Fz(t) + T Bu(t) + [(K_1 + K_2)y(t)] + H[C\dot{x}(t)] \right] \end{aligned} \quad (3.36)$$

Ahora se sustituye $\dot{x}(t)$ de (3.29) en la ecuación (3.36):

$$\begin{aligned} \dot{e} &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) - Fz(t) - T Bu(t) \\ &\quad - K_1 y(t) - K_2 y(t) - HC[Ax(t) + Bu(t) + Ed(t)] \end{aligned} \quad (3.37)$$

Realizando una expansión de los términos de la ecuación:

$$\begin{aligned}\dot{e} &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) - Fz(t) - TBu(t) \\ &\quad - K_1y(t) - K_2y(t) - HCAx(t) - HCBu(t) - HCEd(t)\end{aligned}\tag{3.38}$$

Sustituyendo el valor de $y(t)$ de la ecuación (3.29) solo para el término que contiene a K_1 en la ecuación: (3.38):

$$\begin{aligned}\dot{e} &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) - Fz(t) - TBu(t) \\ &\quad - K_1Cx(t) - K_2y(t) - HCAx(t) - HCBu(t) - HCEd(t)\end{aligned}\tag{3.39}$$

A continuación se procede a agrupar términos de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= (A - HCA - K_1C)x(t) + (I - T - HC)Bu(t) \\ &\quad + (I - HC)Ed(t) - Fz(t) - K_2y(t)\end{aligned}\tag{3.40}$$

De (3.30) obtenemos $x(t)$ y se sustituye en (3.40):

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= (A - HCA - K_1C) \left(e(t) + \hat{x}(t) \right) + (I - T - HC)Bu(t) \\ &\quad + (I - HC)Ed(t) - Fz(t) - K_2y(t)\end{aligned}\tag{3.41}$$

Realizando las operaciones correspondientes en (3.41) se obtiene:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= (A - HCA - K_1C)e(t) + (A - HCA - K_1C)\hat{x}(t) \\ &\quad + (I - T - HC)Bu(t) + (I - HC)Ed(t) - Fz(t) - K_2y(t)\end{aligned}\tag{3.42}$$

Sustituyendo $\hat{x}(t)$ a partir de (3.30) en (3.42):

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) = & (A - HCA - K_1C)e(t) + (A - HCA - K_1C)(z(t) + Hy(t)) \\ & + (I - T - HC)Bu(t) + (I - HC)Ed(t) - Fz(t) - K_2y(t)\end{aligned}$$

Desarrollando las operaciones restantes en la ecuación (3.42):

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) = & (A - HCA - K_1C)e(t) + (A - HCA - K_1C)z(t) \\ & + (A - HCA - K_1C)Hy(t) + (I - T - HC)Bu(t) \\ & + (I - HC)Ed(t) - Fz(t) - K_2y(t)\end{aligned}\tag{3.43}$$

Por último se agrupan términos para obtener la ecuación en la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) = & (A - HCA - K_1C)e(t) + [(A - HCA - K_1C) - F]z(t) \\ & + [(A - HCA - K_1C)H - K_2]y(t) + (I - T - HC)Bu(t) + (I - HC)Ed(t)\end{aligned}\tag{3.44}$$

Para poder desacoplar el vector de entradas desconocidas es necesario cumplir con las siguientes relaciones:

$$(I - HC)E = 0\tag{3.45}$$

$$T = I - HC\tag{3.46}$$

$$F = A - HCA - K_1C\tag{3.47}$$

$$K_2 = FH\tag{3.48}$$

Si todas las relaciones anteriores se cumplen el error del estado estimado será:

$$\dot{e}(t) = Fe(t) \quad (3.49)$$

Si todos los eigenvalores de la matriz F son estables, es decir que el valor de su parte real sea negativa, el error $e(t)$ se aproximará asintóticamente a cero, esto quiere decir que $\hat{x} \rightarrow x$. Con base en esto se llega a la conclusión de que el observador (3.30) es un observador con entradas desconocidas (UIO) para el sistema (3.29) de acuerdo a la definición 2. El diseño de este UIO se basa en la solución de las ecuaciones (3.32) y (3.45) - (3.48) tomando en cuenta que todos los eigenvalores de la matriz F sean estables. Antes de mencionar las condiciones necesarias para la existencia de un UIO, se establecen dos lemas importantes.

Lema 8 *La ecuación (3.45) tiene solución si y sólo si:*

$$\text{rango}(CE) = \text{rango}(E) \quad (3.50)$$

y existe una solución especial para esto:

$$H = E \left[(CE)^T CE \right]^{-1} (CE)^T \quad (3.51)$$

Lema 9 *Sea:*

$$C_1 = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

entonces la detectabilidad² para el par (C_1, A) es equivalente a la del par (C, A) .

Teorema 10 *Las condiciones suficientes y necesarias para que (3.30) sea un UIO para el sistema definido por (3.29) son:*

²El concepto de detectabilidad se entiende como la condición en la cual todos los modos no observables de un par son estables.

- i) $\text{rank}(CE) = \text{rank}(E)$
- ii) (C, A_1) es un par detectable, donde:

$$A_1 = A - E \left[(CE)^T CE \right]^{-1} (CE)^T CA \quad (3.53)$$

El máximo número de perturbaciones que es posible desacoplar para cumplir con la condición i) no puede exceder el número de mediciones independientes disponibles, es decir, el número de filas independientes de la matriz C no puede ser menor que el número de columnas independientes de la matriz E .

Los Lemas 1 y 2 así como el Teorema 3 pueden verificarse en el Capítulo 3 de [28].

Una parte importante en el diseño de un UIO es la adecuada selección de K_1 , después de que se ha comprobado la condición ii) del Teorema 10, para lograr estabilizar la matriz F . Cabe señalar que la matriz K_1 no es única, debido a la naturaleza multivariable del problema, esto genera una libertad de diseño después de haber satisfecho las condiciones de desacoplamiento de las entradas desconocidas. Esta situación se puede aprovechar para hacer que los residuos de diagnóstico tengan características direccionales o propiedades de variación mínima.

3.4.1. Procedimiento general de diseño para un UIO

Con base en la teoría descrita en la sección anterior se describirá a detalle el procedimiento simplificado de un UIO.

1. Verificar la condición de rango para E y CE : Si el $\text{rango}(CE) \neq \text{rango}(E)$, el UIO no existe, ir al paso 10.

2. Calcular H, T y A_1 , donde:

$$\begin{aligned} H &= E \left[(CE)^T CE \right]^{-1} (CE)^T \\ T &= I - HC \\ A_1 &= TA \end{aligned} \quad (3.54)$$

3. Checar la observabilidad del sistema: Si (C, A_1) es observable, el UIO existe y K_1 puede ser calculado usando asignación de polos, ir al paso 9.

4. Construir una matriz de transformación P para la descomposición en la forma canónica observable:

$$\begin{aligned} P &= [p_1, \dots, p_{n_0}; p_{n_0+1}, \dots, p_n]^T \\ n_1 &= \text{rango}(W_o) \end{aligned} \quad (3.55)$$

Donde W_0 es la matriz de observabilidad del par (C, A_1) .

5. Realizar una descomposicion canonica en el par (C, A_1) :

$$PA_1P^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{12} & A_{22} \end{bmatrix} \quad CP^{-1} = \begin{bmatrix} C^* & 0 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

6. Comprobar la estabilidad del par (C, A_1) : Si alguno de los eigenvalores de A_{22} es inestable, es decir, el valor de su parte real es positiva, el UIO no existe, ir al paso 10.

7. Seleccionar n_1 eigenvalores deseables y asignarlos a $A_{11} - K_p^1 C^*$ usando asignación de polos.

8. Calcular $K_1 = P^{-1}K_p = P^{-1} \left[(K_p^1)^T (K_p^2)^T \right]$, donde K_p^2 puede ser cualquier matriz de $(n - n_1) \times m$.

9. Calcular F y K :

$$F = A_1 - K_1 C \quad K = K_1 + K_2 = K_1 + FH \quad (3.57)$$

10. Fin del procedimiento.

El presente trabajo de tesis utiliza modelos donde el par (C, A_1) es observable por lo cual no se requiere el uso de los pasos del número 4 al 8.

3.4.2. Esquemas robustos de detección y aislamiento de fallas basados en UIO's.

Esquemas robustos de detección de fallas basados en UIO's.

La tarea principal de la detección robusta de fallas es la generación de un residuo que sea robusto a las incertidumbres presentes en el sistema. Para detectar una falla en particular, el residuo tiene que ser sensible a esa falla. Un sistema con posibles fallas en sus sensores puede ser representado de la siguiente forma [28]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) \\ y(t) &= Cx(t) + f_s(t)\end{aligned}\tag{3.58}$$

Para que sea posible la detección de fallas en sensores en el sistema (3.58) los residuos generados tiene que ser diseñados con sensibilidad al vector de fallas $f_s(t)$. Esta condición normalmente se satisface debido a que el vector de fallas $f_s(t)$ tiene un efecto directo en el residuo $r(t)$. Los residuos robustos pueden ser usados para detectar fallas de acuerdo a ciertos umbrales:

$$\begin{aligned}\| r(t) \| &< \textit{Umbral} \text{ para condiciones libres de falla} \\ \| r(t) \| &> \textit{Umbral} \text{ para condiciones de falla}\end{aligned}\tag{3.59}$$

3.4.3. Esquemas robustos de aislamiento de fallas basados en UIO's.

El problema del aislamiento de fallas es el localizar la falla, es decir, determinar en cual sensor o actuador ocurrió la falla. Una de las propuestas para facilitar el aislamiento de fallas es el diseño de residuos estructurados. El término “estructurados” significa en este contexto que cada residuo es diseñado para ser sensible a un cierto grupo de fallas e insensible a otras. Las propiedades de sensibilidad e insensibilidad hacen posible el aislamiento. La situación ideal es hacer cada residuo sensible a sólo una falla en particular e insensible a todas las restantes. Sin embargo, esta situación ideal normalmente es difícil de alcanzar e incluso si

se llega a esta situación ideal la libertad de diseño será muy reducida y no será suficiente para alcanzar la robustez. Para lograr la robustez con la mayor libertad de diseño posible, un esquema muy común de aislamiento de fallas consiste en hacer cada residuo sensible a todas las fallas en los sensores (o actuadores) exceptuando solo uno de ellos. En el presente trabajo sólo se utiliza el concepto de aislamiento para sensores.

Esquemas robustos de aislamiento de fallas en sensores

Para el diseño de esquemas robustos de aislamiento de fallas en sensores, es necesario considerar todos los actuadores como libres de fallas y de esta forma el sistema puede ser descrito por:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Ed(t) & (3.60) \\ y^j(t) &= C^j(t) + f_s^j(t) & \text{para } j = 1, 2, \dots, m \\ y_j(t) &= c_j x(t) + f_{s_j}(t) \end{aligned}$$

donde $c_j \in R^{1 \times n}$ es la j -ésima fila de la matriz C , $C^j \in R^{(m-1) \times n}$ se obtiene de la matriz C eliminando la j -ésima fila c_j , y_j es el j -ésimo componente de y y $y^j \in R^{m-1}$ se obtiene del vector y eliminando el j -ésimo componente y_j . Con base en esta descripción, se pueden construir m generadores de residuos basados en UIO:

$$\begin{aligned} \dot{z}^j(t) &= F^j z^j(t) + T^j Bu(t) + K^j y^j(t) & \text{para} & (3.61) \\ r^j(t) &= (I - C^j H^j) y^j(t) - C^j z^j(t) & j = 1, 2, \dots, m \end{aligned}$$

donde las matrices de parámetros deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
H^j C^j E &= E \\
T^j &= I - H^j C^j \\
F^j &= T^j A - K_1^j C^j \\
K_2^j &= F^j H^j \\
K^j &= K_1^j + K_2^j
\end{aligned} \tag{3.62}$$

para $j = 1, 2, \dots, m$.

Se puede observar, que cada generador de residuos es afectado por todas las entradas y todas excepto una salida. Cuando todos los actuadores del sistema se encuentran libres de falla y una falla ocurre en el j -ésimo sensor, el residuo cumplirá la siguiente lógica de aislamiento:

$$\| r^j(t) \| < T_{SFI}^j$$

donde T_{SFI}^j ($j = 1, 2, \dots, m$) son umbrales de aislamiento.

3.5. Observadores dedicados

Otra forma de abordar el problema del diagnóstico de fallas en base a observadores de estado es mediante la aplicación de esquemas de observadores dedicados (DOS³), los cuales están basados en la construcción de varios observadores de Luenberger para poder hacer la detección de múltiples fallas en un sistema.

Definición 11 *En un esquema de observadores dedicados una falla en el k -ésimo sensor provocará que el estado estimado del k -ésimo observador presente una diferencia en relación al estado estimado de los otros $k - 1$ observadores, lo cual permite la detección y aislamiento de la falla de forma directa.*

³Por sus siglas en ingles *Dedicated Observer Scheme*

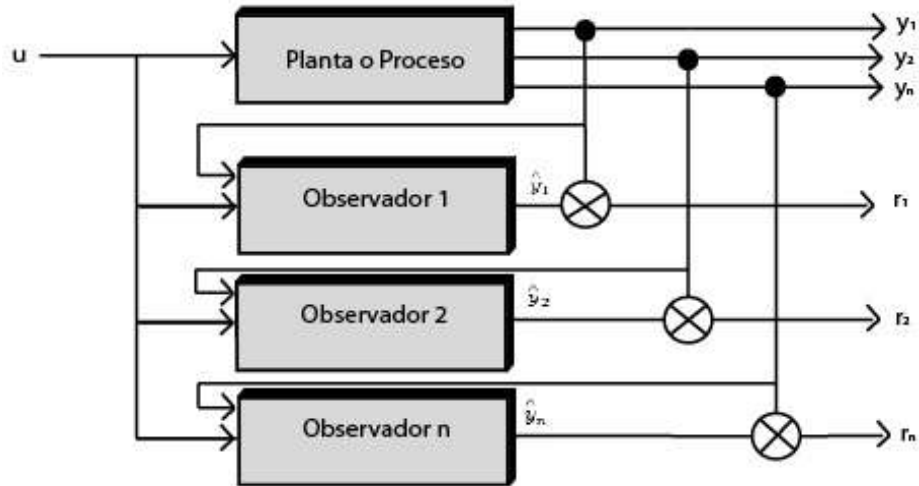


Figura 3.5: Esquema de observadores dedicados

El modelo representado en la Figura (3.5) expresado en forma de variables de estado queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\
 y_1 &= C_1x(t) + f_1(t) \\
 y_2 &= C_2x(t) + f_2(t) \\
 &\vdots \\
 y_k &= C_kx(t) + f_k(t)
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

Donde $x(t) \in R^n$ es el vector de estados, $y(t) = [y_1, y_2, \dots, y_k] \in R^q$ es el vector de salida, $u(t) \in R^p$ es el vector de entradas, A es la matriz de estados, B es la matriz de entradas, C es la matriz de salida y $f(t)$ representa las fallas presentes en cada salida.

El error de salida para un observador de Luenberger está definido por la ecuación:

$$e(t) = \tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t) \tag{3.64}$$

La estructura de un observador de Luenberger de orden completo está compuesta por una copia del sistema adicionándole una matriz para la corrección del error de estado:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LCe(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LC\tilde{x}(t)\end{aligned}\quad (3.65)$$

Donde $\hat{x}(t) \in R^n$ es el vector de estados estimados, L es la matriz de ganancias necesaria para que los estados estimados tiendan a los estados reales del sistema, $\hat{y}(t)$ y $\hat{x}(t) \in R^n$ representan las salidas estimadas y los estados estimados del sistema respectivamente.

A continuación es necesario el análisis de la dinámica del error del sistema:

$$\dot{e}(t) = \dot{\tilde{x}}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t)\quad (3.66)$$

Sustituyendo de (3.63) y (3.65) en (3.66):

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}}(t) &= Ax(t) + Bu(t) - [A\hat{x}(t) + Bu(t) + LC\tilde{x}(t)] \\ \dot{\tilde{x}}(t) &= A(x(t) - \hat{x}(t)) - LC\tilde{x}(t) = (A - LC)\tilde{x}(t)\end{aligned}\quad (3.67)$$

Para conseguir que el observador funcione adecuadamente es necesario satisfacer la siguiente condición:

$$i) \tilde{x}(t) \longrightarrow 0\quad (3.68)$$

Lo que es igual a:

$$\hat{x}(t) \longrightarrow x(t)\quad (3.69)$$

Si se logra que los valores propios resultantes de $A - LC$ sean estables y por lo tanto se ubiquen en el semiplano izquierdo del plano complejo, entonces se cumplirá con (3.69) y el error tenderá asintóticamente a cero sin importar las condiciones iniciales del sistema, esto quiere decir que el observador Luenberger mejora la estimación de sus estados con el paso del tiempo hasta alcanzar el valor actual de estos.

Teorema 12 *La matriz de ganancias L existe si y solo si el sistema es observable.*

Entonces el problema de diseño de un observador Luenberger se reduce a la obtención de la matriz de ganancias L para lograr una correcta estimación de los estados, este proceso se puede llevar a cabo de diversas formas entre las que se encuentran la fórmula de Ackerman o la utilización de paquetes de software con herramientas de control. En este trabajo el cálculo de esta matriz se llevará a cabo mediante el software MATLAB por ubicación de polos mediante el comando *place*.

Con base en (3.63) y (3.65) se llega al modelo para un esquema de observadores dedicados:

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}}_1(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LCe(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_1[y_1(t) - \hat{y}_1(t)] \\
 \dot{\hat{x}}_2(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LCe(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_2[y_2(t) - \hat{y}_2(t)] \\
 &\vdots \\
 \dot{\hat{x}}_k(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LCe(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L_k[y_k(t) - \hat{y}_k(t)]
 \end{aligned} \tag{3.70}$$

Se puede apreciar en (3.70) que la matriz de ganancias L esta seccionada para afectar a cada una de las salidas de forma independiente.

Capítulo 4

Casos de Estudio

4.1. Modelo del sistema hidráulico de dos tanques

El control de nivel de líquido en diversos tanques y depósitos, y el flujo entre ellos es una aplicación muy común en los procesos industriales tales como: procesos petroquímicos, tratamiento de agua, fabricación de papel e instalaciones frigoríficas industriales terrestres. En todos estos procesos es necesario tener siempre control y regulación del flujo y nivel de los tanques.

El sistema sobre el cual se aplicaran los esquemas de observadores propuestos es un sistema hidráulico de dos tanques (SHDT). La información del modelo del SHDT se obtuvo en base a un prototipo existente en la división de posgrado de la *Facultad de Ingeniería Eléctrica de la UMSNH*. Aplicaciones relacionadas al tema de diagnóstico de fallas para este sistema se encuentran en [26], [35], [3]. El SHDT es un sistema dinámico no lineal el cual está formado de dos tanques de almacenamiento de líquido interconectados, dos sensores ultrasónicos de nivel, dos electro-válvulas industriales para el control de flujo de líquido y una bomba de suministro constante de líquido a la entrada. El SHDT se ilustra en la Figura (4.1).

El SHDT tiene una configuración tipo cascada, es decir, cada una de las electro-válvulas se encuentran conectadas a la salida de cada uno de los tanques. El flujo de salida del primer tanque es el flujo de entrada al segundo tanque, por esta razón, el sistema presenta una



Figura 4.1: Sistema Hidráulico de Dos Tanques

conexión entre las variables de control.

El SHDT presenta dos entradas y dos salidas; las entradas corresponden a los voltajes aplicados a cada una de las electro-válvulas mientras las salidas son los niveles de líquido en cada tanque.

En el presente trabajo se aplicaran dos esquemas de detección de fallas por medio de observadores, observadores con entradas desconocidas y observadores dedicados, para poder realizar una comparación de las características de cada observador y sus ventajas respecto a cada uno de ellos.

4.1.1. Modelado del sistema

Para realizar el modelado de cualquier sistema hidráulico o de control de nivel de líquido se deben tomar en cuenta ciertos parámetros comenzando con el establecimiento del régimen

de flujo [25], [19]. En los sistemas que implican flujo de líquidos pueden existir dos regímenes diferentes de flujo estos son el flujo laminar y el flujo turbulento. El caso laminar presenta un flujo estable en las corrientes, sin turbulencia. Los sistemas que contienen un flujo laminar se pueden representar mediante ecuaciones diferenciales lineales. Para el caso de un flujo turbulento los sistemas se representan mediante ecuaciones diferenciales no lineales, sin embargo, si se puede delimitar la región de operación estas ecuaciones diferenciales se pueden linealizar.

Para conocer en que régimen se encuentra un sistema se utiliza el número de Reynolds, este es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, para valores menores a 2000 el flujo se considera laminar mientras que para valores mayores de 3000 se considera turbulento. Para el caso del sistema utilizado en este trabajo se considera un número de Reynolds mayor a 4000 por lo que el sistema presenta flujo turbulento, y por lo tanto su comportamiento es no lineal.

Cuando el flujo es turbulento el flujo esta dado por:

$$f_t = \omega(t)\sqrt{h(t)} \quad (4.1)$$

Donde f es el flujo, ω es el factor de apertura de la válvula y h es la altura de nivel de líquido.

Otros parámetros a considerar son:

Resistencia. Se define como el cambio en la variación de nivel necesaria para generar un cambio de una unidad en la velocidad del flujo, y está representada por:

$$R = \frac{\Delta h}{\Delta f} \quad (4.2)$$

Donde R es la resistencia, h es la altura de nivel de líquido y f es el flujo volumétrico de líquido.

Para nuestro caso, donde el flujo se considera turbulento, la resistencia será:

$$R_t = \frac{2h}{f} \quad (4.3)$$

Capacitancia. Se define como el cambio necesario en la cantidad de líquido almacenado, para producir un cambio de una unidad en la altura.

$$C = \frac{\Delta v}{\Delta h} = \frac{dv}{dh} \quad (4.4)$$

Donde C es la capacitancia, v es el volumen y h es la altura de nivel de líquido.

Siempre y cuando el tanque tenga paredes rectas, es decir sección transversal constante, como en el caso del modelo utilizado en este trabajo, la capacitancia corresponderá al área de sección transversal del contenedor.

$$C = \frac{dv}{dh} = A_t \quad (4.5)$$

Donde C es la capacitancia, v es el volumen, h es la altura de nivel del líquido y A_t es el área de sección transversal para un contenedor con paredes rectas.

La ecuación que describe el comportamiento de un sistema de nivel de líquido para un sólo tanque con un área de sección transversal constante y un flujo turbulento donde participan un flujo de entrada y un flujo de salida se obtiene a partir de las consideraciones siguientes:

$$v = Ch(t) \quad (4.6)$$

$$f_e - f_s = \frac{dv}{dt} \quad (4.7)$$

Donde f_e y f_s son los flujos de entrada y salida respectivamente y t es el tiempo.

Al derivar la ecuación (4.6) se obtiene:

$$\frac{dv}{dt} = C \frac{dh}{dt} \quad (4.8)$$

Despejamos la razón de cambio en la altura:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{dv}{dt} \right) \quad (4.9)$$

Sustituyendo valores de (4.7) en (4.9):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{f_e - f_s}{C} \quad (4.10)$$

Por último sustituimos utilizando (4.1) y (4.4) en (4.10):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{f_e}{C} - \frac{\omega(t)\sqrt{h(t)}}{C} = \frac{f_e}{A_t} - \frac{\omega(t)\sqrt{h(t)}}{A_t} \quad (4.11)$$

Sin embargo, el sistema empleado en este trabajo se basa en una estructura con dos tanques interconectados por lo cual se vuelve necesario obtener un modelo para un sistema de dos tanques en base a (4.11) tomando en cuenta que el flujo de salida del primer tanque será el flujo de entrada del segundo, así, el modelo matemático del sistema SHDT queda definido como sigue:

$$\begin{aligned} \dot{h}_1(t) &= \frac{f_e}{A_t} - \frac{\omega_1(t)\sqrt{h_1(t)}}{A_t} \\ \dot{h}_2(t) &= \frac{\omega_1(t)\sqrt{h_1(t)}}{A_t} - \frac{\omega_2(t)\sqrt{h_2(t)}}{A_t} \\ \dot{\omega}_1(t) &= \frac{K_{e1}}{T}V_1(t) - \frac{1}{T}\omega_1(t) \\ \dot{\omega}_2(t) &= \frac{K_{e2}}{T}V_2(t) - \frac{1}{T}\omega_2(t) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Donde h_i, ω_i y v_i , para $i = 1, 2$ son los niveles del i -ésimo tanque, el factor de apertura de la i -ésima electro-válvula y el voltaje de entrada de la i -ésima electro-válvula respectivamente. T, K_{e1}, K_{e2} son la constante de tiempo y las ganancias estáticas de las válvulas respectivamente ; f_e es el flujo constante de entrada al tanque 1.

Al transformar el sistema(4.12) a su versión en espacio de estados se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix} -\frac{\omega_1}{2A_t \sqrt[3]{h_1}} & -\frac{\sqrt[2]{h_1}}{A_t} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T} & 0 & 0 \\ \frac{\omega_1}{2A_t \sqrt[3]{h_1}} & \frac{\sqrt[2]{h_1}}{A_t} & -\frac{\omega_2}{2A_t \sqrt[3]{h_2}} & -\frac{\sqrt[2]{h_2}}{A_t} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix}}^A \overbrace{\begin{bmatrix} h_1 \\ \omega_1 \\ h_2 \\ \omega_2 \end{bmatrix}}^x + \overbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K_{e1}}{T} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{e2}}{T} \end{bmatrix}}^B \overbrace{\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}}^u \\
 y &= \overbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^C \overbrace{\begin{bmatrix} h_1 \\ \omega_1 \\ h_2 \\ \omega_2 \end{bmatrix}}^x
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Debido a que el SHDT es un modelo no lineal que presenta flujo turbulento no es posible su utilización directa para cualquier valor, por lo cual, se vuelve necesario trabajar con este sistema en puntos de operación determinados para linealizar su comportamiento. El ejemplo presentado en este trabajo utiliza puntos de operación 25/25, esto es, 25cm de líquido en el tanque 1 y 25cm de líquido en el tanque 2.

Las constantes del modelo descrito por el sistema (4.13) son las siguientes [2], [3]:

- ▶ Altura del tanque 1 (h_1) = 0,25 m
- ▶ Altura del tanque 2 (h_2) = 0,25 m
- ▶ Factor de apertura de la electro-válvula 1 (w_1) = $0,20795 \times 10^{-3}$
- ▶ Factor de apertura de la electro-válvula 2 (w_2) = $0,20795 \times 10^{-3}$
- ▶ Ganancia estática de la válvula 1 (K_{e1}) = $0,03528 \times 10^{-3}$
- ▶ Ganancia estática de la válvula 2 (K_{e2}) = $0,03528 \times 10^{-3}$
- ▶ Constante de tiempo (T) = 2,6525 s
- ▶ Área de sección transversal de los tanques (A_t) = $0,16 \text{ m}^2$

Por último se incluye también la matriz E , la cual nos dice en que estados pueden presentarse fallas:

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Se observa que en la matriz anterior se contemplan posibles fallas en todos los estados, sin embargo como se mostrara en secciones posteriores solo se simularon fallas en sensores.

4.1.2. Aplicación del esquema de UIO's al modelo del SHDT

Diseño de un UIO de orden completo

Para el cálculo de un observador con entradas desconocidas de orden completo aplicado al modelo del sistema de dos tanques es necesario seguir el procedimiento indicado en el Capítulo 3 en la sección 3.4.1 del presente trabajo, donde se detalla paso a paso los requerimientos necesarios para el diseño de un observador capaz de desacoplar las perturbaciones en el sistema. El calculo de las matrices se realizo por medio del software MatLab, el programa realizado se incluye en el Apéndice A.1.

Tomando en cuenta el procedimiento mencionado anteriormente el primer paso para el diseno de un UIO es checar la condicion de rango de CE y E:

$$\text{rank}(E) = \text{rank}(CE) \quad (4.14)$$

Al comprobar que la condición de (4.14) se cumple, se procede al cálculo de las matrices $H, T,$ y A_1 , obteniendo los siguientes valores:

$$H = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0,75 & -0,25 & -0,25 & -0,25 \\ -0,25 & 0,75 & -0,25 & -0,25 \\ -0,25 & -0,25 & 0,75 & -0,25 \\ -0,25 & -0,25 & -0,25 & 0,75 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0,00129 & -3,03075 & 0,0003225 & 0,8755 \\ 0 & -0,28275 & 0,0003225 & 0,8755 \\ 0,00129 & 3,21925 & -0,0009675 & -2,2495 \\ 0 & 0,094249 & 0,0003225 & 0,4985 \end{bmatrix}$$

A continuación se comprueba la observabilidad del par (C, A_1) , al confirmar esta condición se puede proceder al cálculo de la matriz de ganancias K_1 por medio del método de asignación de polos, se utilizaron diferentes polos seleccionados de manera arbitraria hasta encontrar valores en donde se observó un comportamiento estable del sistema ya que para ciertos valores el sistema se vuelve inestable, los polos seleccionados se ubicaron en $(-2, -3, -4, -5)$ y se introdujeron al programa generado en MatLab utilizando el comando *place*, obteniendo:

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1,99871 & -3,03075 & 0,0003225 & 0,8755 \\ 0 & 2,71725 & 0,0003225 & 0,8755 \\ 0,00129 & 3,21925 & 3,999 & -2,2495 \\ 0 & 0,094249 & 0,0003225 & 5,4985 \end{bmatrix}$$

Al haber obtenido la matriz de ganancias K_1 el último paso es el cálculo de las matrices F y K :

$$F = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

$$K = K_1 + FH = \begin{bmatrix} 1,49871 & -3,53075 & -0,49967 & 0,3755 \\ -0,75 & 1,96725 & -0,74967 & 0,1255 \\ -0,99871 & 2,21925 & 2,99903 & -3,2495 \\ -1,25 & -1,15575 & -1,24967 & 4,2485 \end{bmatrix}$$

Teniendo todos estos valores se puede proceder a la simulación del esquema de diagnóstico de fallas basado en UIO.

Simulación del UIO de orden completo

Con los valores calculados en la subsección (4.1.2) se realizó una simulación del sistema por medio de la herramienta Simulink de Matlab, el modelo generado se presenta en el Apéndice B.1. Se presentaran los resultados de esta simulación para diferentes condiciones de operación del sistema, las cuales son: operación normal o libre de fallas, condición de falla en el sensor de nivel 1 y condición de falla en el sensor de nivel 2, así como condiciones de falla en ambos sensores.

En la Figura (4.2) se presenta el residuo generado en condiciones libres de falla y se observa que este tiende a cero después de un corto tiempo de estabilización, lo cual nos indica que no tenemos ningún residuo activado, es decir:

$$\|r^j(t)\| \approx 0 \quad (4.15)$$

La Figura (4.3) muestra el comportamiento del residuo en condiciones de falla para el sensor 1, donde se introduce una falla a los ocho segundos de simulación en forma de una entrada tipo impulso de un segundo de duración y magnitud 1. Se observa claramente que el residuo se activa y que ya no se cumple con (4.15) lo cual nos indica que ha ocurrido una falla en el sistema.

En la Figura (4.4) se visualiza el comportamiento del residuo en condiciones de falla para el sensor 2, y se aprecia que el comportamiento es similar que en condiciones de falla en el sensor 1 con la única diferencia de que esta vez la falla es introducida a los seis segundos de

simulación. De igual forma que con la falla en el sensor 1, el residuo se activa y al no cumplir con (4.15) se concluye que una falla ha ocurrido en el sistema.

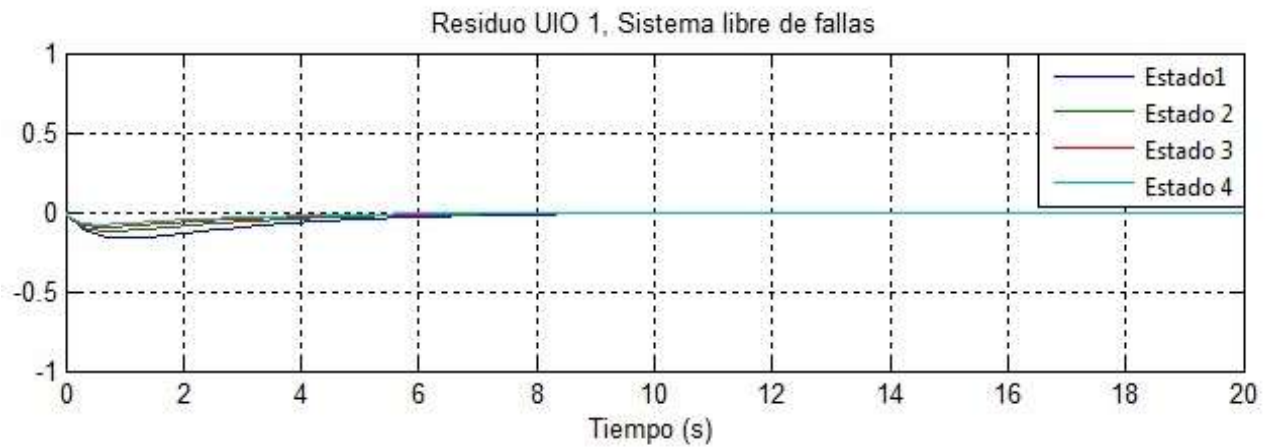


Figura 4.2: Residuo en condiciones libres de fallas

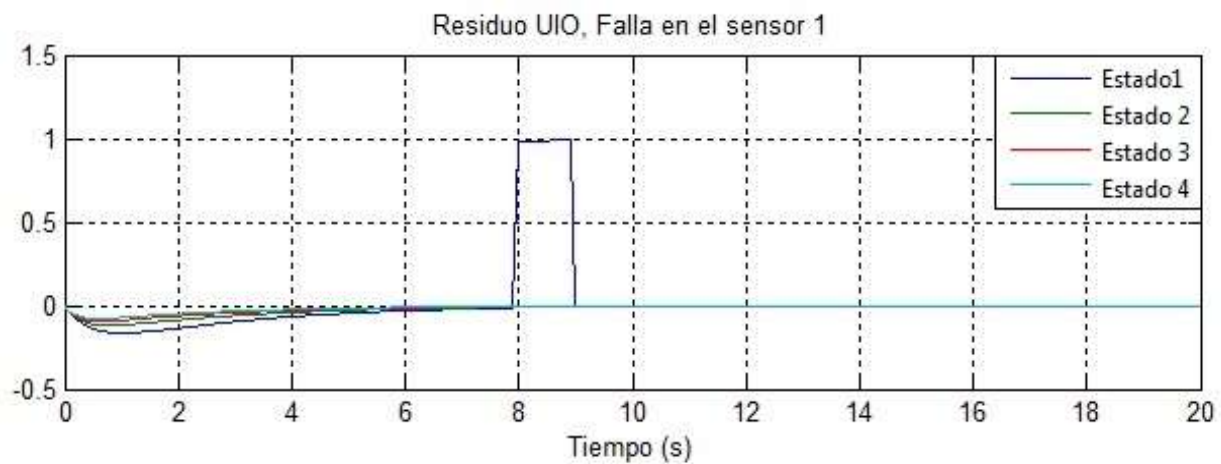


Figura 4.3: Residuo en condición de falla en el sensor 1

Por último en la Figura (4.5) se muestra el comportamiento del residuo ante fallas en ambos sensores, se observa que son detectadas de igual forma que en los casos anteriores, sin embargo no es posible distinguir en que sensor ocurrió la falla ya que el observador estima todos los estados del sistema lo que causa que el residuo detecte las fallas que se presenten

en los dos sensores, es decir, no existe un esquema de aislamiento de fallas, esto debido a que un observador de orden completo sólo cubre la detección de fallas y no el aislamiento de las mismas.



Figura 4.4: Residuo en condición de falla en el sensor 2



Figura 4.5: Residuo en condiciones de falla en ambos sensores

Diseño de un UIO con esquema de aislamiento de fallas robusto en sensores

Como se presentó en la sección (3.4.3) es posible generar esquemas de aislamiento de fallas robustos para generar un esquema capaz de entregarnos información sobre el sensor que está presentando la falla, esto para combatir el problema presentado en la sección (4.1.2) donde mediante un observador de orden completo no es posible diferenciar en qué lugar se genera la falla del sistema sino que simplemente sabemos que una falla ocurrió. Para esto es necesario recordar que este esquema al ser exclusivo para sensores se diseña asumiendo que los actuadores se encuentran en condiciones normales o libres de falla. El programa desarrollado para realizar este diseño se ilustra en el Apéndice A.1.

El primer paso para el diseño de un UIO con esquema de aislamiento robusto en sensores es la obtención de las matrices C^j ; para nuestro caso $j = 1, 2, 4$ debido a que uno de los estados no es observable. Como se vio en la sección (3.4.3), el cálculo de C^j se realiza eliminando la j -ésima fila de la matriz C , por lo tanto:

$$C^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ahora simplemente es necesario calcular los valores de las matrices H^j, T^j, F^j y K^j las cuales se obtienen como se especifica en la sección (3.4.3). Las matrices obtenidas para estos valores de C^j son las siguientes:

$$H^1 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix} \quad H^2 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix}$$

$$H^4 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
T^1 &= \begin{bmatrix} 1 & -0,3333 & -0,3333 & -0,3333 \\ 0 & 0,6666 & -0,3333 & -0,3333 \\ 0 & -0,3333 & 0,6666 & -0,3333 \\ 0 & -0,3333 & -0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^1 &= \begin{bmatrix} -0,0017 & -1,0102 & 0,000107 & 0,2918 \\ -0,0004 & -4,0102 & 0,000107 & 0,2918 \\ 0,0008 & -1,0102 & -3,9998 & 0,2918 \\ -0,0004 & -1,0102 & 0,0001 & -4,7081 \end{bmatrix} \\
T^2 &= \begin{bmatrix} 0,6666 & 0 & -0,3333 & -0,3333 \\ -0,3333 & 1 & -0,3333 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0 & 0,6666 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0 & -0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^2 &= \begin{bmatrix} -2 & -3,125 & 0,0001 & 0,2918 \\ 0 & -0,377 & 0,0001 & 0,2918 \\ 0 & 3,125 & -3,9998 & 0,2918 \\ 0 & 0 & 0,0001 & -4,7081 \end{bmatrix} \\
T^4 &= \begin{bmatrix} 0,6666 & -0,3333 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0,6666 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 1 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 0 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^4 &= \begin{bmatrix} -1,9995 & 1,0730 & 0 & -0,7498 \\ 0,0004 & -1,9269 & 0 & -0,7498 \\ 0,0004 & 1,0730 & -0,0013 & -0,7498 \\ 0,0004 & 1,0730 & 0 & -5,7498 \end{bmatrix} \\
K^1 &= \begin{bmatrix} -3,2707 & -0,2396 & 0,6354 \\ 1,4776 & -1,2392 & -0,3640 \\ 1,6467 & 2,4265 & -3,8219 \\ -1,8119 & -1,9059 & 3,5922 \end{bmatrix} & K^2 &= \begin{bmatrix} 0,3876 & -1,6106 & -0,7351 \\ -0,0283 & -0,0280 & 0,8471 \\ -0,1930 & 3,8046 & -2,4438 \\ -1,5693 & -1,5690 & 3,9291 \end{bmatrix} \\
K^4 &= \begin{bmatrix} 1,4399 & -3,5895 & 0,3167 \\ -0,8921 & 1,8251 & -0,0166 \\ 0,1087 & 3,3267 & -2,1420 \\ -1,5587 & -1,4645 & 3,9397 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

No se presentan los valores del observador correspondiente al estado 3 ya que su par (C^3, A_1) no es observable y por lo tanto no existe el observador.

Simulación del UIO con esquema de aislamiento

Al igual que en el caso del observador de orden completo presentado en la sección (4.1.2) la simulación se llevó a cabo en el entorno de Simulink de Matlab y se muestra el modelo creado en el Apéndice B.2. Se muestran los resultados para condiciones libres de falla, condiciones de falla en el sensor 1, condiciones de falla en el sensor 2 y condiciones de falla en ambos sensores.

En la Figura (4.6) se presentan los residuos generados en condiciones libres de falla y se observa que estos tienden a cero después de un corto tiempo de estabilización, lo cual nos indica que no tenemos ningún residuo activado, por lo tanto se cumple con (4.15) en ambos UIO.



Figura 4.6: Residuos generados en condiciones libres de fallas.

En la Figura (4.7) se muestran los residuos generados al introducir una falla de un segundo de duración en el sensor de nivel 1 por medio de una entrada tipo impulso de magnitud unitaria, que es introducida a los seis segundos de simulación. Se observa que se activa el residuo correspondiente al UIO 2 por lo cual no cumple con (4.15), mientras que el residuo del UIO 1 permanece sin ninguna alteración, lo cual indica que la falla generada se encuentra en el sensor 1.

En la Figura (4.8) se presentan los residuos para condiciones de falla en el sensor 2, de igual manera que en el caso anterior se utiliza una entrada tipo impulso con duración de 1 segundo y magnitud unitaria, sin embargo esta se introduce a los ocho segundos de

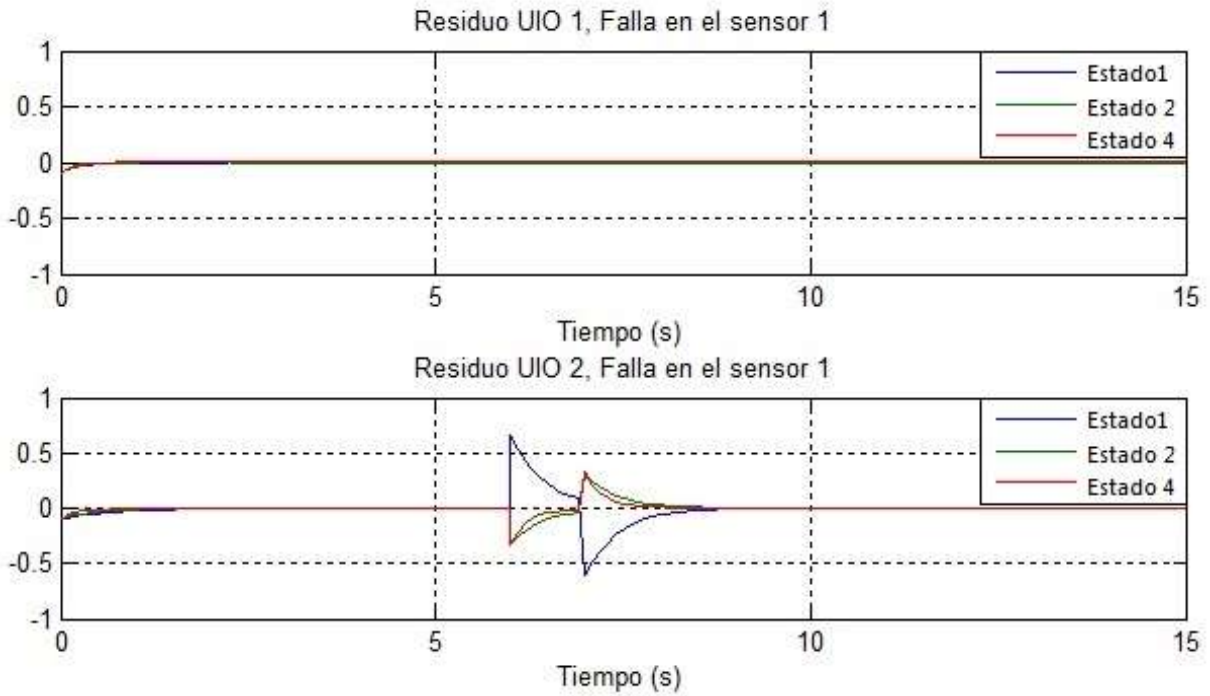


Figura 4.7: Residuos generados en condición de falla en el sensor 1

simulación. Se puede ver que al no cumplirse con (4.15) en el UIO 1 este activa su residuo mientras que el residuo del UIO 2 permanece inactivo, por lo tanto se concluye que la falla se presentó en el sensor 2.

La introducción de fallas en ambos sensores es el último caso que se presenta, las fallas introducidas son de las mismas características de los dos casos anteriores, en la Figura (4.9) se muestran los residuos generados y se puede observar que ambos están activados ya que no cumplen con (4.15), además se comprueba que el esquema de aislamiento está funcionando correctamente ya que los generadores de residuos solo detecta una de las fallas y no ambas.

Se puede observar que en este esquema la detección y aislamiento de la falla se realiza por medio de la ausencia de residuo, es decir, la falla se encuentra en el observador que tiene su residuo inactivo.

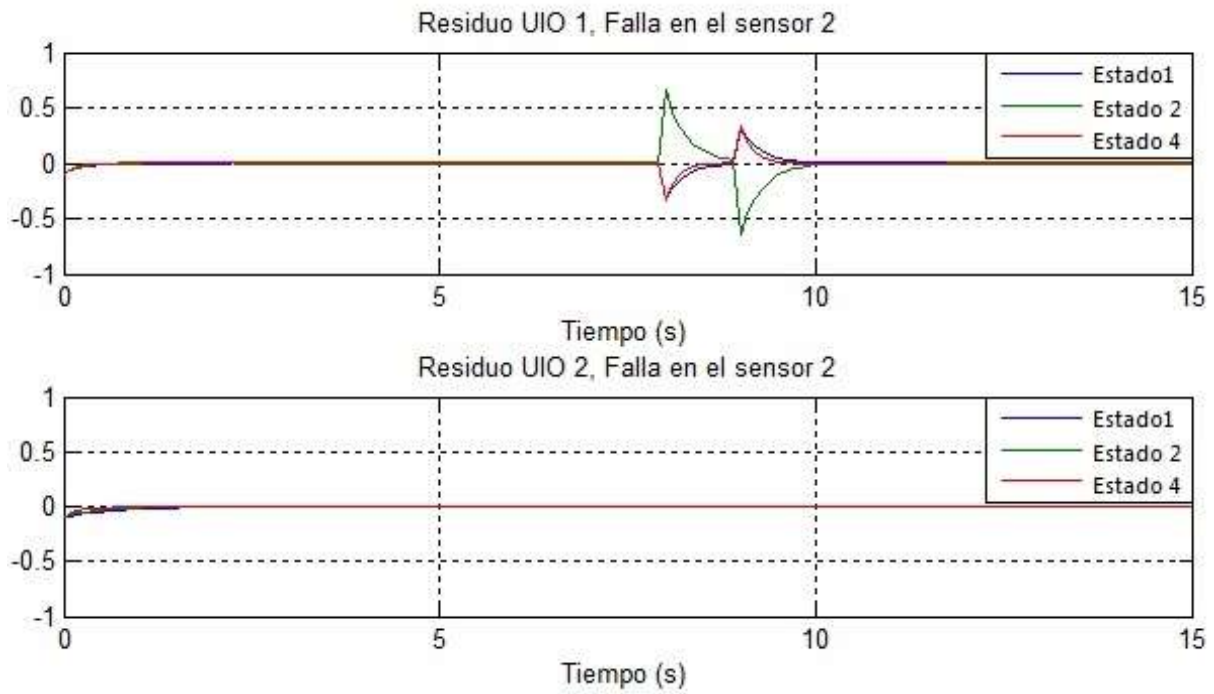


Figura 4.8: Residuos generados en condición de falla en el sensor 2

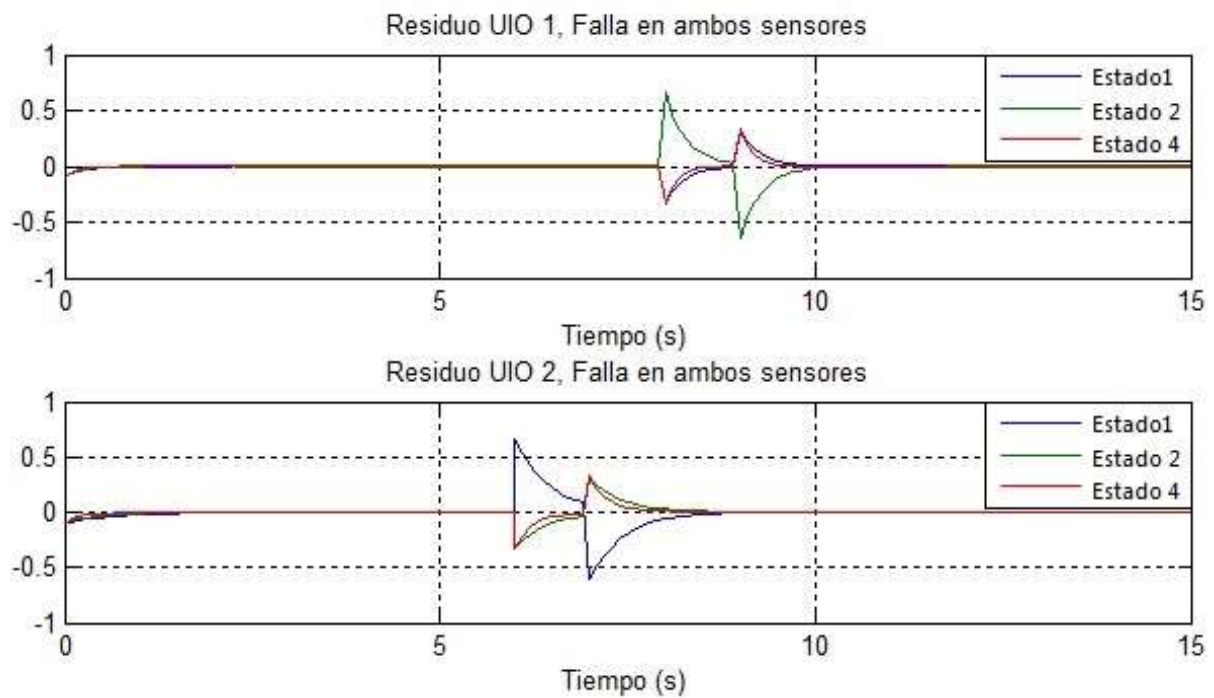


Figura 4.9: Residuos en condiciones de falla en ambos sensores.

4.1.3. Aplicación del esquema de observadores dedicados (DOS) al modelo del SHDT

Diseño de un esquema de observadores dedicados de orden completo

Como se vio en la sección (3.5), un esquema de observadores dedicados se basa en la creación de múltiples observadores de Luenberger para checar cada una de las salidas del sistema, por lo tanto la creación de un esquema de observadores dedicados de orden completo se reduce simplemente a generar un observador de Luenberger para estimar todos los estados del sistema.

El programa en MatLab desarrollado se incluye en el Apéndice A.2. Se utilizó el comando "place" de MatLab para realizar el cálculo de la matriz de ganancias L ubicando los polos en la misma posición que en el diseño del UIO de orden completo mostrado en (4.1.2) para poder hacer una comparación posterior de resultados.

El único cálculo necesario para generar un esquema de observadores dedicados de orden completo (observador de Luenberger), es el cálculo de la matriz L :

$$L = \begin{bmatrix} 5,5734 & -1,8119 & 0,9448 & -2,8124 \\ -0,0707 & 0,1255 & 7,6700 & -3,8349 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Simulación del esquema de observadores dedicados de orden completo

La simulación se llevó a cabo en el entorno de Simulink de Matlab y se muestra el modelo creado en el Apéndice B.3. Se muestran los resultados para condiciones libres de falla, condiciones de falla en el sensor 1, condiciones de falla en el sensor 2 y condiciones de falla en ambos sensores. Debido a que el presente trabajo tiene como objetivo el realizar una comparación entre ambos esquemas, las fallas se introducirán en el mismo tiempo que se mostró en los esquemas de UIO's y con idénticas características.

En la Figura (4.10) se presenta el residuo generado en condiciones libres de falla y se observa que este es igual a cero, lo cual nos indica que no tenemos ningún residuo activado, es decir, cumple con (4.15).

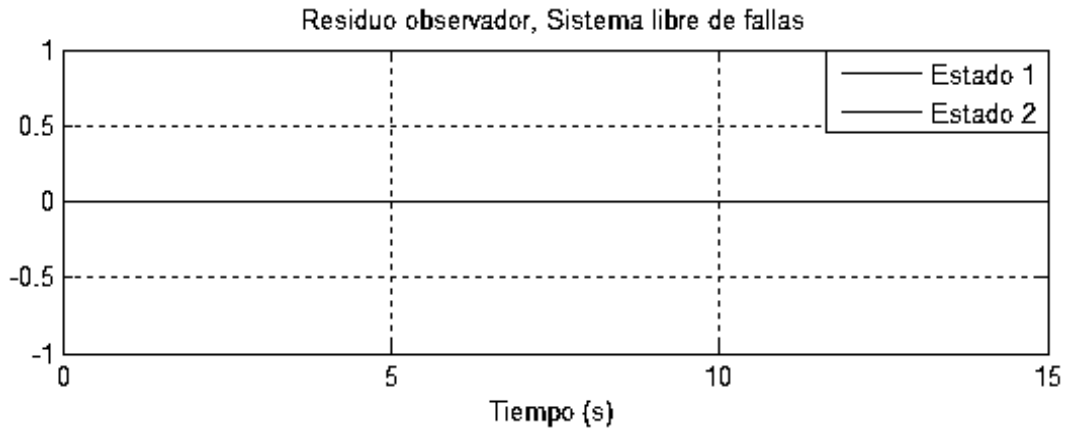


Figura 4.10: Residuo generado en condiciones libres de falla

La Figura (4.11) muestra el comportamiento del residuo en condiciones de falla para el sensor 1. Se observa que el residuo se activa y que ya no cumple con (4.15) lo cual nos indica que ha ocurrido una falla en el sistema.



Figura 4.11: Residuo generado en condición de falla en el sensor 1

En la Figura (4.12) se visualiza el comportamiento del residuo en condiciones de falla para el sensor 2, y se aprecia que el comportamiento es similar que en condiciones de falla en el sensor 1 con la única diferencia de que la falla es introducida en un tiempo diferente. De igual forma que con la falla en el sensor 1, el residuo se activa y al no cumplir con (4.15) se concluye que una falla ha ocurrido en el sistema.

El caso en que existen fallas en ambos sensores es presentado en la Figura (4.13), donde se

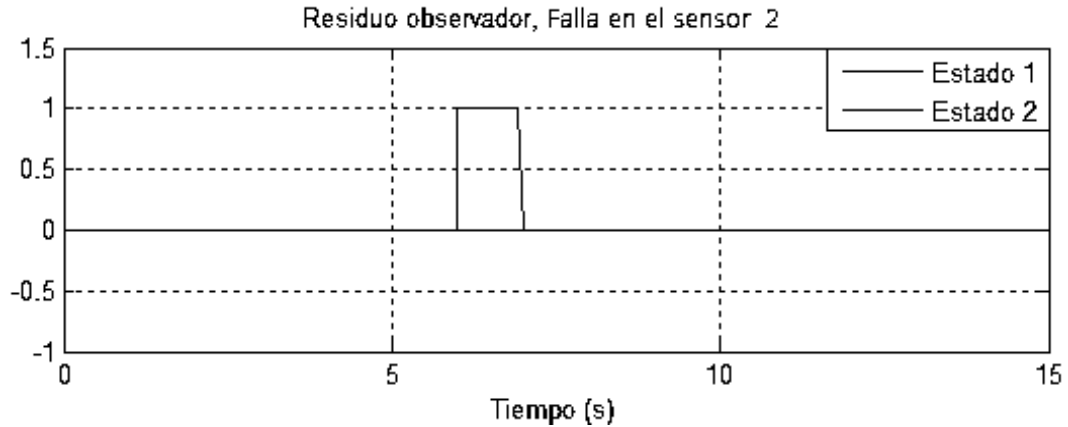


Figura 4.12: Residuo generado en condición de falla en el sensor 2

observa que las fallas son detectadas de igual forma que en los casos anteriores, sin embargo no es posible distinguir en que sensor ocurrió la falla ya que el observador estima todos los estados del sistema lo que causa que el residuo detecte las fallas que se presenten en los dos sensores, es decir, no existe un esquema de aislamiento de fallas, esto debido a que un observador de orden completo solo cubre la detección de fallas y no el aislamiento de las mismas.

Al igual que en el caso de los observadores con entradas desconocidas, un esquema de observadores dedicados de orden completo u observador de Luenberger no brinda información sobre donde ocurrió la falla.

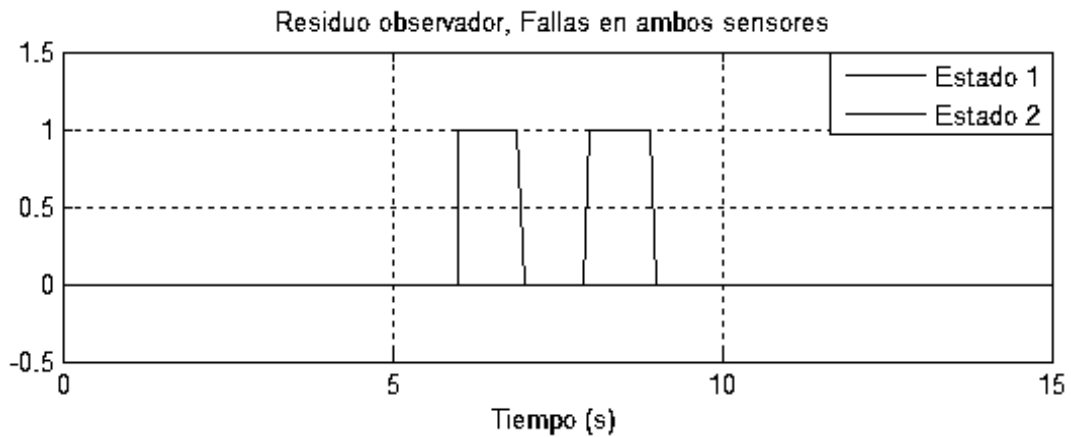


Figura 4.13: Residuo generado en condición de falla en ambos sensores

Diseño de un esquema de observadores dedicados

De acuerdo a lo presentado en la sección (3.5), para el diseño de un esquema de observadores dedicados es necesario la creación de un observador para cada salida del sistema. El programa utilizado para realizar este diseño se ilustra en el Apéndice A.2.

El primer paso para cumplir este objetivo es dividir la matriz C en submatrices para cada salida:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad C^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es calcular las matrices de ganancia L :

$$L^1 = \begin{bmatrix} 5,5734 & -1,8119 & 0,9448 & -2,8124 \\ -0,0707 & 0,1255 & 7,6700 & -3,8349 \end{bmatrix}$$

Ahora con estos valores se pueden diseñar los dos observadores necesarios para cada sensor del sistema hidráulico de dos tanques como se mostró en la sección 3.5 tomando la consideración de que el sistema está libre de fallas en actuadores.

Simulación del esquema de observadores dedicados

La simulación se llevó a cabo en el entorno de Simulink de Matlab y se muestra el modelo creado en el Apéndice B.4. Se muestran los resultados para condiciones libres de falla, condiciones de falla en el sensor 1, condiciones de falla en el sensor 2 y condiciones de falla en ambos sensores. Debido a que el presente trabajo tiene como objetivo el realizar una comparación entre ambos esquemas, las fallas se introducirán en el mismo tiempo que se ha venido utilizando en todos los esquemas anteriores y con idénticas características.

En la Figura (4.14) se presentan los residuos generados en condiciones libres de falla y se observa que uno de estos tiende a cero después de un corto tiempo de estabilización mientras que el otro siempre se encuentra en cero, lo cual nos indica que no tenemos ningún residuo

activado, por lo tanto se cumple con (4.15) en ambas salidas, es decir, no existen fallas en el sistema.

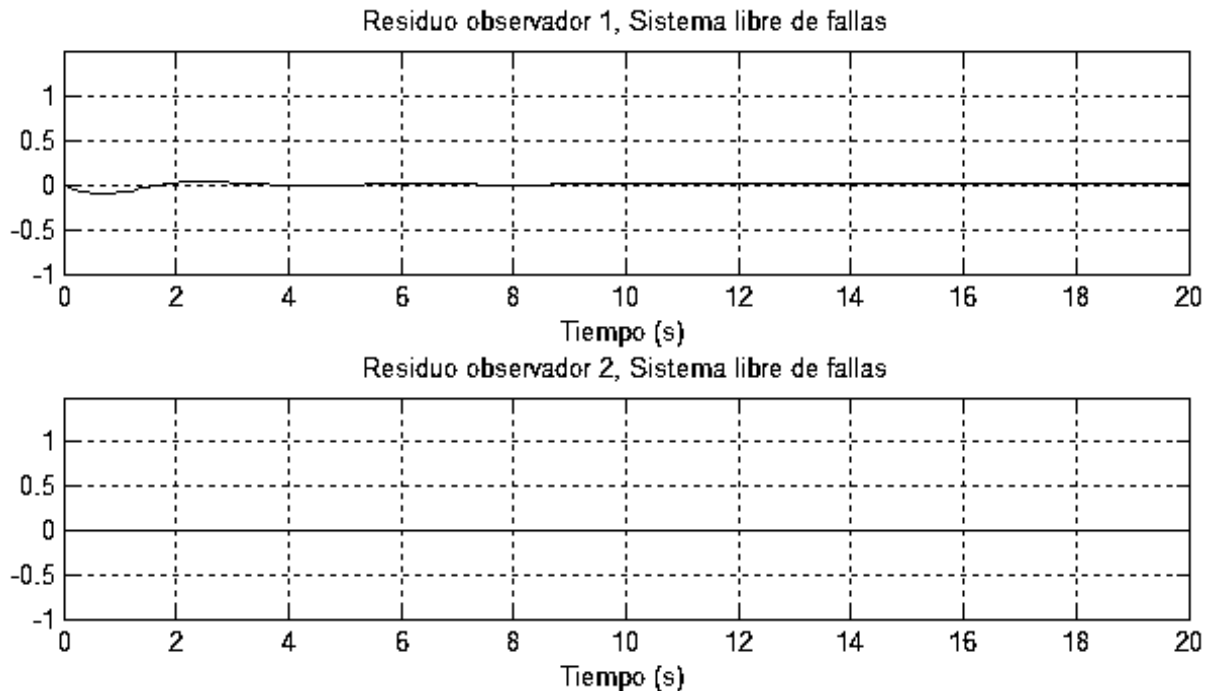


Figura 4.14: Residuos generados en condiciones libres de falla

En la Figura (4.15) se muestran los residuos generados al introducir una falla en el sensor de nivel 1 por medio de una entrada tipo impulso de un segundo de duración y magnitud unitaria que es introducida a los ocho segundos de simulación. Se observa que se activa el residuo correspondiente al observador 1 por lo cual no cumple con (4.15), mientras que el residuo del observador 2 permanece sin ninguna alteración, lo cual indica que la falla generada se encuentra en el sensor 1.

En la Figura (4.16) se presentan los residuos para condiciones de falla en el sensor 2, de igual manera que en el caso anterior se utiliza una entrada tipo impulso con duración de 1 segundo, sin embargo esta se introduce a los seis segundos de simulación. Se puede ver que al no cumplirse con (4.15) en el observador 2 este activa su residuo mientras que el residuo del observador 1 permanece inactivo, por lo tanto se concluye que la falla se presentó en el sensor 2.

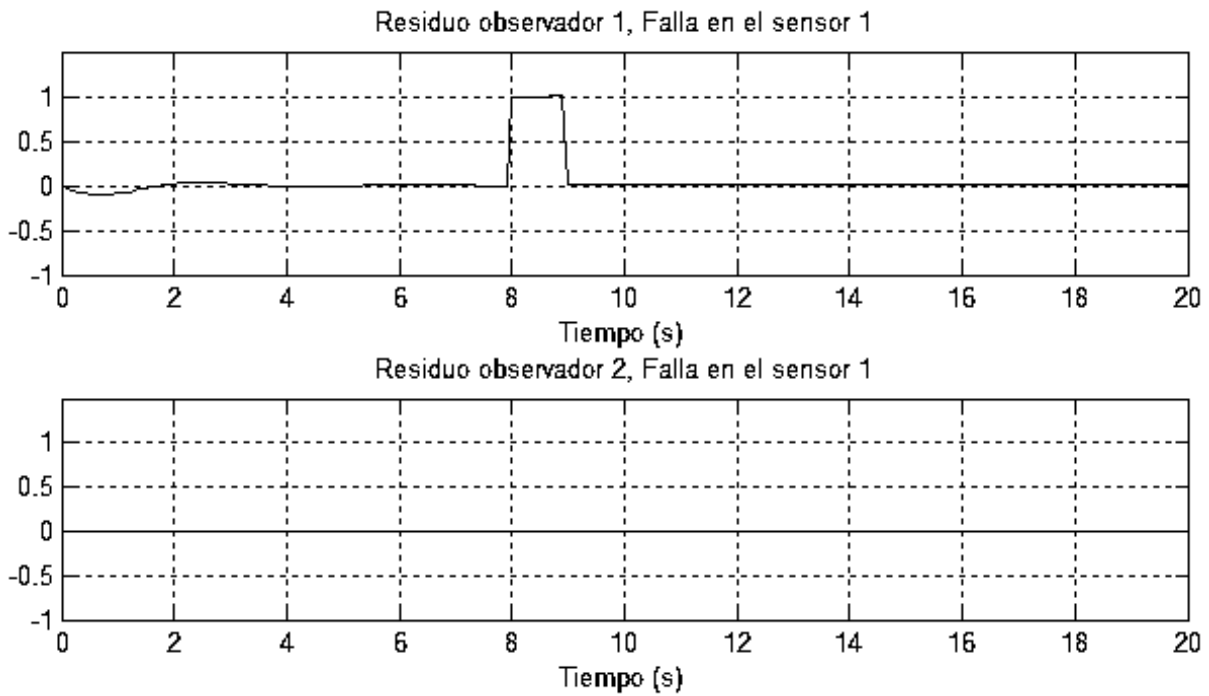


Figura 4.15: Residuos generados en condición de falla en el sensor 1

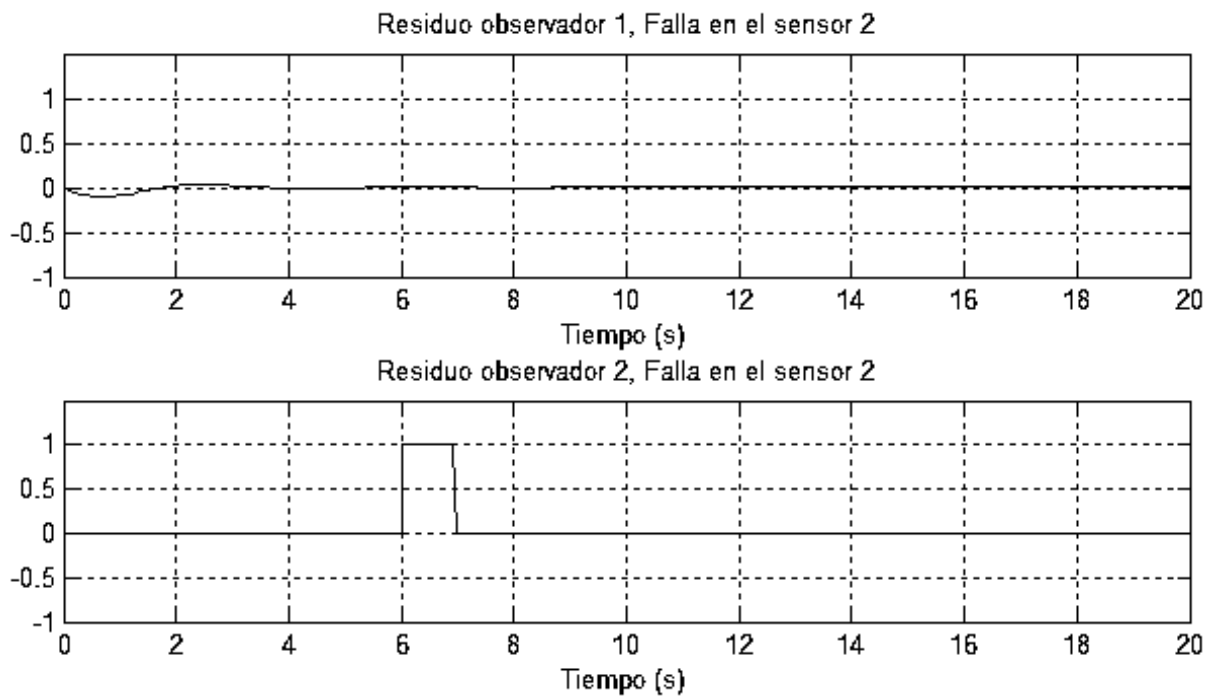


Figura 4.16: Residuos generados en condiciones de falla en el sensor 2

El último caso es en condición de falla en ambos sensores, las fallas introducidas son de las mismas características que en los dos casos anteriores, en la Figura (4.17) se muestran los residuos generados y se puede observar que ambos están activados ya que no cumplen con (4.15), con esto se puede concluir que el esquema de aislamiento funciona de manera adecuada ya que las fallas de un sensor afectan únicamente a un generador de residuos y no a ambos.

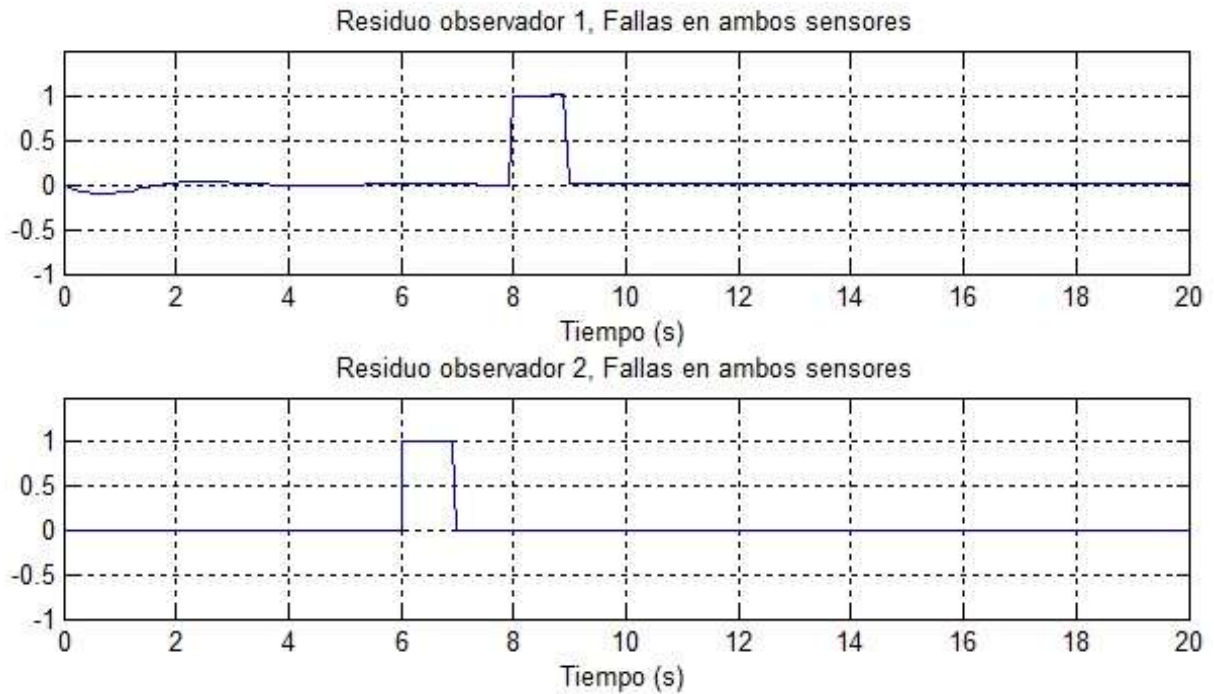


Figura 4.17: Residuos generados en condición de falla en ambos sensores

Se puede observar que en este esquema de detección y aislamiento de fallas, la falla se presenta en el observador correspondiente al residuo activado, caso contrario con los UIO los cuales detectan la falla al no activarse uno de los residuos del sistema.

4.2. Sistema de suspensión de un autobús

Para poder obtener más información acerca del funcionamiento de cada esquema de detección de fallas propuesto, se incluye un ejemplo de aplicación adicional, un sistema de

suspensión de un autobús. Para facilitar el problema se simplificara utilizando únicamente una de las ruedas, es decir, un cuarto del sistema de suspensión total. La Figura (4.18), presenta un diagrama del modelo propuesto.

Modelo de suspensión de 1/4 de autobús

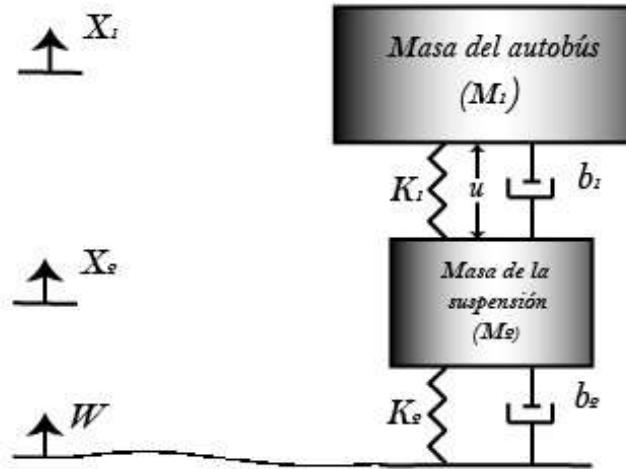


Figura 4.18: Modelo del sistema de suspensión de $\frac{1}{4}$ de autobús

4.2.1. Modelado del sistema

El comportamiento del sistema de suspensión de $\frac{1}{4}$ de autobús presentado en la Figura (4.18) esta descrito por las ecuaciones dinámicas siguientes [29]:

$$\begin{aligned} M_1 \ddot{x}_1 &= -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \\ M_2 \ddot{x}_2 &= b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(\dot{W} - \dot{x}_2) + k_2(W - x_2) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Donde M_1 y M_2 son la masa de $\frac{1}{4}$ de autobús y la masa de la suspensión respectivamente, k_1 es la constante del resorte del sistema de suspensión y k_2 es la constante de la rueda y el neumático, b_1 es la constante de deflexión del sistema de suspensión, b_2 es la constante de deflexión de la rueda y el neumático, x_1 y x_2 representan las distancias recorridas por la

masa del autobús y la masa de la suspensión respectivamente y W es una referencia para cualquier disturbio que se presente en el camino.

Los valores de las constantes presentes en las ecuaciones dinámicas descritas en (4.17) para un autobús estándar se obtuvieron de [24], y son los siguientes:

- ▶ Masa de $\frac{1}{4}$ de autobus (M_1) = 2500kg
- ▶ Masa de la suspensión (M_2) = 320kg
- ▶ Constante de deflexion del sistema de suspensión (b_1) = $350 \frac{Ns}{m}$
- ▶ Constante de deflexion de la rueda y el neumático (b_2) = $15,020 \frac{Ns}{m}$
- ▶ Constante del resorte del sistema de suspensión (k_1) = $80,000 \frac{N}{m}$
- ▶ Constante del resorte de la rueda y el neumático (k_2) = $500,000 \frac{N}{m}$

El sistema descrito en su forma de espacio de estados queda de la siguiente forma [29] :

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \ddot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{b_1 b_2}{M_1 M_2} & 0 & \left(\frac{b_1}{M_1} \left(\frac{b_1}{M_1} + \frac{b_1}{M_2} + \frac{b_2}{M_2} \right) - \left(\frac{k_1}{M_1} \right) \right) & -\frac{b_1}{M_1} \\ \frac{b_2}{M_2} & 0 & -\left(\frac{b_1}{M_1} + \frac{b_1}{M_2} + \frac{b_2}{M_2} \right) & 1 \\ \frac{k_2}{M_2} & 0 & -\left(\frac{k_1}{M_1} + \frac{k_1}{M_2} + \frac{k_2}{M_2} \right) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{M_1} & \frac{b_1 b_2}{M_1 M_2} \\ 0 & -\frac{b_2}{M_2} \\ \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} & -\frac{k_2}{M_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ W \end{bmatrix} \\
 y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \dot{x}_1 \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.18}$$

Donde las variables introducidas $y_1 = x_1 - x_2$ y $y_2 = \dot{x}_1 - \dot{x}_2$ corresponden a la distancia de desplazamiento de la posición original del sistema y velocidad de este desplazamiento respectivamente.

Se incluye la matriz E :

$$E = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Los valores de esta matriz nos indican que las fallas pueden ocurrir en todos los estados, sin embargo solo se introducirán fallas en el estado 1 y 3 los cuales asumimos tendrán los sensores del sistema.

4.2.2. Aplicación del esquema de UIO's al modelo de suspensión de un autobús

Diseño de un UIO de orden completo

Para el cálculo de un observador con entradas desconocidas de orden completo aplicado al modelo del sistema de suspensión de un autobús, es necesario seguir el procedimiento indicado en el Capítulo 3 en la sección 3.4.1 del presente trabajo, donde se detalla paso a paso los requerimientos necesarios para el diseño de un observador capaz de desacoplar las perturbaciones en el sistema. El cálculo de las matrices se realizó por medio del software MatLab, el programa utilizado es el mismo que se usó en el modelo del SHDT, el cual se puede encontrar en el Apéndice A.1.

Debido a que el procedimiento es exactamente igual al mostrado en la sección 4.1.2, simplemente se presentan los valores calculados para cada matriz, tomando en cuenta varias pruebas con diferentes valores los polos se ubicaron en $(-10, -15, -20, -25)$ ya que en esos puntos el sistema presentó un comportamiento adecuado:

$$H = \begin{bmatrix} 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \\ 0,25 & 0,25 & 0,25 & 0,25 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 0,75 & -0,25 & -0,25 & -0,25 \\ -0,25 & 0,75 & -0,25 & -0,25 \\ -0,25 & -0,25 & 0,75 & -0,25 \\ -0,25 & -0,25 & -0,25 & 0,75 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} -400,71 & 0,75 & 479,48 & -0,215 \\ -407,28 & -0,25 & 454,22 & -0,355 \\ -353,77 & -0,25 & 431,31 & 0,785 \\ 1161,78 & -0,25 & -1365,01 & -0,215 \end{bmatrix} \\
 K_1 &= \begin{bmatrix} -390,71 & 0,75 & 479,48 & -0,215 \\ -407,28 & 14,75 & 454,22 & -0,355 \\ -353,77 & -0,25 & 451,31 & 0,785 \\ 1161,78 & -0,25 & -1365,01 & 24,785 \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} -10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -20 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -25 \end{bmatrix} \\
 K = K_1 + FH &= \begin{bmatrix} -393,21 & -1,75 & 476,98 & -2,715 \\ -411,03 & 11 & 450,47 & -4,105 \\ -358,77 & -5,25 & 446,31 & -4,215 \\ 1155,53 & -6,5 & -1371,26 & 18,535 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Teniendo todos estos valores se puede proceder a la simulación del esquema de diagnóstico de fallas basado en UIO.

Simulación del UIO de orden completo

Con los valores calculados en la subsección anterior se realizó la simulación del sistema, el modelo generado se presenta en el Apéndice B.1. Se presentaran los resultados de esta simulación para diferentes condiciones de operación del sistema, las cuales son: operación normal o libre de fallas, condición de falla en el estado 1 y condición de falla en el estado 3 que corresponden al sensor 1 y sensor 2 los cuales son x_1 y y_1 respectivamente. Para obtener estas mediciones se propone utilizar algún sensor de distancia que sea compatible con esta aplicación.

La Figura (4.19) muestran los residuos en condiciones libres de falla, se observa que permanecen en cero después de un tiempo de estabilización, y por la dinámica propia del sistema se aprecian mínimas oscilaciones que se pueden despreciar, por lo cual decimos que los residuos no están activados. Por lo tanto, $\|r^j(t)\| \approx 0$.

La Figura (4.20) muestra el comportamiento de los residuos en condiciones de falla para el estado 1, donde se introduce una falla a los seis segundos de simulación en forma

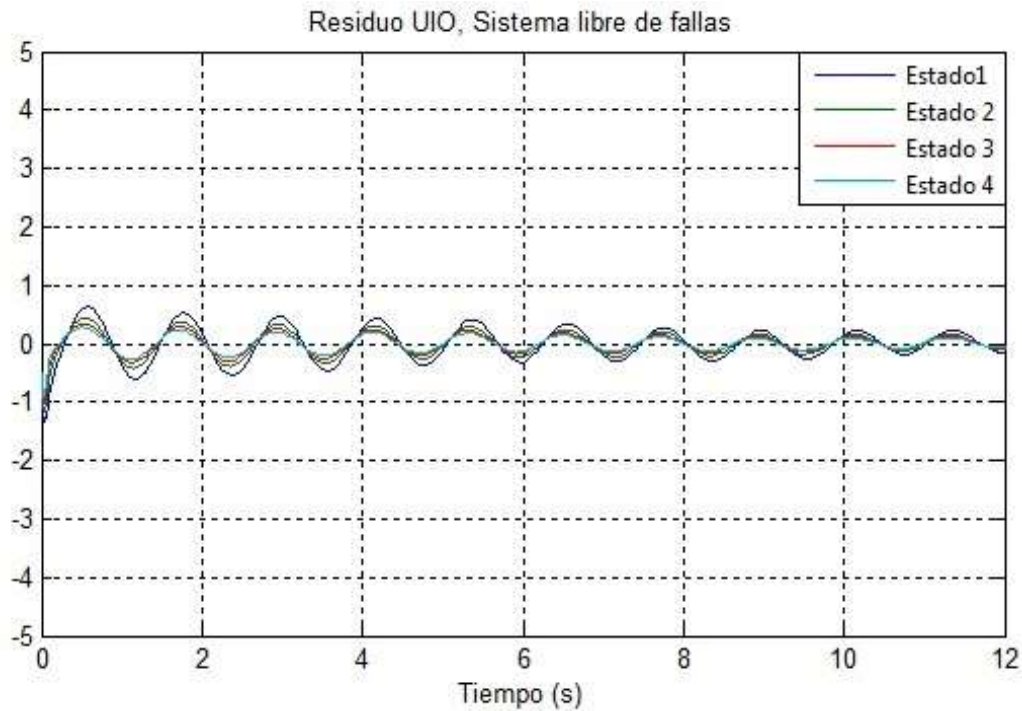


Figura 4.19: Residuos generados en condiciones libres de falla

de una entrada tipo impulso de magnitud unitaria. Se observa claramente que todos los residuos se activan y que ya no se cumple con $\| r^j(t) \| \approx 0$ lo cual nos indica que ha ocurrido una falla en el sistema.

En la Figura (4.21) se visualiza el comportamiento del residuo en condiciones de falla para el estado 3, y se aprecia que el comportamiento es similar que en condiciones de falla en el estado 1 con la única diferencia de que esta vez la falla es introducida a los diez segundos de simulación. Todos los residuos se activan, por lo cual no se cumple con $\| r^j(t) \| \approx 0$ y se concluye que hubo una falla.

Es fácil observar que el UIO de orden completo abarca la detección de la falla presentada más no su aislamiento, ya que al ocurrir una falla todos los residuos se activan haciendo imposible la tarea de aislar la misma.

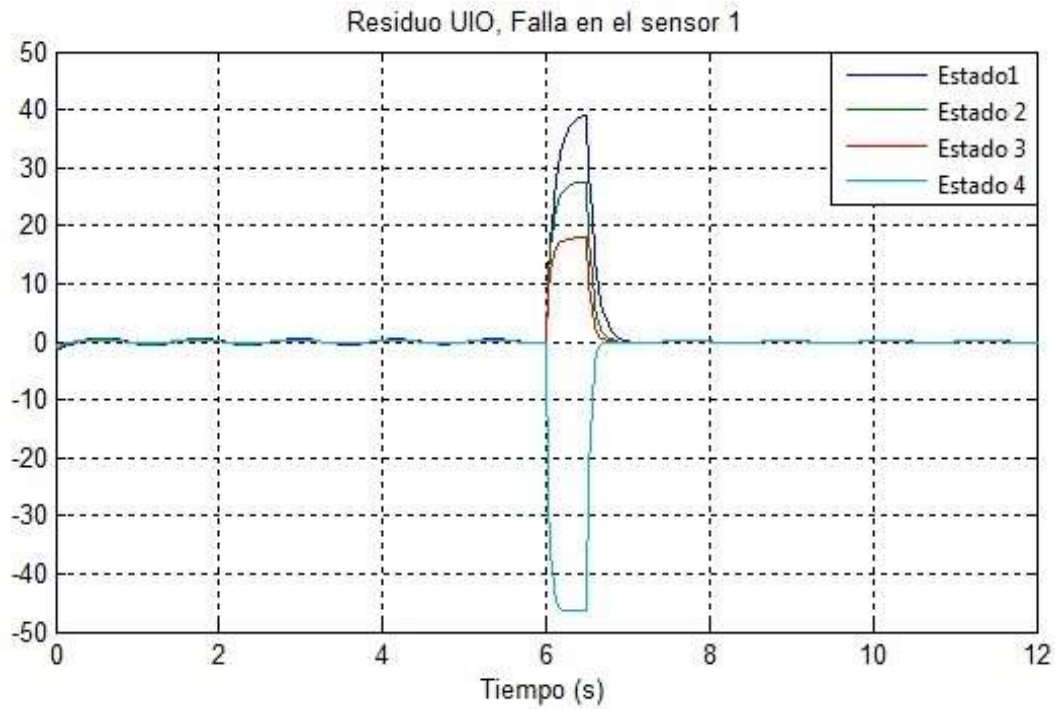


Figura 4.20: Residuos generados en condición de falla en el estado 1

4.2.3. Diseño de un UIO con esquema de aislamiento de fallas robusto en sensores

Como se mostró en el caso del SHDT, es posible generar esquemas de aislamiento de fallas robustos para generar un esquema capaz de entregarnos información sobre el sensor que está presentando la falla. El procedimiento para llevarlo a cabo es el mismo que en la sección (4.1.2), simplemente se hace el cambio de la planta del SHDT al sistema de suspensión de autobús. El programa desarrollado en MatLab es el mismo código empleado en el caso de aplicación del SHDT mostrado en el Apéndice A.1.

Los polos se ubicaron al igual que en el ejemplo anterior en $(-10, -15, -20, -25)$, las matrices calculadas para este modelo son:

$$C^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

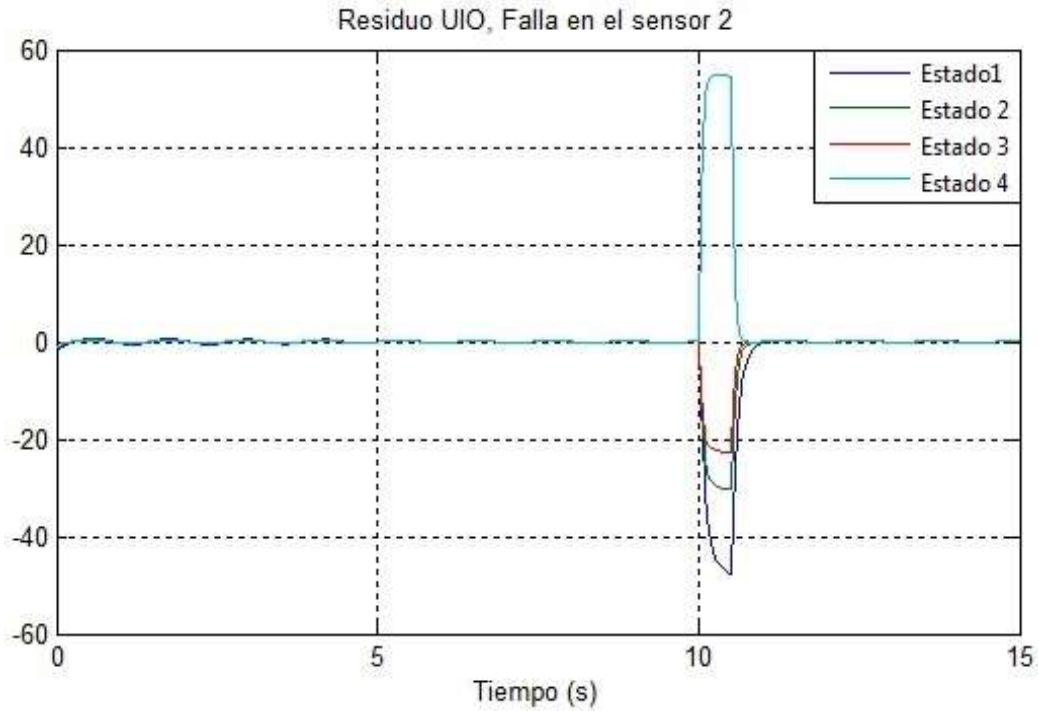


Figura 4.21: Residuos generados en condición de falla en el estado 3

$$C^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$H^1 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix} \quad H^2 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix}$$

$$H^3 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix} \quad H^3 = \begin{bmatrix} 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \\ 0,3333 & 0,3333 & 0,3333 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
T^1 &= \begin{bmatrix} 1 & -0,3333 & -0,3333 & -0,3333 \\ 0 & 0,6666 & -0,3333 & -0,3333 \\ 0 & -0,3333 & 0,6666 & -0,3333 \\ 0 & -0,3333 & -0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^1 &= \begin{bmatrix} -534,3 & 108,5 & 77,5 & -163,4 \\ -540,9 & 94,1 & 81,5 & -171,9 \\ -487,4 & 102,8 & 61,6 & -151 \\ 1028,2 & -217 & -151 & 308,6 \end{bmatrix} \\
T^2 &= \begin{bmatrix} 0,6666 & 0 & -0,3333 & -0,3333 \\ -0,3333 & 1 & -0,3333 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0 & 0,6666 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0 & -0,3333 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^2 &= \begin{bmatrix} -33,0409 & 0,6667 & 6,6162 & 6,6162 \\ -359,9909 & -0,3333 & 182,6763 & 182,6763 \\ 6,5299 & -0,3333 & -18,3129 & -8,3129 \\ 6,5299 & -0,3333 & -8,3129 & -18,3129 \end{bmatrix} \\
T^3 &= \begin{bmatrix} 0,6666 & -0,3333 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0,6666 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 1 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 0 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^3 &= \begin{bmatrix} -31,2 & -141,7 & 623,3 & 226,1 \\ -13,1 & -156,6 & 598 & 215,4 \\ -14 & -136,2 & 575,1 & 213,7 \\ 30,8 & 280,1 & -1221,2 & -457,3 \end{bmatrix} \\
T^4 &= \begin{bmatrix} 0,6666 & -0,3333 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & 0,6666 & 0 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 1 & -0,3333 \\ -0,3333 & -0,3333 & 0 & 0,6666 \end{bmatrix} & F^4 &= \begin{bmatrix} -17,6741 & -2,7074 & 5,4865 & -0,2867 \\ -2,7351 & -24,2474 & 5,5463 & -0,4267 \\ 6,2617 & 6,5741 & -27,7918 & 0,7133 \\ 102,4161 & 148,8994 & -205,6751 & -0,2867 \end{bmatrix} \\
K^1 &= \begin{bmatrix} -278,0603 & 391,2410 & -7,4471 \\ -273,1819 & 353,5446 & -7,5963 \\ -260,8223 & 371,5877 & -6,2656 \\ 539,9155 & -731,2532 & 14,0714 \end{bmatrix} & K^2 &= \begin{bmatrix} -509,8 & 617,9 & -13,3 \\ -181,4 & 424,6 & -181,5 \\ -502,9 & 594,2 & 2,2 \\ 1012,7 & -1212,1 & 11,2 \end{bmatrix} \\
K^3 &= \begin{bmatrix} -261,9911 & 367,8684 & -0,5549 \\ -297,5605 & 370,8519 & -0,9363 \\ -244,8422 & 348,7216 & 0,2093 \\ 557,1806 & -736,3204 & 1,4622 \end{bmatrix} & K^4 &= \begin{bmatrix} -0,8 & -1,7 & 13,9 \\ -24,6 & 16,6 & -13,6 \\ 22,5 & -11,7 & -0,7 \\ 1461,7 & -134,1 & -1599,2 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

En este caso, si se presentan los valores de $j = 3$ ya que todos los estados del sistema son observables.

4.2.4. Simulación del UIO con esquema de aislamiento

La simulación se llevó a cabo en Simulink, el modelo desarrollado se ilustra en el Apéndice B.6. De igual forma que en el caso anterior se presentan los resultados en condiciones libres de falla, condición de falla en el estado 1 y condición de falla en el estado 3.

La Figura (4.22) muestra el comportamiento de los residuos en condiciones libres de fallas. Se observa que todos los residuos permanecen en cero después de un tiempo de estabilización por lo cual decimos que los residuos no están activados. Por lo tanto, $\| r^j(t) \| \approx 0$

En la Figura (4.23) se presentan los residuos generados en condición de falla en el estado 1, donde se introduce una falla a los seis segundos de simulación en forma de una entrada tipo impulso. Se puede apreciar que se activan los residuos correspondientes a los UIO 2, 3 y 4 mientras que el correspondiente al UIO 1 permanece en cero, por lo tanto se concluye que existe una falla en el estado 1.

El último caso, para condición de falla en el estado 2 se ilustra en la Figura (4.24), la falla se introduce a los 10 segundos por medio de una entrada impulso, se observa la activación de los residuos correspondientes a los UIO 1, 2 y 4, mientras que el residuo del UIO 3 permanece inactivo, esto indica que se ha presentado una falla en el estado 3.

Con estos resultados se aprecia que ya existe un esquema de aislamiento funcionando correctamente en el sistema, ya que ahora es posible obtener información sobre la parte del sistema en la que se presentó la falla.

4.2.5. Aplicación del esquema de observadores dedicados (DOS) al modelo de suspensión de un autobús

Diseño de un esquema de observadores dedicados de orden completo

Para el diseño de este esquema se siguió el mismo procedimiento mostrado en la sección (4.1.3), la diferencia radica en el cambio de los valores de la planta, debido a que ahora aplicaremos este esquema a la suspensión de un autobús. El modelo utilizado para realizar los cálculos necesarios para el diseño se muestra en el Apéndice A.2, es el mismo que para

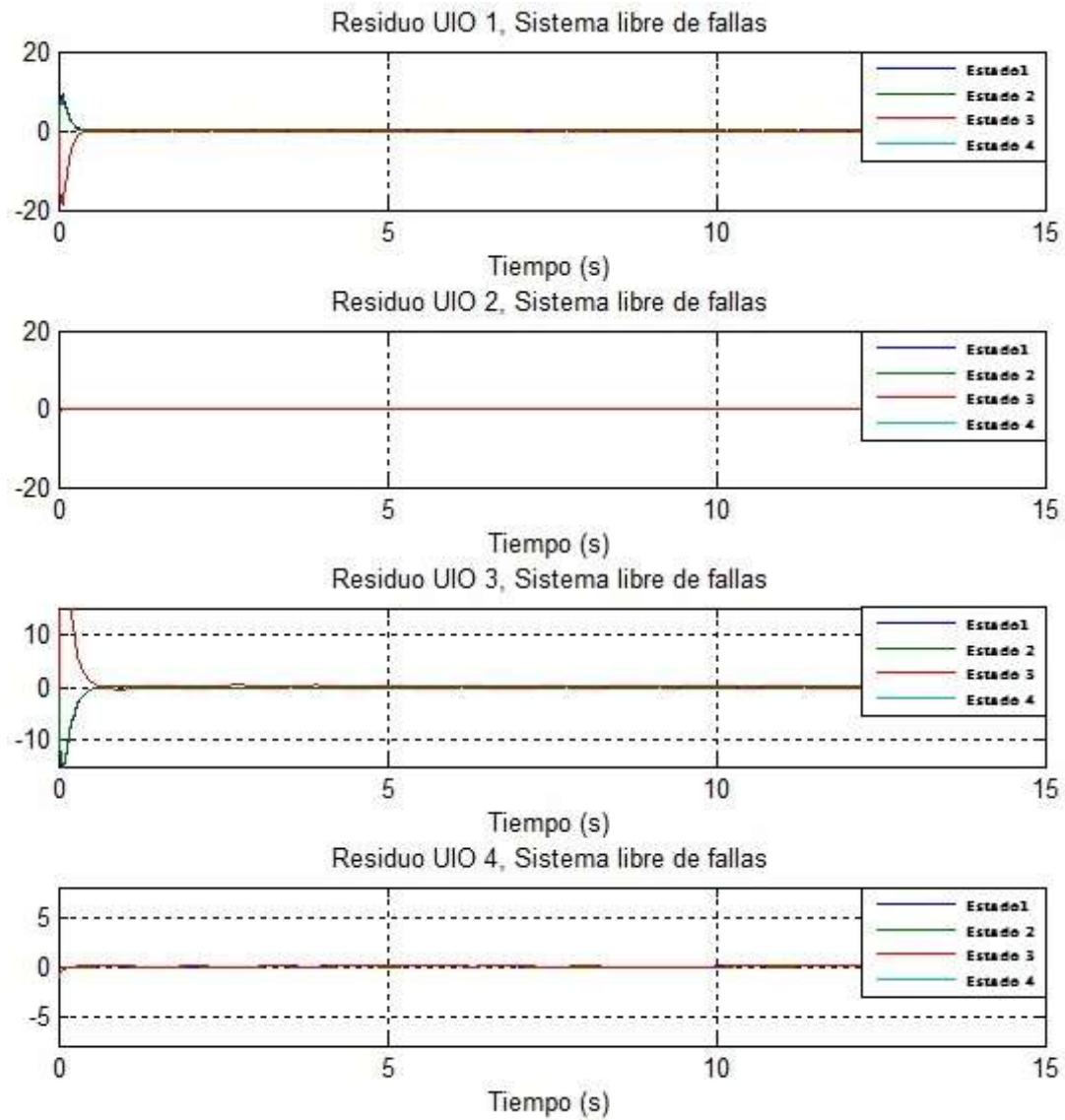


Figura 4.22: Residuos generados en condiciones libres de fallas

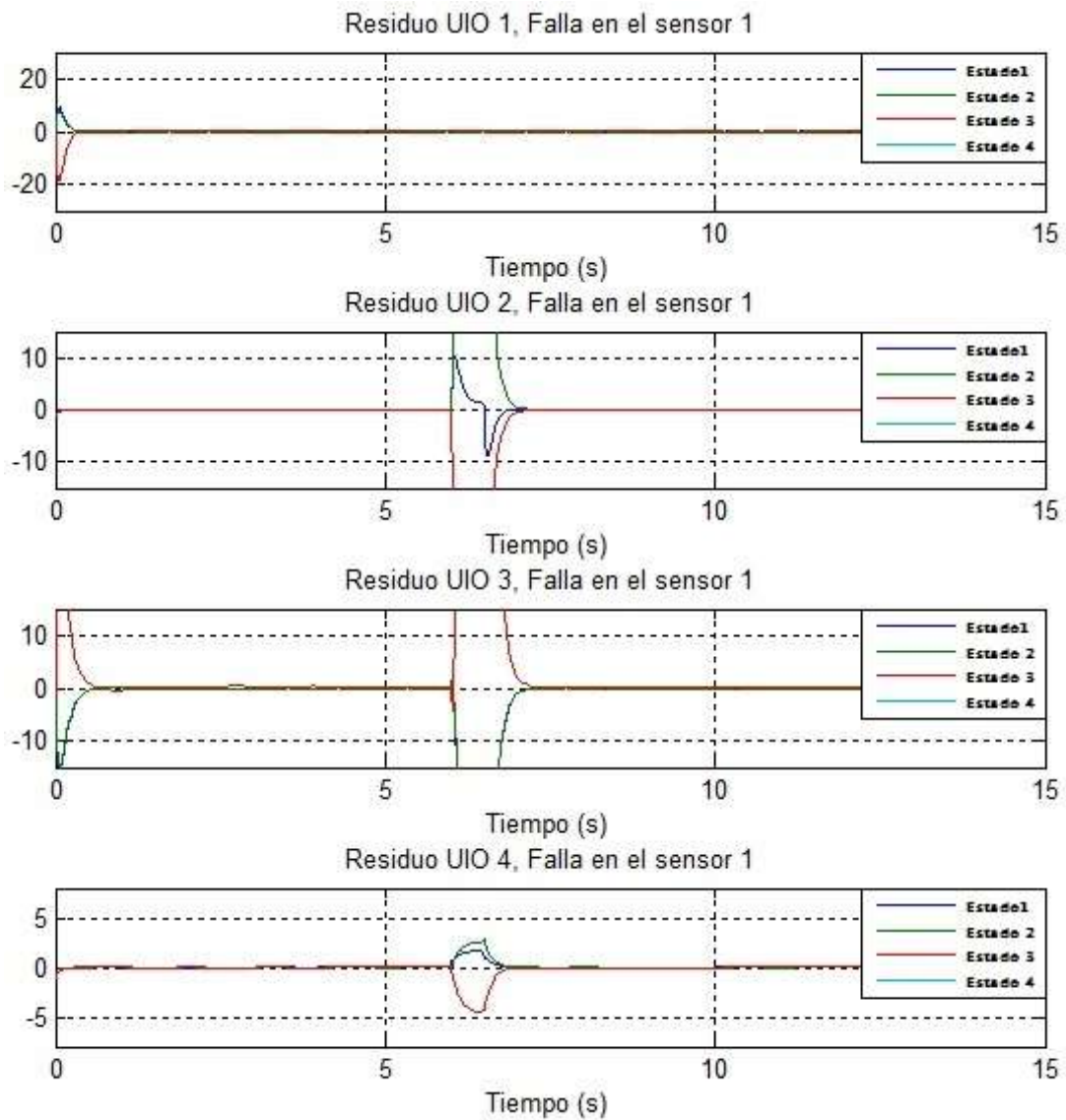


Figura 4.23: Residuos generados en condición de falla en el estado 1

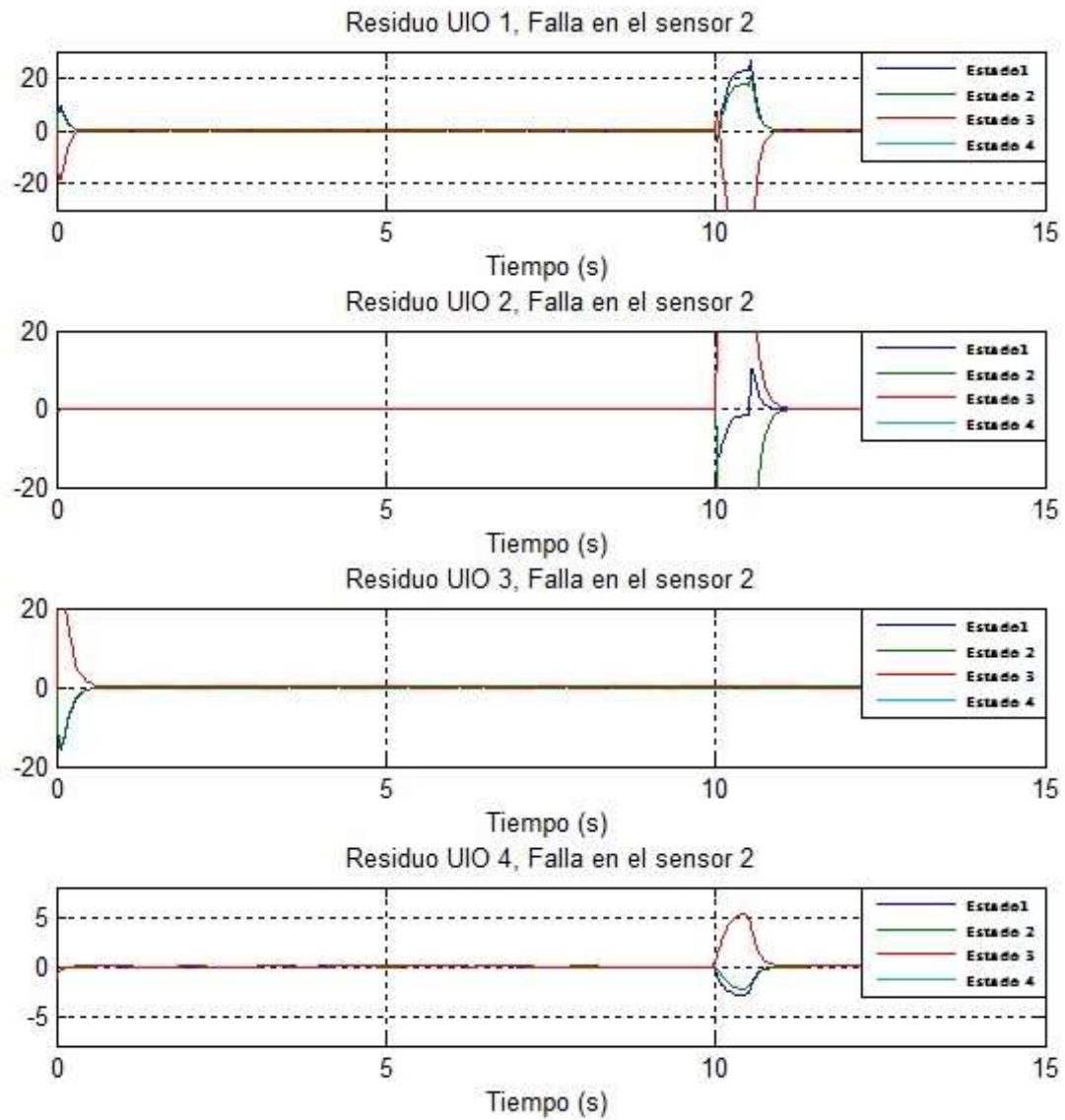


Figura 4.24: Residuos generados en condición de falla en el estado 3

el modelo del SHDT ya que solo es necesario cambiar los valores de la planta, así como la ubicación de los polos utilizados para el cálculo de ganancias.

Los polos se ubican en $(-10, -15, -20, -25)$ y la matriz de ganancias resultante es:

$$L = \begin{bmatrix} 10 & -6,6 & 46,9 & 1562,5 \\ 1 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & -25,3 & -28,2 & -1844,5 \\ 0 & -0,1 & 1 & 25 \end{bmatrix}$$

Con esta matriz de ganancias es posible proceder con la simulación del modelo.

Simulación del esquema de observadores dedicados de orden completo

La simulación realizada presenta resultados para condiciones libres de falla, condición de falla en el estado 1 y condición de falla en el estado 3. El programa Simulink utilizado es el mismo mostrado en el ejemplo del SHDT y se puede consultar en el Apéndice B.3.

La Figura (4.25) muestra los residuos generados en condiciones libres de falla, se observa que no existe ninguna perturbación y que ninguno de los residuos se encuentra activado, es decir, $r^j(t) \approx 0$.

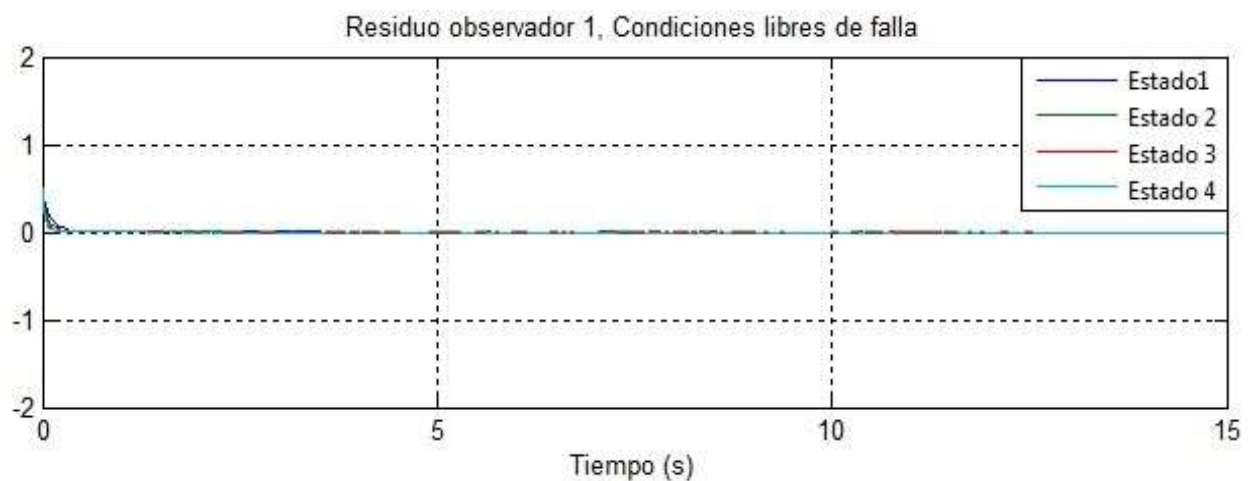


Figura 4.25: Residuos generados en condiciones libres de falla

La Figura (4.26) muestra los residuos generados en condición de falla en el estado 1, esta

falla se introduce a los seis segundos de simulación por medio de una entrada tipo escalón. Es fácil notar que el residuo de uno de los observadores se encuentra activado, es decir, no cumple con $r^j(t) \approx 0$, mientras que los demás residuos permanecen inactivos, por lo tanto, sabemos que ha ocurrido una falla.



Figura 4.26: Residuos generados en condición de falla en el estado 1

En la Figura (4.27) se presentan los residuos generados en condición de falla en el estado 3, la falla es introducida a los 10 segundos de simulación por medio de una entrada tipo escalón. Se observa que un residuo se activa mientras que los restantes permanecen inactivos, con lo que se concluye que se produjo una falla en el sistema.

Como ya se ha mencionado anteriormente no es posible distinguir en que parte del sistema ocurrió la falla, sino simplemente saber que la falla ocurrió.

Diseño de un esquema de observadores dedicados

De acuerdo a lo presentado en la sección (3.5), para el diseño de un esquema de observadores dedicados es necesario la creación de un observador para cada salida por lo cual se vuelve necesario comprobar la observabilidad de los estados del sistema para saber si es posible la construcción de un observador para cada una de ellas. El programa utilizado para realizar este diseño se ilustra en el Apéndice A.2.

El primer paso para en el diseño es dividir la matriz C en submatrices para cada salida:



Figura 4.27: Residuos generados en condición de falla en el estado 3

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad C^2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$C^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad C^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es el cálculo de las matrices de ganancias L :

$$L^1 = \begin{bmatrix} 22 & -1128 & -848 & -7261 \end{bmatrix}$$

$$L^2 = \begin{bmatrix} -0,5 & 21,80 & 38,90 & 1051,60 \end{bmatrix}$$

$$L^3 = \begin{bmatrix} 10,7381 & 12,944 & 21,828 & -580,08 \end{bmatrix}$$

$$L^4 = \begin{bmatrix} -1,1914 & 2,5038 & -0,3980 & -21,828 \end{bmatrix}$$

Ahora con estos valores se pueden diseñar los observadores necesarios para cada salida

del sistema de suspension como se mostro en la sección 3.5 tomando la consideración de que el sistema está libre de fallas en actuadores.

Simulación del esquema de observadores dedicados

Al igual que en los casos anteriores, se realizaron simulaciones para condiciones libres de falla, condición de falla en el estado 1 y condición de falla en el estado 3. El programa Simulink desarrollado para este modelo se ilustra en el ApéndiceB.5.

En la Figura (4.28) se muestran los residuos generados con el esquema de observadores dedicados a partir de condiciones libres de falla, se observa que ningún residuo se encuentra activado, por lo cual el sistema brinda información sobre que no existe falla alguna.

La Figura (4.29) presenta los residuos en condición de falla en el estado 1, la falla es introducida a los seis segundos de simulación por medio de una entrada tipo escalón. Se observa que se activa solo uno de los residuos, el correspondiente al estado en el cual se introdujo la falla, mientras que el resto de los residuos permanece inactivo cumpliendo con $r^j(t) = 0$.

Por último, en la Figura (4.30) se aprecian los residuos en condición de falla en el estado 3, esta falla se introduce a los diez segundos de simulación por medio de una entrada tipo escalón. El residuo correspondiente al estado afectado por la falla se activa mientras que los otros no se alteran y permanecen en cero.

Los resultados demuestran claramente que el esquema de observadores dedicados hace un aislamiento de las fallas, haciendo posible la identificación del lugar en el cual ocurrieron.

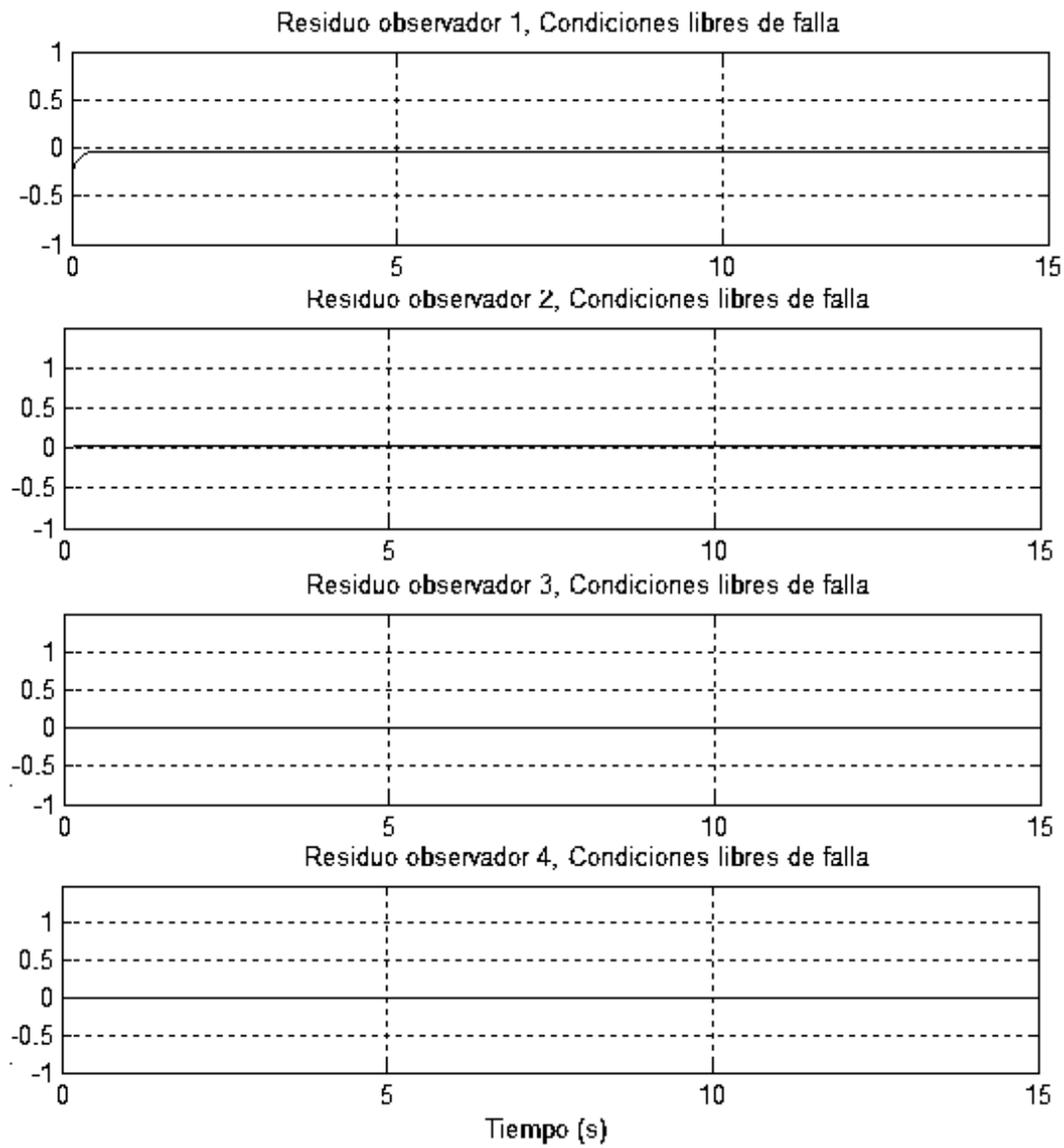


Figura 4.28: Residuos generados en condiciones libres de falla

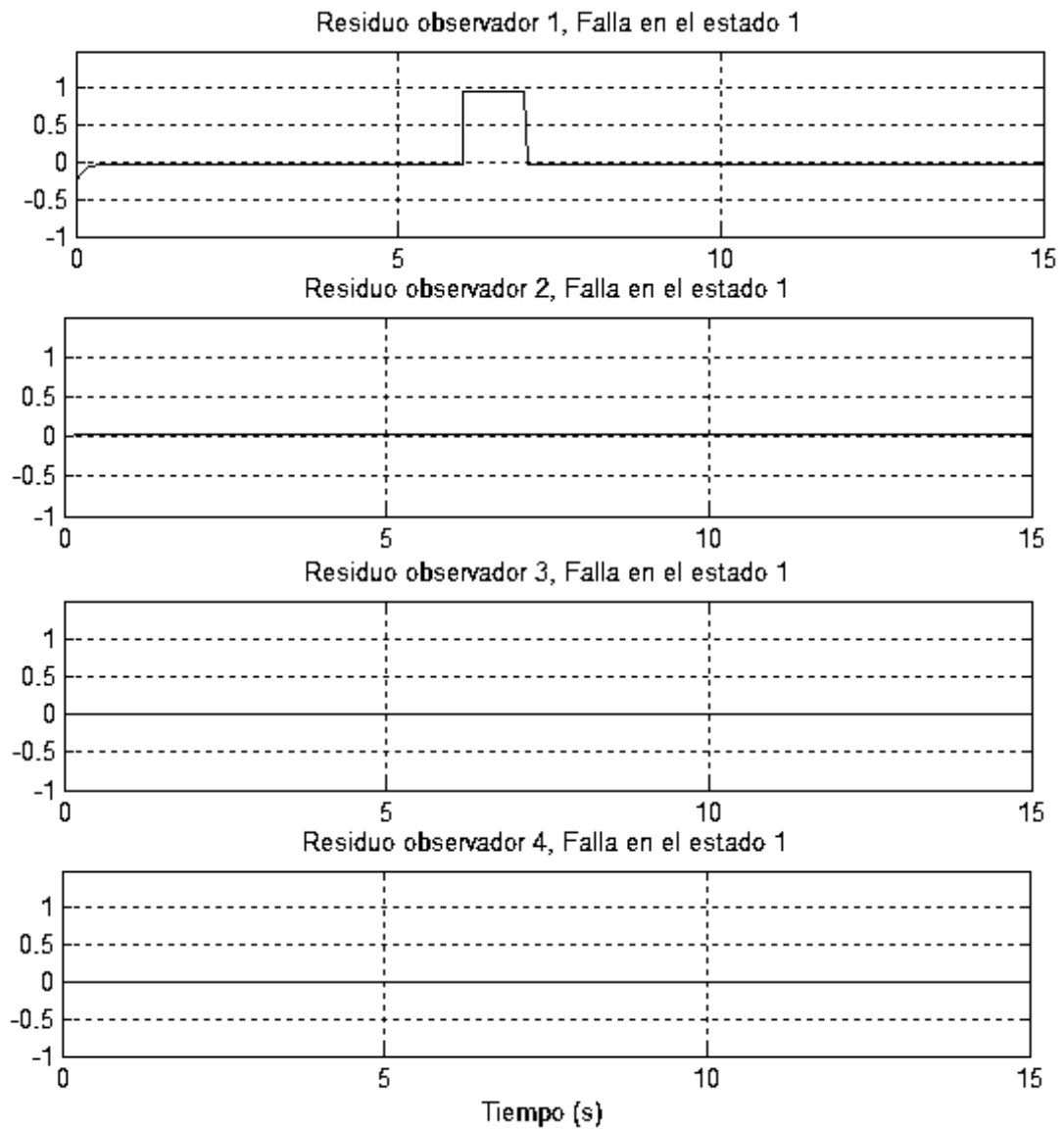


Figura 4.29: Residuos generados en condición de falla en el estado 1

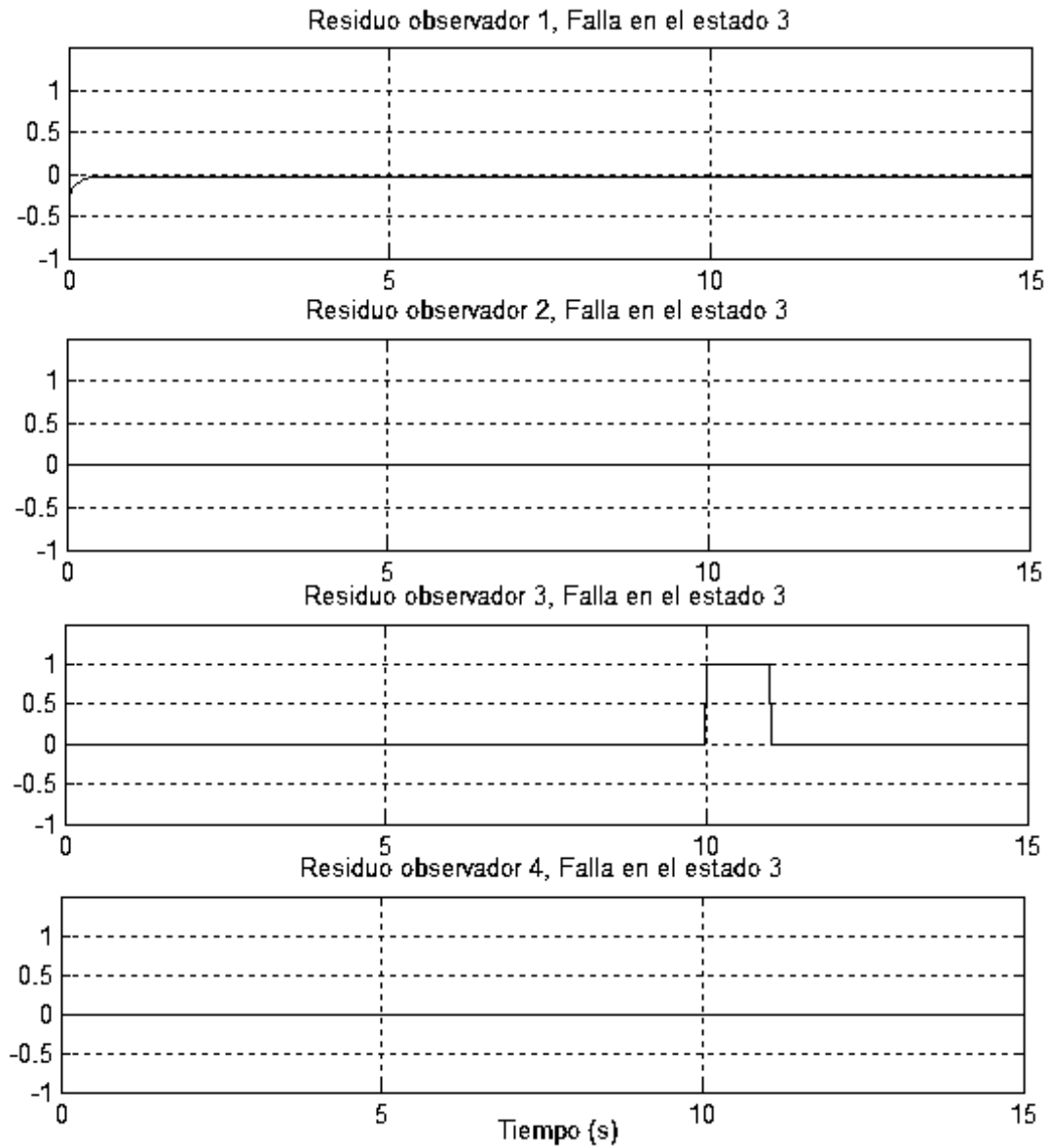


Figura 4.30: Residuos generados en condición de falla en el estado 3

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo futuro

5.1. Conclusiones

En el presente trabajo se abordó el problema del diagnóstico de fallas desde dos diferentes esquemas basados en observadores aplicados a sistemas no lineales, mediante los resultados obtenidos de cada esquema se realizó una comparación de las características propias de cada uno obteniendo algunas conclusiones importantes.

Debido al comportamiento mostrado en los esquemas de observadores con entradas desconocidas y observadores dedicados de orden completo se observó que ambos tienen un comportamiento similar, sin embargo por la simplicidad de diseño es más recomendable la utilización de un esquema de observadores dedicados para aplicaciones donde las perturbaciones no sean de gran importancia de lo contrario es recomendable utilizar un esquema de UIO's para desacoplar estas perturbaciones.

El esquema de observadores con entradas desconocidas con esquema de aislamiento presentó robustez ante las fallas, lo cual disminuye el valor máximo de estas en el residuo y posteriormente las elimina abriendo con esto la posibilidad de la detección de fallas posteriores, mientras que el esquema de observadores dedicados no presenta ningún grado de robustez, por lo tanto las fallas permanecen en los residuos hasta que desaparezcan por sí mismas. Por lo anterior se recomienda la implementación de esquemas de UIO's con aislamiento para aplicaciones en donde las fallas puedan ser de larga duración y afecten la

detección de fallas posteriores.

El esquema de observadores con entradas desconocidas presentó ligeras oscilaciones en sus residuos en sistemas de dinámica muy rápida, para los esquemas de observadores dedicados esto no sucede, por lo cual, para sistemas de dinámica rápida en aplicaciones donde no sea importante la robustez que brinda un esquema de entradas desconocidas es más recomendable utilizar esquemas de observadores dedicados. Si se requiere la aplicación del esquema con entradas desconocidas en estos sistemas de dinámica rápida para aprovechar su robustez, es necesario considerar si las ligeras oscilaciones generadas afectan el proceso de detección de fallas, de ser así, será necesaria la implementación de alguna técnica adicional para reducir esta oscilación.

En los esquemas de observadores con entradas desconocidas las fallas aumentan su valor en el residuo en sistemas donde los valores de la planta son muy altos, esto debido al proceso de diseño, lo cual no es de gran importancia ya que al ser un esquema robusto la falla se elimina en un corto periodo de tiempo. Para los esquemas de observadores dedicados esto no sucede y los valores de las fallas mantienen siempre su mismo valor.

Un esquema de observadores dedicados detecta la falla tan sólo en el residuo correspondiente al estado afectado por esa falla, mientras que en un esquema con entradas desconocidas la falla es detectada por medio de la activación de todos los residuos excepto el correspondiente al estado donde se originó la falla. Esta condición presenta un caso especial para sistemas más complejos que involucren mayor número de estados, en el cual si aparece una falla en el mismo momento en varios estados, no será posible saber el lugar en el que ocurrieron debido a que se activaran todos los residuos en un mismo instante. Para evitar esta situación es necesario generar una lógica de identificación posterior que permita obtener información sobre donde ocurrió cada falla.

El diseño de un esquema de observadores dedicados es mucho más simple que un esquema de observadores con entradas desconocidas, esto se vuelve un factor importante a considerar para la elección de un esquema de diagnóstico de fallas.

Con lo presentado en este trabajo resulta evidente que para la elección de un esquema para diagnóstico de fallas es necesario realizar un análisis del sistema en el que se aplicará y

las necesidades propias de la aplicación, como robustez, complejidad del sistema y velocidad de la dinámica del mismo.

5.2. Trabajo futuro

El diagnóstico de fallas se ha convertido en un área de gran importancia en los sistemas dinámicos actuales por lo que es necesario seguir abordando el tema para obtener mejores resultados a la vez que se van solucionando problemáticas aún abiertas en este campo. Las temáticas planteadas como continuación al presente trabajo son:

- Llevar la experimentación realizada a través de simulaciones en la presente tesis al sistema real en el caso particular del Sistema Hidráulico de Dos Tanques.
- Profundizar en las diversas técnicas de diagnóstico de fallas basadas en observadores como son los observadores con modos deslizantes.
- Extender el enfoque planteado de Observadores con Entradas Desconocidas para abarcar las fallas en actuadores.
- Realizar un estudio comparativo entre técnicas de diagnóstico de fallas basadas en el modelo y técnicas que no requieren de este.

Apéndice A

Programas en MatLab

A.1. Programa para el diseño de un UIO

```
%*****  
  
%Diseño de un UIO  
  
%*****  
  
function UIO(A,B,C,E)  
obs=obsv(A,C);  
rangoA=rank(A);  
  
%Inicialización de las matrices H,T y A1  
H=0;  
T=0;  
A1=0;  
  
%Primer Paso:  
  
%Checar la condición de rango para E y CE  
  
%Si rank(CE)=rank(E)  
I = eye(4);  
CE=C*E;  
if rank(CE)==rank(E)
```

```

%2do paso:
%Calcular H,T y A1
H=E*inv(CE'*CE)*CE';
T= I-H*C;
A1=T*A;
%A1=A-E*inv(CE'*CE)*CE'*C*A
%3er Paso:
%% %%Checar la observabilidad del par (A1,C)
OB=obsv(A1,C);
n=rank(OB);
else
;
end
%% %% %%Cálculo de los valores K1,F,K,K2%% %% %%
po=[-2 -3 -4 -5];
K1=place(A1',C',po);
K1=K1';
F=A1-K1*C
K=K1+F*H;
K2=K-K1;
eigenv = eig(F)
%% %% %%CALCULO DE Csub1 y Csub2%% %% %% %% %%
Csup1 = C;
Csup1(1,:) = [];
Csup1;
Csub1= C(1,:);
Csub1;
Csup2 = C;
Csup2(2,:) = [];

```

```

Csup2;
Csub2= C(2,:);
Csub2;
Csup3 = C;
Csup3(3,:) = [];
Csup3;
Csub3= C(3,:);
Csub3;
Csup4 = C;
Csup4(4,:) = [];
Csup4;
Csub4= C(4,:);
Csub4;
%%%%%%%%%CALCULO DE Hsub1 y Hsub2%%%%%%%%%
Hsup1=E*inv((Csup1*E)'*(Csup1*E))*(Csup1*E)';
Hsup2=E*inv((Csup2*E)'*(Csup2*E))*(Csup2*E)';
Hsup3=E*inv((Csup3*E)'*(Csup3*E))*(Csup3*E)';
Hsup4=E*inv((Csup4*E)'*(Csup4*E))*(Csup4*E)';
%%%%%%%%%CALCULO DE K1%%%%%%%%%
K1sup1 = K1;
K1sup1(:,1) = [];
K1sup1;
K1sub1= K1(:,1);
K1sub1;
K1sup2 = K1;
K1sup2(:,2) = [];
K1sup2;
K1sub2= K1(:,1);
K1sub2;

```

```

K1sup3 = K1;
K1sup3(:,3) = [];
K1sup3;
K1sub3= K1(:,3);
K1sub3;
K1sup4 = K1;
K1sup4(:,4) = [];
K1sup4;
K1sub4= K1(:,4);
K1sub4;
%%%%%%%%%CALCULO DE PARAMETROS OBSERVADOR%%%%%%%%%
%%%UIO_1%%%
%Condiciones a cumplir para generar el UIO con aislamiento
Cp1 = Hsup1*Csup1*E;
Tsup1 = I-Hsup1*Csup1;
Fsup1 = Tsup1*A-K1sup1*Csup1;
K2sup1 = Fsup1*Hsup1;
Ksup1 = K1sup1+K2sup1;
%%%UIO_2%%%
Cp2 = Hsup2*Csup2*E;
Tsup2 = I-Hsup2*Csup2;
Fsup2 = Tsup2*A-K1sup2*Csup2;
K2sup2 = Fsup2*Hsup2;
Ksup2 = K1sup2+K2sup2;
%%%UIO_3%%%
Cp3 = Hsup3*Csup3*E;
Tsup3 = I-Hsup3*Csup3;
Fsup3 = Tsup3*A-K1sup3*Csup3;
K2sup3 = Fsup3*Hsup3;

```

```

Ksup3 = K1sup3+K2sup3;
%%%UIO_4%%%
Cp4 = Hsup4*Csup4*E;
Tsup4 = I-Hsup4*Csup4;
Fsup4 = Tsup4*A-K1sup4*Csup4;
K2sup4 = Fsup4*Hsup4;
Ksup4 = K1sup4+K2sup4;
I = eye(3); %este valor de I es para que las dimensiones concuerden en este ejemplo en
I-CH

```

A.2. Programa para el diseño de observadores dedicados

```

function UIO(A,B,C)
%%%Se checa la observabilidad del sistema %%%
obs=obsv(A,C);
rango=rank(obs)
rangoA=rank(A);
C1= C(1,:);
C2= C(2,:);
C3= C(3,:);
C4= C(4,:);
%%% Calculo de la matriz de ganancias por medio de asignación de polos %%%
po=[-2 -3 -4 -5];
L=place(A',C',po);
L1=L(1,:);
L2=L(2,:);
L3=L(3,:);

```



```
L4=L(4,:);
```

Apéndice B

Programas en Simulink

Dentro del bloque de la planta, en ambos casos de estudio, se utilizaron variables globales para realizar la retroalimentación de la salida de la planta hacia los observadores con entradas desconocidas.

B.1. Programa para un UIO de orden completo

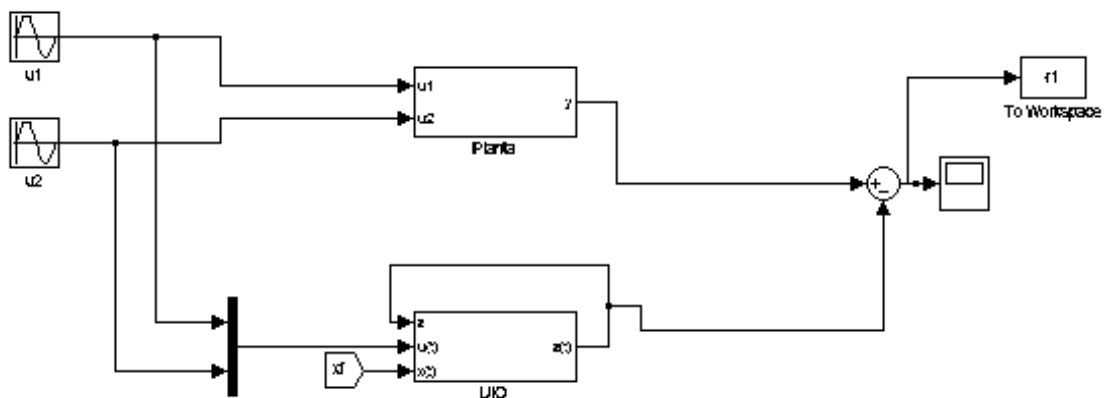


Figura B.1: Programa en Simulink para el modelo de un UIO de orden completo

B.2. Programa para un UIO con esquema de aislamiento para SHDT

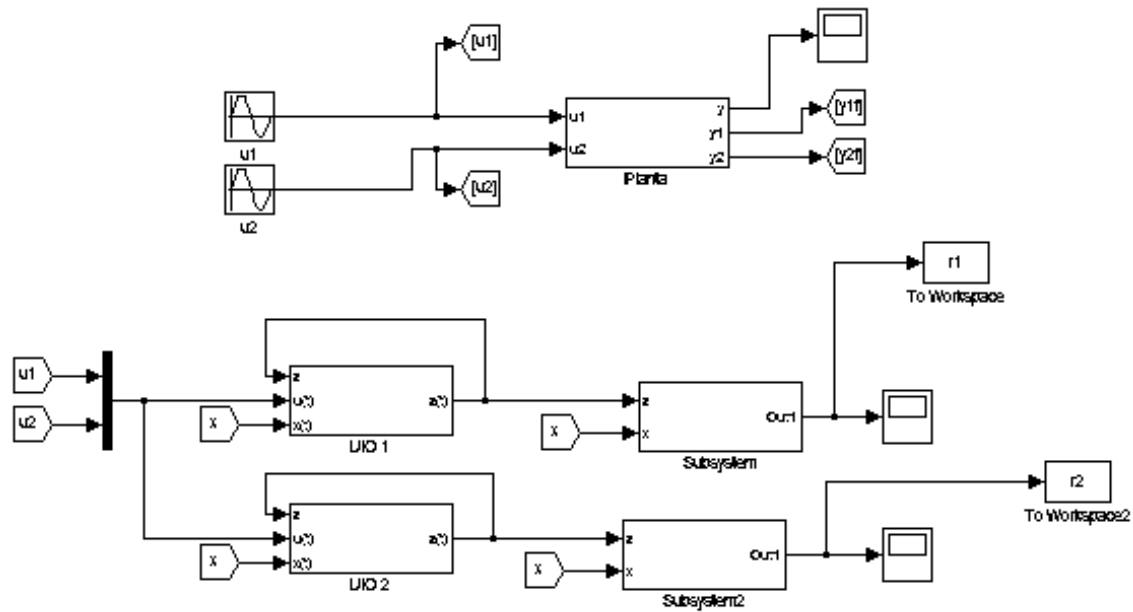


Figura B.2: Programa en Simulink para el modelo de UIO con aislamiento aplicado al SHDT

B.3. Programa de observadores dedicados de orden completo

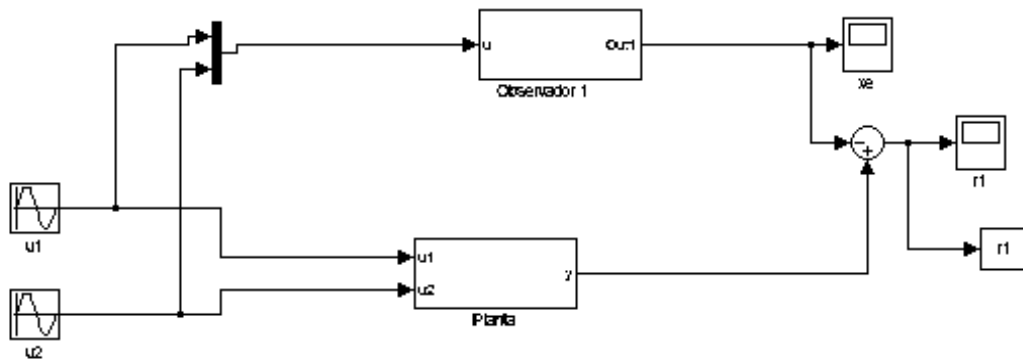


Figura B.3: Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados de orden completo

B.4. Programa de observadores dedicados para el SHDT

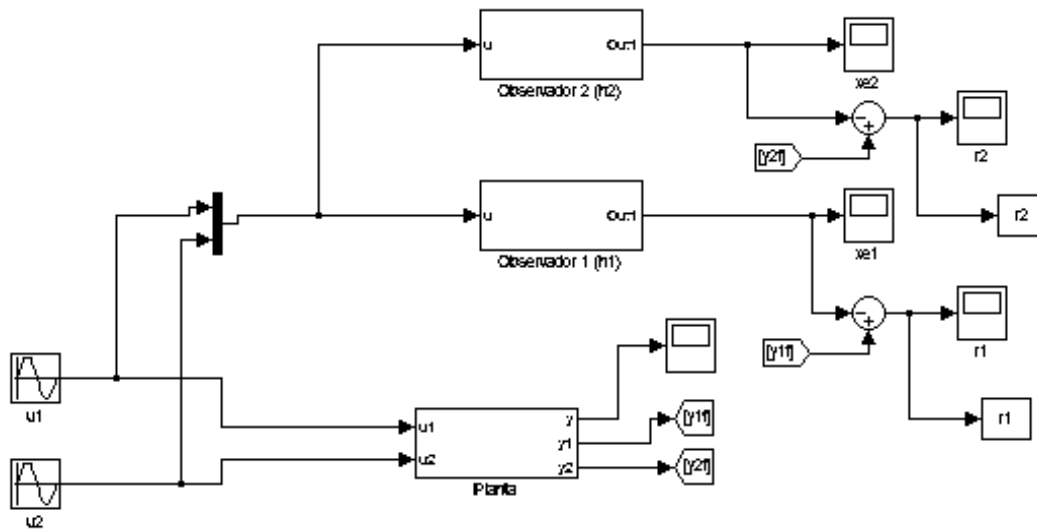


Figura B.4: Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados

B.5. Programa de observadores dedicados suspensión de autobús

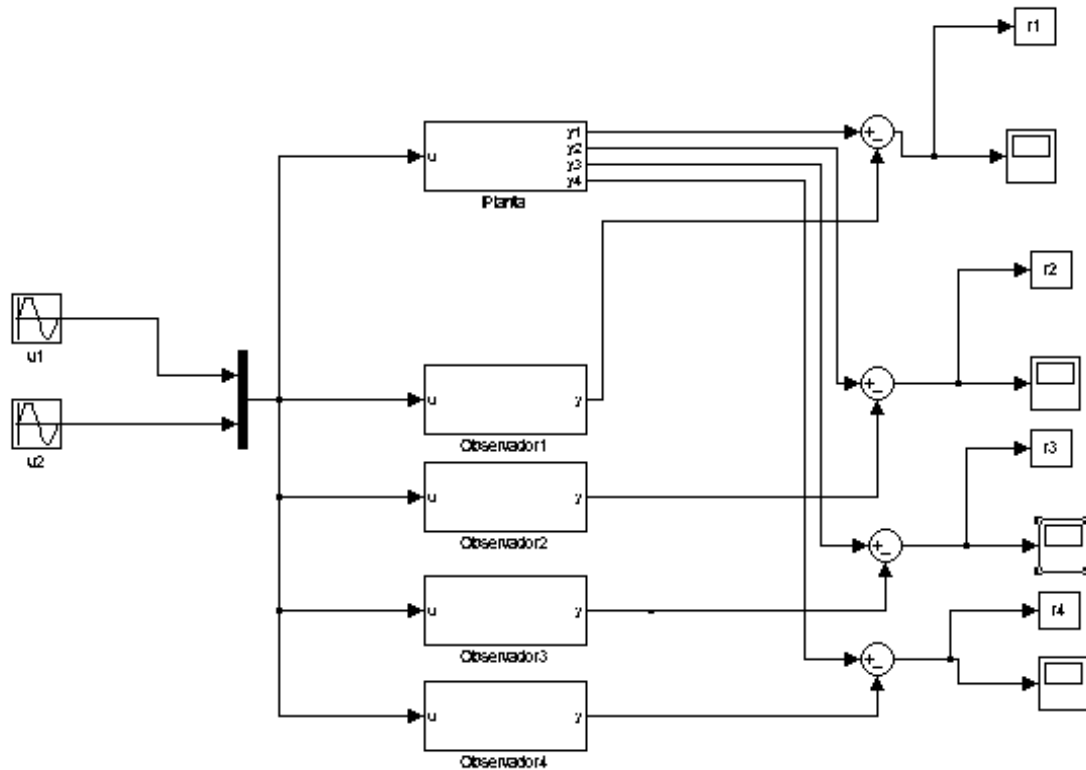


Figura B.5: Programa en Simulink para un esquema de observadores dedicados aplicados a la suspensión de un autobús

B.6. Programa UIO con esquema de aislamiento suspensión de autobús

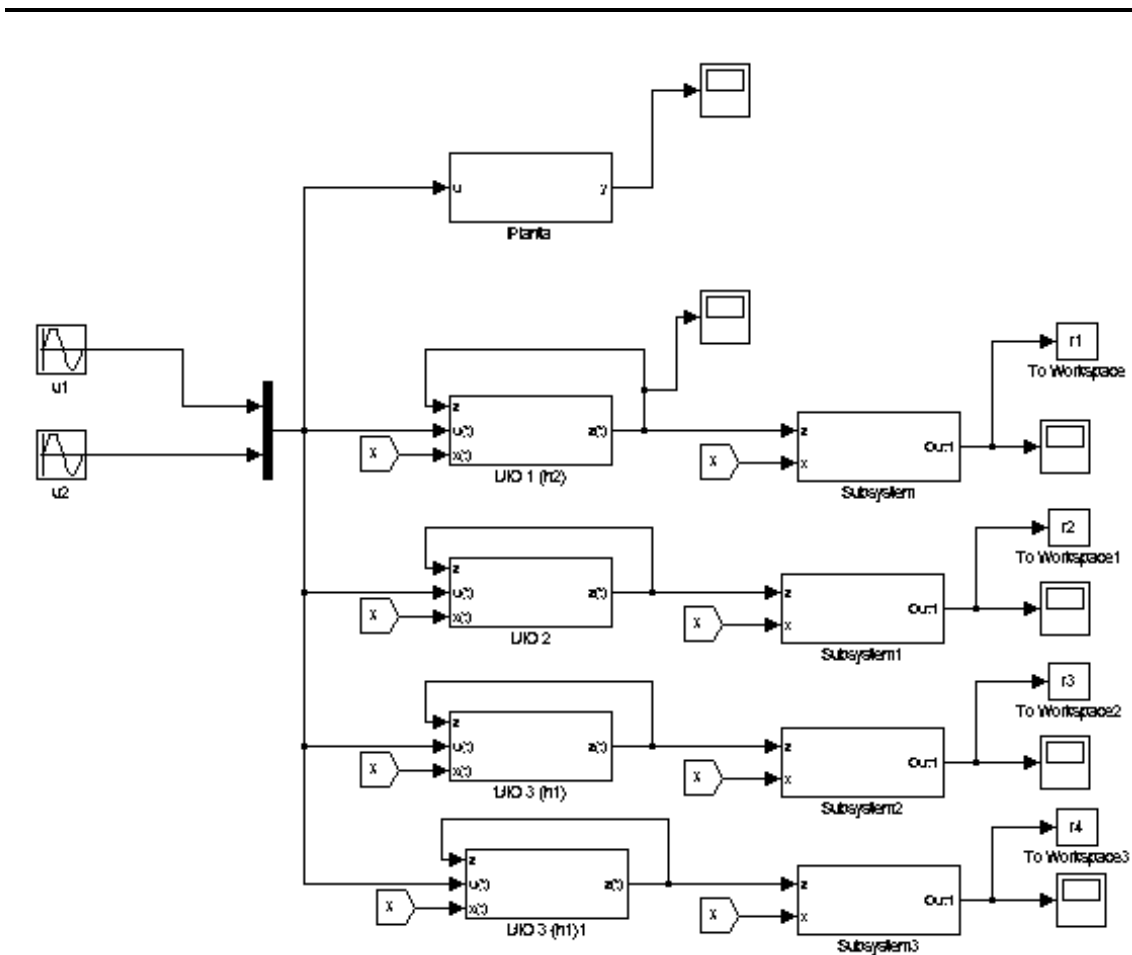


Figura B.6: Programa en Simulink para un UIO con esquema de aislamiento aplicado a la suspensión de un autobús

Bibliografía

- [1] J. Anzures and B.C. Toledo an application of sliding mode observer to fault diagnosis”, XXVI International Congress of Electronic Engineering ELECTRO 2004, Mexico, 2004, pp. 103-108.
- [2] Juan Anzures Marín, "*Diagnostico de fallas en sistemas no lineales usando lógica difusa y observadores con modos deslizantes*", Tesis para obtener el grado de doctor en ciencias, CINVESTAV Unidad Guadalajara, 2007.
- [3] J. A. Marin, N. Pitalúa-Díaz, O. Cuevas-Silva and J. Villar-García, "*Unknown Inputs Observers Design for Fault Detection in a Two-tank Hydraulic System*", 2008 Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference CERMA 2008, México, pp. 373-378, 2008.
- [4] J. Anzures and Nun Pitalua, "*Robust Fault Detection and Isolation using Unknown Inputs Observers*"Medellin, 2009, pp. 209-217.
- [5] C. Bohn, O. Magnor and M. Schultabers, "*State Observer based Analysis of Crankshaft Speed Measurements with Application to Misfire Detection*" Internation Conference on Control and Automation, Budapest, Hungary, 2005.
- [6] Chee Pin Tan and Edwards, "*Sliding mode observers for reconstruction of simultaneous actuator and sensor faults*", Proceedings of the CDC, 2003, pp. 1445-1460.
- [7] E.Y. Chow and A.S. Willisky, "*Analytical Redundancy and the Design of Robust Failure Detection Systems*", IEEE Trans on Automatic Control, Vol. 29, No. 7, 1984, pp. 603-614.

- [8] M. Darouach, M. Zasadzinski and S.J. Xu, “*Full-order observers for linear systems with unknown inputs*”, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 39, No.3, pp. 607-609, 1994.
- [9] Feng Tao and Qing Zhao, “*Fault Detection Observer Design with Unknown Inputs*” Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada, 2005.
- [10] Adrian Filipescu, Luc Dugard and Jean-Michel Dion, “*Adaptative Gain Sliding Observer based Sliding Controller for Uncertain Parameters Nonlinear Systems. Application to Flexible Joint Robots*” Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, 2003.
- [11] P.M. Frank, “*Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy- A survey and some new results*”, Automatica, Vol. 26, No.3, 1990, pp. 459-474.
- [12] J.J. Gertler, “*Survey of model-based failure detection and isolation in complex plants*” IEEE Contr. Syst. Mag. Vol. 8, No. 6, 1988, pp. 3-11.
- [13] J.J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*, New York: Marcel Dekker, 1998.
- [14] Gridsada Phanomchoeng, Rajesh Rajamani, Damrongrit Piyabongkarn, "*Nonlinear Observer for Bounded Jacobian Systems, with Applications to Automotive Slip Angle Estimation*" IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 56, No. 5, 2011.
- [15] Guannan He and Jing Ji, “*Full-order Observers Design for Nonlinear Systems with Unknown Input*” Chinese Control and Decision Conference, 2011.
- [16] Yuping Guan and Mehrdad Saif, “*A Novel Approach to the Design of Unknown Input Observers*” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.36, No.5, 1991
- [17] R. Isermann, “*Fault Diagnosis of Machines via Parameter Estimation and Knowledge Processing-Tutorial Paper*”, Automatica, Vol. 29, No. 4, 1993, pp. 815-835.

- [18] D. Koenig and S. Mammar, “*Design of a class of reduced order unknown inputs nonlinear observer for fault diagnosis*” Proceedings of the American Control Conference , Arlington, 2001.
- [19] I. I. Lázaro Castillo, *Ingeniería de Sistemas de Control Continuo*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología, Michoacán (COECYT), Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE), 2008.
- [20] P. P. Lin, H. Singh, “*Intelligent model free diagnosis for multiple faults in a nonlinear dynamic system*” *Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE/ASME International Conference, 2007*, pp. 1 - 6.
- [21] Liu Yutian, Li Changgang, Hu Junjie, “*Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control of Nonlinear Systems*” International Conference on Automation and Logistics, Hong Kong and Macau, 2010.
- [22] Mihai Lungu, “*The Estimation of an Aircraft Motions by using the Bass-Gura Full-Order Observer*” Craiova, Romania, 2012.
- [23] L.A. Mironovski, “*Functional diagnosis of linear dynamic system - a survey*”, *Autumn Remote Control*, 1980, 41: pp. 1122-1143.
- [24] Control Tutorials for MatLab and Simulink, bus suspension. Agosto 2013, www.ctms.engin.umich.edu/
- [25] Katsuhiko Ogata, *Ingeniería de Control Moderna*, Madrid: Pearson Educación, 2006.
- [26] Jose Juan Rincón Pasaye, Rafael Martinez Guerra and Alberto Soria Lopez, “*Fault Diagnosis in Nonlinear Systems: An application to a three-tank system*” American Control Conference, Seattle, Washington, USA, 2008.
- [27] R.J. Patton, P.M. Frank and R.N. Clark, *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, New York: Springer-Verlag, 2000.
- [28] J. Chen and R.J. Patton, *Robust Model-Based fault Diagnosis for Dynamic Systems*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

- [29] Luis Alberto Torres Salomao, “*Diseño de observadores de entradas desconocidas aplicados al problema del diagnóstico de fallas*”, Tesis de licenciatura, Agosto 2009.
- [30] P.S. Teh, “*Observer-based Residual Design for Nonlinear Systems with Unknown Inputs*” Australian Control Conference, Melbourne, Australia, 2011.
- [31] Wang Junzheng, Zhao Jiangbo and Ma Liling, “*A robust fault detection and isolation method via sliding mode observer*”, Intelligent Control and Automation, WCICA, Vol. 2, pp. 1727-1730, 2004.
- [32] Wang Zhi, “*Unknown Input Observer Based Fault Class Isolation and Estimation*” Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 2010.
- [33] Weitian Chen and Mehrdad Saif, “*Fault Detection and Isolation Based on Novel Unknown Input Observer Design*” Minneapolis, Minnesota, USA, 2006.
- [34] Zelia A. Peixoto, Flavia M. Freitas Sa, “*Application of sliding mode observer for Induced e.m.f., Position and Speed Estimation of Permanent Magnet Motors*” IEEE Catalogue No. 95TH8025, 1995.
- [35] P. Zhang and S. X. Ding, “*Fault Tolerant Measurement and Monitoring of a Nonlinear Two-Tank System*”, Proceedings of the 13th Mediterranean Conference on Control and Automation, Cyprus, 2005, pp. 1355-1360.
- [36] Zhang Minghu, Wang Dehu, Lv Shijun, Song Yuxi, Liu Hong, Chen Shaojie, “*Application on Virtual Instrument and Neural Networks in the Fault Diagnosis*” Intelligent Computation Technology and Automation, 2009, pp. 317 - 320.