

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecatrónico*

PROYECTO TÉCNICO:

**ENFOQUES BASADOS EN OBSERVADORES DE
ESTADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE
DETECCIÓN DE FALLAS EN UNA CLASE DE
PROCESOS INDUSTRIALES**

AUTORES:

CÉSAR ISMAEL CRIOLLO ARÉVALO
JONNATHAN PAÚL VALDEZ SOLÍS

TUTORA:

ING. MARIELA CERRADA LOZADA, Ph.D

CUENCA – ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, César Ismael Criollo Arévalo con documento de identificación N° 0105609713 y Jonnathan Paúl Valdez Solís con documento de identificación N° 0105243836, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: “**ENFOQUES BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESOS INDUSTRIALES**”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecatrónico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2021.



César Ismael Criollo Arévalo
C.I 0105609713



Jonnathan Paúl Valdez Solís
C.I 0105243836

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**ENFOQUES BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESOS INDUSTRIALES**”, realizado por César Ismael Criollo Arévalo y Jonnathan Paúl Valdez Solís, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2021.

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized cursive letters, positioned above a horizontal line that extends across the page.

Ing. Mariela Cerrada Lozada, Ph.D.

C.I. 0151771813

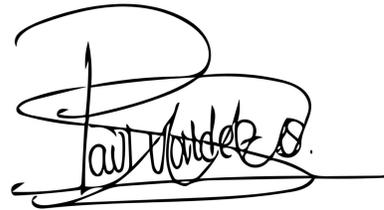
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, César Ismael Criollo Arévalo con documento de identificación N° 0105609713 y Jonnathan Paúl Valdez Solís con documento de identificación N° 0105243836, autores del trabajo de titulación: **“ENFOQUES BASADOS EN OBSERVADORES DE ESTADOS PARA EL DISEÑO DE FILTROS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESOS INDUSTRIALES”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2021.



César Ismael Criollo Arévalo
C.I 0105609713



Jonnatnan Paúl Valdez Solís
C.I 0105243836

Dedicatoria

Primeramente a Dios, por brindarme salud y fortaleza para poder cumplir una meta mas en mi vida. A mis padres Katty y César que han sido un pilar fundamental durante mi formación académica, por ayudarme con los recursos necesarios para completar mi carrera universitaria, por brindarme su apoyo incondicional, dándome fuerzas para seguir adelante y no desmayar a pesar de los trompiezos que he tenido en mi vida y por haberme inculcado todos mis principios, valores que hoy me definen como persona. A mis hermanos, que desde el día que nacieron son una motivación para cumplir todos mis sueños, poder sacar adelante a mi familia y ser un ejemplo para ellos. A mi enamorada Nathy quien ha creído cada día en mi, alentandome y motivandome para alcanzar este objetivo, recordandome que nada es imposible en esta vida. A mis abuelitos, familia y amigos en general que me han apoyado en mis estudios y me han ayudado a crecer como persona.

Ismael

A a Dios por permitirme y darme la oportunidad de lograr una de mis metas mas importantes en la vida. A mi madre Ximena que me ha dado todo en la vida, que me ha inculcado esos valores y principios que me ayudaron a formarme como persona y como profesional, gracias por darme esa oportunidad de tener mis estudios y acompañarme siempre en el camino, este logro es tambien es suyo y le estaré eternamente agradecido. A mis Hermanos Wilson y Juan Diego que han sido ejemplo y apoyo durante este largo proceso, gracias por nunca dejarme caer y saber que siempre puedo contar con ustedes. A mi Padre Wilson y mis Abuelitos Ariosto y Olga que lamentablemente fallecieron pero que siempre los llevaré en mi corazon y que gracias a ellos soy lo que soy hoy en día y se los dedico donde sea que ellos se encuentren. A mis mejores amigos que formaron parte de este proceso y que junto a ellos vivimos tantas experiencias que jamás se borrarán de mi mente. A mi familia en general que de una u otra forma estuvo cerca de mi durante este proceso y me dieron su apoyo.

Jonnathan

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme dado salud y valor para culminar mis estudios. A mis padres por la confianza y apoyo que me han dado en toda mi vida. Un especial agradecimiento a todos los docentes de la carrera que han contribuido a formarme como profesional y a la Doctora Mariela Cerrada que además de ser una de las mejores profesoras que tuve en la universidad, como tutora supo guiarnos de la mejor manera durante nuestro trabajo de titulación. A mi compañero de tesis y mejor amigo Paúl, que siempre me ha apoyado y me ha brindado su sincera amistad durante muchos años, y ahora gracias al duro trabajo que hicimos hemos cumplimos una meta mas en nuestras vidas.

Ismael

Agradecer a Dios por darme salud y sabiduría para lograr esta meta importante en mi vida. A mi Madre Ximena y mis hermanos Wilson y Juan Diego que sin duda han estado para apoyarme siempre y que sobre todo siempre creyeron en mi en este largo proceso. A mis docentes que durante estos 5 años fueron parte de este largo proceso y me ayudaron a formarme como profesional con sus conocimientos. A mi tutora de tesis la Ing. Mariela Cerrada que gracias a su gran ayuda y conocimiento nos pudo guiar a mi y a mi compañero para poder lograr un excelente trabajo. A mis amigos por siempre estar ahí para apoyarme en el camino y nunca dejarme caer.

Jonnathan

Resumen

El proyecto técnico con enfoque general titulado “Enfoques basados en observadores de estados para el diseño de filtros de detección de fallas en una clase de procesos industriales”, presenta el diseño y la implementación de un conjunto de filtros de detección de fallas para un sistema de tanques interconectados cuyo prototipo esta disponible en el laboratorio LACTI de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca. El contenido del proyecto está dividido en una parte de diseño teórico y una parte de implementación tiempo real simulada según la técnica *software in the loop*.

La introducción se presenta en el capítulo 1, con los antecedentes del problema, su delimitación y los objetivos planteados en este trabajo.

El estudio teórico se realiza en el capítulo 2 que contiene las bases conceptuales de la generación de residuales basado en modelos para la detección y diagnóstico de fallas. Primero se presenta los conceptos básicos de diseño de controladores y observadores de Luenberger basados en modelo de espacio de estados, seguidamente se presentan los fundamentos de un algoritmo algebraico para el diseño de una clase de observadores y post-filtro para la obtención de residuales.

En el capítulo 3 se representa la caracterización de cada uno de los elementos que intervienen en el proceso de sistema de tanques interconectados para la posterior obtención del modelo matemático del sistema en condición nominal y en siete condiciones de fallas: cuatro fallas internas y tres en actuadores y sensores. Se propone un controlador por realimentación del vector de estados para el sistema nominal, con el fin de mantener el nivel del primer tanque controlado a una señal de referencia constante. Se propone un observador de Luenberger para la detección de fallas del sistema y se analiza la generación de residuales. El observador de Luenberguer generalmente se utilizan sólo para detección, puesto que varias fallas pueden dar lugar al cambios en un mismo residuo. Sin embargo, mediante el empleo de un determinado tipo de observador llamado observador de diagnóstico el cual incluye un post-filtro se genera una información adicional en los residuales lo que permite identificar específicamente fallas en el sistema. Todo lo expuesto integra técnicas de generación residual basadas en redundancia analítica.

En el capítulo 4 se presenta el diseño del sistema de monitorio basado en el comportamiento

de los residuales generados por los observadores para cada una de las siete condiciones de fallos, el cual se representa en un conjunto de reglas lógicas que comparan los valores en estado estable de los residuales. La implementación en tiempo real se hace con la técnica *software in the loop*, que integra la información de las variables de salida del sistema controlado, simulado en un computador, con el sistema de monitorización basado en generación de residuales y reglas lógicas, implementado en otro computador. Esta integración esta basada en el protocolo MQTT cuyo uso está actualmente muy difundido en aplicaciones industriales, y es un standard para pase de mensajes entre dispositivos IOT (*Internet of Things*) y la nube. Se presenta el análisis de los resultados obtenidos del sistema controladorado con los observadores implementados, y el sistema de monitorización, tanto en condiciones normales de funcionamiento como al introducir todas las fallas propuestas en el sistema.

Finalmente en el capítulo 5 se presenta las conclusiones y recomendaciones finales del trabajo de titulación, en esta sección se expondrán las problemáticas presentadas al momento de realizar el trabajo, así como tambien la importancia que tiene dentro de un proceso industrial la implementación de un sistema de deteccion y diagnóstico de fallas.

Abstract

The technical project with a general approach entitled "State observer-based approaches to the design of fault detection filters in a class of industrial processes", presents the design and implementation of a set of fault detection filters for a system of interconnected tanks whose prototype is available in the LACTI laboratory of Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. The content of the project is divided into a theoretical design part and a simulated real-time implementation part according to the technique *software in the loop*.

The introduction is presented in Chapter 1, with the background of the problem, its delimitation and the objectives set out in this work.

The theoretical study is carried out in Chapter 2, which contains the conceptual bases of the generation of residuals based on models for the detection and diagnosis of faults. First, the basic concepts of design of Luenberger controllers and observers based on the state space model are presented, then the fundamentals of an algebraic algorithm for the design of a class of observers and post-filter to obtain residuals are presented.

Chapter 3 represents the characterization of each of the elements that intervene in the interconnected tank system process for the subsequent obtaining of the mathematical model of the system in nominal condition and in seven failure conditions: four internal failures and three in actuators. and sensors. A state vector feedback controller is proposed for the nominal system, in order to keep the level of the first tank controlled at a constant reference signal. A Luenberger observer is proposed for the detection of system failures and the generation of residuals is analyzed. The Luenberguer observer is generally used only for detection, since several faults can lead to changes in the same residue. However, through the use of a certain type of observer called a diagnostic observer, which includes a post-filter, additional information is generated in the residuals, which makes it possible to specifically identify faults in the system. All of the above integrates residual generation techniques based on analytical redundancy.

Chapter 4 presents the design of the monitoring system based on the behavior of the residuals generated by the observers for each of the seven fault conditions, which is represented in a set of logical rules that compare the values in steady state. of the residuals. The real-time implementation is done with the *it software in the lopp* technique, which integrates the information from the output variables of the controlled system, simulated on a computer, with

the monitoring system based on generation of residuals and logical rules , implemented on another computer. This integration is based on the MQTT protocol, which is currently widely used in industrial applications, and is a standard for passing messages between IOT devices (*Internet of Things*) and the cloud. The analysis of the results obtained from the controlled system is presented with the implemented observers, and the monitoring system, both under normal operating conditions and when introducing all the proposed failures in the system.

Finally, in chapter 5 the final conclusions and recommendations of the degree work are presented, in this section the problems presented at the time of carrying out the work will be exposed, as well as the importance of the implementation of a system of detection and diagnosis of faults.

Índice

Cesión de Derechos de Autor	I
Certificación	II
Declaratoria de Responsabilidad	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	VI
Abstract	VIII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes del problema de estudio	3
1.2. Importancia y alcances	7
1.3. Delimitación	8
1.4. Objetivo general	9
1.5. Objetivos específicos	9
2. Fundamentación teórica	10
2.1. Fallas en sistemas de control	10
2.2. Características deseables en un sistema de detección y diagnóstico de fallos .	12
2.3. Propiedades de un sistema sujeto a fallas	13
2.4. Nociones fundamentales de la detección y diagnóstico de fallas	14
2.4.1. Diagnóstico basado en consistencia	14
2.4.2. Diagnóstico de sistemas de variables continuas	16
2.4.3. Métodos de generación de residuos.	19
2.5. Filtros de detección y diagnóstico de fallas basados en observadores de estado	21
2.5.1. Filtro de detección basado en el observador de Luenberger	22
2.5.2. Observador de diagnóstico	24
2.5.3. Algoritmo de aproximación algebraica para la solución de las condiciones de Luenberger	26
2.6. Modelado de sistemas sujeto a fallas	27

2.7. Simulación software in the loop (SIL) e implementación en tiempo real . . .	29
3. Marco Metodológico	32
3.1. Descripción del proceso sistema de tanques interconectados	32
3.2. Modelado del sistema nominal e identificación de parámetros	34
3.2.1. Modelado de las válvulas	36
3.2.2. Modelado de sensores	39
3.2.3. Identificación de parámetros de los tanques	41
3.2.4. Modelo nominal del proceso	42
3.3. Identificación de los modos de fallas y modelado de sistema sujeto a falla . .	42
3.3.1. Modelado de las fallas internas	42
3.3.2. Modelado de las fallas en sensores y actuadores	43
3.3.3. Linealización aproximada del modelo	44
3.4. Diseño de un controlador por realimentación del vector de estados con acción integral para el sistema de tanques interconectados	47
3.4.1. Diseño del controlador	47
3.4.2. Validación del sistema de control	51
3.5. Diseño del observador de Luenberger de orden completo y los observadores de diagnóstico	57
3.5.1. Observador de estado de orden completo	58
3.5.2. Observadores de diagnóstico (OD)	64
3.6. Discretización del observador de Luenberger y observador de diagnóstico . . .	78
4. Resultados: Validación y pruebas del diseño	83
4.1. Implementación en tiempo real (software in the loop)	83
4.2. Análisis de resultados	88
4.3. Sistema de alarmas para la detección y diagnóstico de fallas en el sistema . .	107
5. Conclusiones y recomendaciones	114
ANEXOS	116
A. Códigos de MatLab utilizados para el diseño y las simulaciones	117
B. Diagramas de Simulink para la generación de residuales	120

Lista de Tablas

1.	Constante de tiempo sensor T PMC131.	40
2.	Simulación del sistema no lineal y señal de control.	52
3.	Simulación del sistema con cada una de las fallas internas que puede presentar.	53
4.	Simulación del sistema con cada una de las fallas en sensores y actuadores que se pueden presentar.	55
5.	Residuales del observador de Luenberger ante la presencia de las distintas fallas	62
6.	Residuales del observador de diagnóstico 1 ante la presencia de fallas.	74
7.	Residuales del observador de diagnóstico 2 ante la presencia de fallas.	76
8.	Residuales de los observadores de diagnóstico ante la presencia de todas las fallas	77
9.	Valores nominales de cada uno de los residuales sin la presencia de fallas.	107
10.	Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rl1$ de $Rl1_{nominal}$	108
11.	Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rl2$ de $Rl2_{nominal}$	109
12.	Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rod1_2$ de $Rod1_{2nominal}$	110
13.	Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rod2_2$ de $Rod2_{2nominal}$	111
14.	Conjunto de condiciones lógicas para cada falla del sistema	113

Lista de Figuras

1.1. Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana	8
2.1. Tipos de fallas según la disposición en el tiempo (Villegas Berbesi, 2012).	11
2.2. Tipos de fallas según su modelado (Villegas Berbesi, 2012).	12
2.3. Partición del espacio nominal y de falla (Blanke y col., 2016)	15
2.4. Comportamiento del sistema sin falla y defectuoso (Blanke y col., 2016)	16
2.5. Sistema dinámico continuo (Blanke y col., 2016)	17
2.6. Diagnóstico de sistemas de variables continuas (Blanke y col., 2016)	18
2.7. Clasificación de los métodos de generación de residuos (Cerrada y col., 2011)	19
2.8. Observador de estado de orden completo [7].	22
2.9. Esquema de generación de residuales de un OD (Ding, 2013)	25
2.10. Turbina de aire (Paluszek y Thomas, 2015)	28
2.11. Simulación SIL (Fernández Vela, 2017)	30
2.12. Arquitectura MQTT	31
3.1. Planta de Procesos A del laboratorio LACTI de la UPS Sede Cuenca	32
3.2. Diagrama P&ID Planta A de procesos Laboratorio LACTI (Fernández Vela, 2017)	33
3.3. Modelado del Sistema (Cerrada y col., 2011)	34
3.4. Diagrama de Bloques del Modelo de la Válvula de Control.	36
3.5. Coeficiente de apertura válvula de asiento inclinado Burkert 2702.	37
3.6. Parámetros de la válvula Mark 70SP	38
3.7. Diagrama de Bloques de Modelo del Sensor.	39
3.8. Constante de tiempo sensor Deltabar M PMD55.	40
3.9. Información de los tanques (Molina-Nacipucha, 2013)	41
3.10. Diagrama del control integral (Nise, 2015)	48
3.11. Señal propuesta por el controlador ante la falla de actuador.	55
3.12. Niveles reales ante la falla de sensor 1.	56
3.13. Niveles reales ante la falla de sensor 2.	56
3.14. Residual 1	63
3.15. Residual 2	63
3.16. Tiempo de muestreo Observadores	78
4.1. Protocolo de comunicación MQTT entre 2 ordenadores utilizado para el sistema de detección y diagnóstico de fallas en una clase de proceso industrial	85
4.2. Interfaz Sistema de control de una clase de proceso industrial sujeto a fallas.	86

4.3. Sistema de Monitoreo de Fallas en una clase de proceso Industrial.	87
4.4. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de fuga en el tanque 1.	92
4.5. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla fuga tanque 1.	93
4.6. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de interconexión.	94
4.7. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla de interconexión.	95
4.8. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de fuga en el tanque 2.	96
4.9. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla fuga tanque 2.	97
4.10. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla obstrucción de salida.	98
4.11. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla obstrucción de salida.	99
4.12. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla del actuador.	100
4.13. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla de actuador. .	101
4.14. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla en el sensor 1.	102
4.15. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla en el sensor 1.	103
4.16. Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla en el sensor 2.	104
4.17. Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla en el sensor 2.	105
4.18. Panel de alarmas luego de activar las 7 fallas.	106
B.1. Simulación del observador de Luenberger	120
B.2. Simulación del banco de observadores de diagnóstico	120

1. Introducción

Asociado con las crecientes demandas de mayor rendimiento del sistema y calidad del producto, por un lado, y más rentabilidad por otro lado, la complejidad y el grado de automatización de los procesos técnicos están en continuo crecimiento. Este desarrollo requiere más seguridad y confiabilidad del sistema. Hoy, uno de los problemas más críticos que rodean el diseño de sistemas automáticos es la confiabilidad y tener sistemas confiables, entendiendo la confiabilidad, en este contexto, como la probabilidad de que un sistema o componente, pueda funcionar correctamente fuera de falla, por un tiempo específico (Karajagikar y Sonawane, 2021).

Una forma tradicional de mejorar el sistema es mejorar la calidad, confiabilidad y robustez de los componentes individuales del sistema, como sensores, actuadores, controladores o computadoras. Aun así, no se puede garantizar un funcionamiento del sistema sin fallas. El monitoreo del proceso y el diagnóstico de fallas se están convirtiendo en un ingrediente de un sistema moderno de control automático (Ding, 2013).

Una falla es algo que cambia el comportamiento de un sistema de tal manera que el sistema ya no satisface su propósito. Puede ser un evento interno en el sistema, puede ser un cambio en las condiciones ambientales, puede ser una acción de control incorrecta dada por el operador humano que saca el sistema del punto de operación requerido, o puede ser un error en el diseño del sistema, que permaneció sin ser detectado hasta que el sistema se mueve a un punto de operación donde este error reduce el rendimiento considerablemente. Un fallo provoca un cambio en las características de un componente de tal manera que el modo de funcionamiento o el rendimiento del componente se modifican de forma no deseada. Por lo tanto, las especificaciones requeridas sobre el rendimiento del sistema ya no se cumplen sin embargo un fallo puede ser solucionada por un control tolerante a fallas para que el sistema defectuoso permanezca operativo (Blanke y col., 2016).

Para evitar deterioros en la producción o daños a máquinas y humanos, se deben encontrar fallas lo más rápido posible y se deben tomar decisiones que detengan la propagación de sus efectos. Estas medidas deben ser realizadas por el equipo de control con el objetivo de hacer que el sistema sea tolerante a fallas.

El control tolerante a fallas se refiere a la interacción entre un sistema (planta) y un

controlador. Este controlador no solo incluye la retroalimentación habitual o la ley de control de avance, sino también la capa de toma de decisiones que determina la configuración de control. En general, la forma de hacer que un sistema sea tolerante a fallas consta de dos pasos:

1. Diagnóstico de fallas: se debe detectar la existencia de fallas y se deben identificar las fallas.
2. Rediseño del control: el controlador debe adaptarse a la situación de falla para que el sistema general continúe satisfaciendo su objetivo (Blanke y col., 2016).

Esta propuesta está concentrada en los sistemas de diagnóstico de fallas basadas en modelo.

1.1. Antecedentes del problema de estudio

Dentro del área industrial se tiene una gran cantidad de procesos que están en constante cambio debido a parámetros o puntos de operación que los rigen y los mantienen en condiciones normales de funcionamiento, pero siempre se van a presentar problemas debido a eventos internos en el sistema, deterioro en sus equipos, cambios en condiciones ambientales o una acción de control incorrecta, los cuales incurrirán en fallas y provocarán errores en un sistema. De esta manera, el desarrollo de sistema de detección y diagnóstico de fallas es una tarea esencial para implementar en los sistemas SCADA desde donde se monitorean constantemente las variables críticas y/o de interés de los procesos industriales. Por ejemplo, en (Carrera y col., 2015) se discute justamente el problema de incorporar en un SCADA un sistema de detección de fugas de agua en tuberías.

Uno de los enfoques propuestos para el desarrollo de sistemas de diagnóstico de fallas son los basados en modelos matemáticos, lo cuales permiten generar un conocimiento o comprensión clara de la forma en la que las fallas se generan en la realidad (Ding, 2013). El uso de los resultados analíticos de la teoría de control puede ser adaptados para generar sistemas de detección de fallas con base más matemática que heurística. El problema de diagnóstico de fallas basado en modelo depende estrictamente del desarrollo del modelo matemático que incluye a los instrumentos sensores y actuadores, así como la dinámica de las variables del proceso, en su funcionamiento nominal, y además de la inclusión en dicho modelo del tipo de las fallas que se están estudiando, sean en el proceso, en los sensores o en los actuadores. Por supuesto, para incluir la aparición de estas las fallas en el modelo matemático es necesario el conocimiento de las modificaciones que estas fallas generan en el modelo del sistema.

Con base en lo mencionado, un ejemplo del desarrollo de sistema de detección de fallas basado en modelo es en sistemas de distribución de aguas, en la cual se tiene claro que la gestión de los recursos hídricos es un desafío clave que será aún más crucial en los próximos años. Desde un punto de vista de la teoría de sistemas, existe la necesidad de desarrollar herramientas de análisis y diseño rigurosas para el control, diagnóstico de fallas y seguridad de las redes de distribución de agua, partiendo de un marco matemático adecuado para el diagnóstico de fallas y la seguridad en sistemas de agua; además de determinar un conjunto adecuado de ubicaciones para la colocación de sensores en redes de distribución de agua potable a gran escala, de manera que se optimice la detección de contaminantes, fugas, bloqueos, entre otros (Eliades y Polycarpou, 2009).

La detección de fugas en las tuberías de transmisión es fundamental para un funcionamiento seguro y ha sido ampliamente estudiada en la comunidad académica. Los sistemas de detección de fugas en tuberías desempeñan un papel fundamental para minimizar la probabilidad de que se produzcan fugas y, por tanto, sus impactos (Eliades y Polycarpou, 2009; Miciolino y col., 2017) . En las tuberías de distribución de suministro de agua urbana se deben monitorear contaminantes como el crecimiento microbiano, la corrosión interna del material de la tubería, entre otros. Además de la pérdida de recursos hídricos, el contaminante puede infiltrarse en el sistema de tuberías, afectando no solo la calidad del agua sino también la suavidad del flujo de la tubería de agua debido a la pérdida de presión y fricciones adicionales que pueden provocar roturas y filtraciones. Por lo tanto, es fundamental que este problema se detecte y repare rápidamente.

Por otro lado, los sistemas públicos de tuberías de agua se extienden a lo largo de miles de kilómetros y comprenden muchas secciones de tubería unidas por juntas, expuestas a cargas superficiales que debilitan las uniones entre las tuberías y juntas. Las fugas de agua se deben a las relaciones de carga entre la red de distribución con las juntas y accesorios: la rotura puede deberse a cargas forzadas en la parte superior, o aberturas causadas por la corrosión. El problema de la fuga de agua de estas tuberías provoca pérdida de agua limpia, pérdida de energía y un aumento notable en la contaminación del agua con compuestos sintéticos y metales peligrosos. Se estima que el 30 % del agua transportada en algunos países se pierde por fuga (Al Qahtani y col., 2020; Perez y col., 2014).

El tratamiento de las fugas ha ido cambiando continuamente desde mediados de la década de 1980, tanto por razones económicas como ambientales, por lo tanto, en las últimas décadas, la investigación en activos hídricos se ha orientado fundamentalmente hacia temas relacionados con el agua subterránea y garantiza el transporte libre de fugas, y existen tecnologías disponibles en el ámbito de la detección de fugas (Eliades y Polycarpou, 2009; Miciolino y col., 2017). El transporte y el tratamiento del agua ha comenzado a desarrollar rápidamente un entusiasmo por los problemas de control de derrames Al Qahtani y col., 2020. Un trabajo relacionado con el diseño de observador directo para la detección y estimación de fugas en tuberías se presenta en (Besançon y col., 2007). Se utiliza una familia de modelos para generar respuestas transitorias, en las que los parámetros de fuga se optimizan comparando las salidas del modelo con los datos de salida almacenados en la tubería. Se observa que la estimación de algunas variables durante los transitorios en un sistema dinámico equivale a un observador de

estado. Entonces, se propone un enfoque de observador de estado para la detección directa en línea y el aislamiento de un número dado de fugas que ocurren a lo largo de una tubería. Más precisamente, la idea es intentar obtener la detectabilidad de las fugas agregando alguna excitación a través de las variables de entrada, para mantener el comportamiento dinámico en modo transitorio y poder detectar y aislar las fugas estimando directamente su magnitud y ubicación, con base en un modelo de orden apropiado (Besançon y col., 2007).

Otras propuestas basadas en observadores de estado para detección de fallos tipo fugas se pueden ver en (Torres y col., 2019) donde se usan tres observadores de orden mínimo, llamados sistemas auxiliares, que se instancian para estimar cierto conjunto de variables del sistema tuberías, cuya dinámica se ajusta a la estructura de los observadores. Una propuesta previa del mismo autor se encuentra en (Verde y Torres, 2015), donde se usan tres observadores completos: uno para solo detectar la dirección de la fuga, y los otros dos para estimar, cada uno, un parámetro de desviación respecto a las condiciones nominales. (Perez y col., 2014) también se presenta una propuesta basada en modelo matemático, que compara las perturbaciones de presión, generadas por una fuga, respecto con la presión teórica esperada. Una matriz de sensibilidad mide, finalmente, la magnitud de la desviación de esta comparación.

En relación a las fugas en los tanques contenedores, este modo de fallo se presenta mas en procesos de la industria química. Las propuestas encontradas en la literatura, tales como (He y col., 2020; Ling y col., 2019) estudian el problema de filtración de un tanque reservorio de líquido inflamable y de un tanque reservorio de agua con geomembranas, respectivamente; si bien estas propuestas usan modelos matemáticos, las mismas no están basadas en observadores de estados.

Finalmente, la detección de fallas en los elementos actuadores y sensores son fundamentales para cerrar lazos de control tolerantes a fallas, por lo que disponer de sistemas de monitoreo que puedan identificar esta situación es fundamental. Los enfoques basados en observadores están reportados desde los años 90 (Wang y Daley, 1996), y más recientemente en (Han y col., 2019). El problema de detección de fallos basado en observadores, no solo en sensores y actuadores, sino conjuntamente con fallas internas del proceso en la industria química, ha sido reportado en (Sotomayor y Odloak, 2005), el cual usa un banco de observadores llamados observadores de entrada desconocida, dedicados a detectar los fallos en el proceso y perturbaciones, o en sensores y actuadores, según el caso de estudio.

En este trabajo de titulación, se propone el diseño de un banco de observadores para un clase de proceso industrial de control de nivel de líquido en tanques contenedores, no solo considerando el proceso con fallas en sensores y actuadores, sino también con fallas debido a cambios de los parámetros del proceso debido a fugas o desconfiguraciones de las válvulas de interconexión, lo cual es caso de sumo interés en el área de supervisión de procesos.

1.2. Importancia y alcances

El desarrollo de aportes en la automatización de procesos industriales está en continuo crecimiento debido a las demandas que obligan a tener un mayor y mejor rendimiento del sistema, que nos ofrezca una excelente calidad en los productos. Por lo tanto, tener sistemas de mayor seguridad y confiabilidad es un requerimiento muy importante.

El problema de detección de fallas es realizado en la gran mayoría de las industrias donde se invierte gran capital de dinero en los diferentes procesos los cuales cuentan con sistemas de control para mantener un correcto funcionamiento de estos. Al momento de presentarse fallas en estos sistemas, los sistemas de control pueden perder su eficacia, las pérdidas de dinero pueden ser muy grandes produciendo deterioros que pueden llegar a convertirse en paros parciales o totales de los procesos, además poniendo en riesgo vidas humanas. En resumen, la eficiencia del sistema controlados disminuida o perdida completamente (Ding, 2013).

Para evitar deterioros en producción o daños en sistemas se deben encontrar las fallas lo más rápido posible, y se deben tomar decisiones que detengan sus efectos sobre el proceso. El uso de observadores de estado con monitoreo de proceso y diagnóstico de fallas es un método basado en la teoría de control que ha recibido gran atención, y que además es una solución en el desarrollo de aplicaciones SCADA para la monitorización de los procesos, apoyando la toma de decisiones para la disminución de pérdidas de capital tanto económico como humano, cómo consecuencia de mantener a un sistema operando con fallas sin ser detectadas.

Por otro lado, el uso de modelos matemáticos en la detección de fallos permite una mejor comprensión de la naturaleza de la falla para los ingenieros de procesos y la forma como esta modifica la dinámica del proceso.

1.3. Delimitación

- a.- Delimitación Espacial: El proyecto va a tener lugar en la Universidad Politécnica Salesiana que se encuentra ubicada Provincia del Azuay cantón Cuenca en la Calle Vieja 12-30 y Elia Liut. Específicamente se refiere al caso de estudio del sistema de control de nivel y detección de fallas del sistema de tanques interconectados del Laboratorio LACTI.



Figura 1.1: Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana

- b.- Delimitación Temporal: El periodo seleccionado para la investigación y desarrollo del proyecto es de un año.
- c.- Delimitación Sectorial e Institucional: La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca es de carácter privada y se localiza en el barrio El Vecino, parroquia El Vecino.

1.4. Objetivo general

- Diseñar filtros de detección de fallos basados en observadores de estado para el sistema de control de nivel del laboratorio LACTI.

1.5. Objetivos específicos

- Establecer el modelo matemático de los elementos sensores y actuadores del sistema de tanques interconectados del laboratorio LACTI.
- Establecer el modelo matemático de la dinámica del sistema de tanques interconectados, en presencia de fallos en el proceso, en los actuadores y los sensores.
- Diseñar diferentes filtros de detección de fallas basados en observadores para el sistema de control de tanques interconectados usando su modelo matemático.
- Implementar un ambiente de pruebas basado en software in the loop para la implementación y validación en tiempo real de los filtros de detección diseñados.

2. Fundamentación teórica

En este capítulo se describen los conceptos básicos necesarios para entender el problema de detección y diagnóstico de fallas, y las condiciones que deben ser satisfechas por los sistemas, si se quiere un sistema de detección satisfactorio.

2.1. Fallas en sistemas de control

Una falla en un sistema dinámico es una desviación de la estructura del sistema o de los parámetros del sistema de la situación nominal. Algunos ejemplos de cambios estructurales son el bloqueo de un actuador, la pérdida de un sensor o la desconexión de un componente del sistema. Todas estas fallas producen desviaciones de las propiedades dinámicas de entrada/salida (E/S) de la planta respecto de las propiedades o comportamientos nominales y, por lo tanto, cambian el rendimiento del sistema de lazo cerrado, lo que resulta en una degradación o incluso una pérdida de la funcionalidad del sistema (Blanke y col., 2016).

Una falla puede aparecer en un sistema en cualquier lugar de éste y en cualquier momento, esa característica es la base para la principal clasificación de las fallas. Las fallas, en general, se clasifican por el lugar dentro del proceso donde se presentan, la disposición temporal con que se presenten y por la forma como son modeladas.

Según el lugar las fallas se pueden presentar como:

- **Fallas de planta:** Todas las fallas que no pueden ser atribuidas a los sensores o actuadores, son referidas a los componentes de la planta. Están marcadas por cambios en los parámetros como masas, velocidad de respuesta, amortiguamiento, resistencias fluidicas, flujos volumétricos de salida no previstos, etc.
- **Fallas de sensor:** Representan mala información de las variables del proceso al controlado, lo que puede producir pérdida de la observabilidad del sistema.
- **Fallas del actuador:** Representan una pérdida parcial o total de la actuación del controlador. En una falla total, el actuador puede tomar un valor fijo indiferente de la señal de entrada a él, perdiendo la controlabilidad por completo.

Según la disposición en el tiempo se pueden presentar como se ilustra en la Figura 2.1, donde t_f y t_{f_i} , $i = 1, 2, 3$ indica el tiempo en el que aparece el fallo:

- **Fallas abruptas (tipo escalón):** Este tipo de falla está asociada con un daño imprevisto en un elemento del sistema, son las más serias dado que pueden llevar a inestabilidad.
- **Fallas incipientes o evolutivas (tipo deriva) :** Por lo general están asociadas al envejecimiento de los elementos. Debido a su naturaleza gradual, son difíciles de detectar.
- **Fallas intermitentes:** Como si nombre lo indica, aparecen y desaparecen de forma intermitente, están asociadas con componentes parcialmente dañados, o fallas en la comunicación (Acuña, 2013).

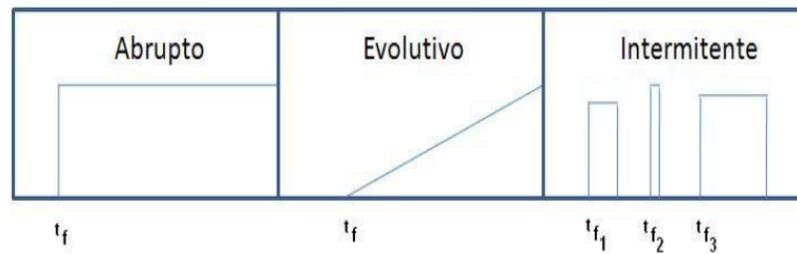


Figura 2.1: Tipos de fallas según la disposición en el tiempo (Villegas Berbesi, 2012).

Según el modelado de las fallas se pueden presentar como se ilustra en la Figura 2.2 :

- **Fallas aditivas:** Son los ocasionados por entradas desconocidas o por perturbaciones que actúan sobre la planta, que normalmente son cero, pero que causan cambios en las salidas de la planta independientemente de las entradas.
- **Fallas multiplicativas:** Son los fallos, repentinos o graduales, de los parámetros de la planta. Representan el deterioro de los equipos, suciedad, pérdida de potencia, etc. También modelan a los fallos en los componentes. Estos defectos estructurales resultan en un cambio en el flujo de información entre varias variables (Villegas Berbesi, 2012).

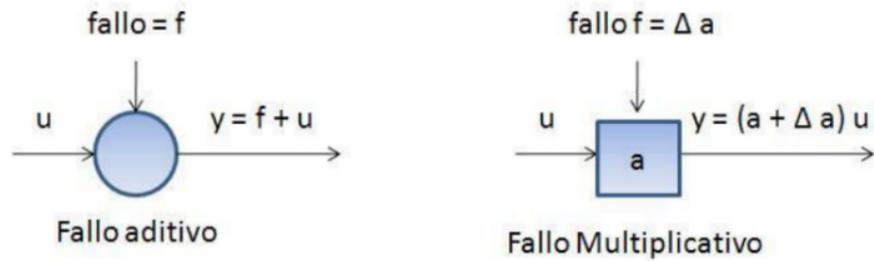


Figura 2.2: Tipos de fallas según su modelado (Villegas Berbesi, 2012).

2.2. Características deseables en un sistema de detección y diagnóstico de fallos

Considerar un conjunto de características deseables en un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallos (SDDF) es útil para comparar los diferentes métodos en términos de información preliminar como confiabilidad de la solución, generalidades, eficiencia de cómputo, etc. Entre las características deseables en un SDDF se mencionan (Villegas Berbesi, 2012):

1. **Rápida detección y diagnóstico:** El SDDF debe responder rápidamente al detectar y diagnosticar averías de los procesos. En particular, un esquema que es diseñado para detectar un fallo y en particular cambios abruptos, debe ser rápidamente sensible a influencias de alta frecuencia.
2. **Aislamiento:** El aislamiento es la habilidad del SDDF para distinguir entre los diferentes fallos. Bajo condiciones ideales, libre de ruido e incertidumbres del modelado, el clasificador de diagnóstico debe ser capaz de generar salidas ortogonales en el espacio de fallos a fallos que no hayan ocurrido. En palabras simples, un fallo que no ha ocurrido no debe afectar los residuales generados por el SDDF.
3. **Robustez:** La robustez es la capacidad del SDDF de ser insensible o invariante ante los errores de modelado, incertidumbres, perturbaciones, ruido y a la vez sensible ante los fallos.
4. **Identificación de novedades:** Los SDDF deben ser capaces de identificar para unas condiciones dadas en un proceso, si está funcionando de manera normal o no. Si está funcionando de manera anormal, debe establecer si la causa es un fallo conocido o un fallo no conocido, es decir, una novedad.

5. **Estimación del error de clasificación:** Para proveer confianza a los usuarios en la fiabilidad del SSDF, se acostumbra a dar con anterioridad una estimación del error de clasificación que pudiera ocurrir. Dicho error se usa para proyectar los niveles de confianza de las decisiones del diagnóstico que da el sistema.
6. **Adaptabilidad:** Los procesos son alterados no tan solo por fallos, sino que cambian y evolucionan por modificaciones en las entradas, cambios estructurales o inclusive ambientales. Los SDDF deben ser adaptables a dichos cambios y deben poderse adaptar a medida que estos nuevos casos se presenten y más información esté disponible.
7. **Facilidad de explicación:** Un SDDF debe suministrar explicaciones de por qué se originó el fallo y como se propagó (Causa-Efecto). El Esquema Detección y Diagnóstico de Fallas debe explicar tanto por qué un supuesto de ocurrencia es seleccionado, como por qué otros no pueden serlo.
8. **Requerimientos de modelado:** Para un desarrollo rápido y fácil de un SDDF en tiempo real, la cantidad de modelado requerido debe ser mínima.
9. **Requerimientos computacionales y de almacenaje:** Las soluciones en tiempo real usualmente requerirán algoritmos e implementaciones que son menos complejas computacionalmente, pero pudieran tener altas necesidades de almacenamiento de datos.
10. **Identificación de múltiples fallos:** La habilidad de identificar múltiples fallos es un importante y difícil requerimiento. La dificultad radica en la naturaleza interactiva de la mayoría de los fallos.

2.3. Propiedades de un sistema sujeto a fallas

Como las fallas pueden causar daños sustanciales a la maquinaria, al medio ambiente y al riesgo para la vida humana, los ingenieros han investigado su apariencia e impactos durante décadas. Se han definido e investigado diferentes nociones como (Blanke y col., 2016):

- **Seguridad (Safety):** Describe la ausencia de peligro, protege un sistema tecnológico de daños permanentes. Usa actuadores dedicados a detener el proceso evaluando las señales críticas, por lo que permite un apagado controlado que lleva el proceso a un estado seguro.

- **Confiabilidad (Reliability):** Es la probabilidad de que un sistema cumpla su función en un periodo específico en condiciones normales. Los estudios de confiabilidad evalúan con qué frecuencia el sistema está defectuoso, pero no dicen nada del estado de falla actual.
- **Disponibilidad (Availability):** Es la probabilidad de que un sistema esté operativo cuando sea necesario. Contrario a la confiabilidad, éste depende de las políticas de mantenimiento que se aplica a los componentes del sistema.
- **Sistema Confiable (Dependable System):** Agrupa las 3 propiedades anteriormente mencionadas seguridad, confiabilidad y disponibilidad. Un sistema confiable es un sistema a prueba de fallas con alta disponibilidad y confiabilidad.

2.4. Nociones fundamentales de la detección y diagnóstico de fallas

Los sistemas FD (detección de fallas o *fault detection* en inglés) son la forma más simple de sistemas de diagnóstico de fallas que activan señales de alarma para indicar la ocurrencia de las fallas. Los sistemas FDI (detección y aislamiento de fallas, o *fault detection and isolation* en inglés) o FDIA (detección, aislamiento y análisis de fallas, o *fault detection, isolation and analysis* en inglés) entregan señales de alarma clasificadas para mostrar qué falla ha ocurrido o datos de tipos definidos proporcionando la información sobre el tipo o la magnitud de la falla ocurrida.

El concepto general de diagnóstico de fallas consiste en las siguientes tres tareas esenciales:

- **Detección de fallas:** detección de la ocurrencia de fallas en las unidades funcionales del proceso, que conducen a un comportamiento no deseado o intolerable de todo el sistema.
- **Aislamiento de fallas:** localización (clasificación) de diferentes fallas.
- **Análisis o identificación de fallas:** determinación del tipo, magnitud y causa de la falla (Ding, 2013).

2.4.1. Diagnóstico basado en consistencia

El diagnóstico basado en la consistencia se refiere a la comparación del par de entrada/salida (E/S) medido con un modelo de planta. El principio del diagnóstico basado en

la consistencia es probar si la medición (U, Y) es o no consistente con el comportamiento del sistema. Si se verifica el par E/S con respecto al comportamiento nominal del sistema, entonces el sistema está libre de falla. Esto se ilustra en la Figura 2.3 donde el punto $A = (U, Y_A)$ denota una secuencia en el espacio B_0 de funcionamiento nominal. Por el contrario, el punto $B = (U, Y_B)$ está definido en la intersección del espacio B_0 y el espacio B_f de falla, por lo que no sería posible la detección de la falla, y el sistema se dice no detectable. Por otro lado, si el par E/S es consistente con el comportamiento B_f del sistema sujeto a la falla f , la falla f puede estar presente en el sistema, en este caso, f se llama candidato a fallo.

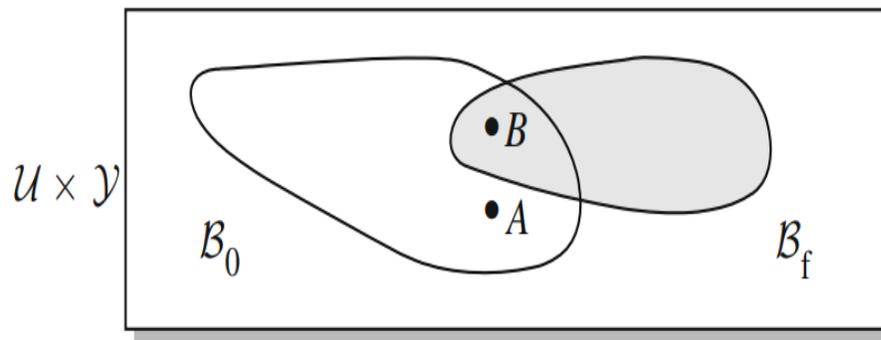


Figura 2.3: Partición del espacio nominal y de falla (Blanke y col., 2016)

Para dar otros ejemplos sobre el problema de detección y diagnóstico de fallas, suponga que el comportamiento del sistema es conocido por las fallas f_0, f_1 y f_2 , definidos sobre los espacios B_0, B_1 y B_2 como muestra la Figura 2.4; normalmente la "falla" f_0 denota el comportamiento nominal. Los comportamientos correspondientes B_0, B_1 y B_2 son diferentes, pero podrían superponerse, y existen pares de E/S que pueden ocurrir para más de una falla. Si el par de E/S está representado por los puntos A, C o D en la Figura 2.4, las fallas encontradas son f_0, f_1 o f_2 , respectivamente. Sin embargo, si las secuencias de medición están representadas por el punto B, el sistema puede estar sujeto a una de las fallas f_0 o f_1 , y el sistema se dice no diagnosticable (Blanke y col., 2016).

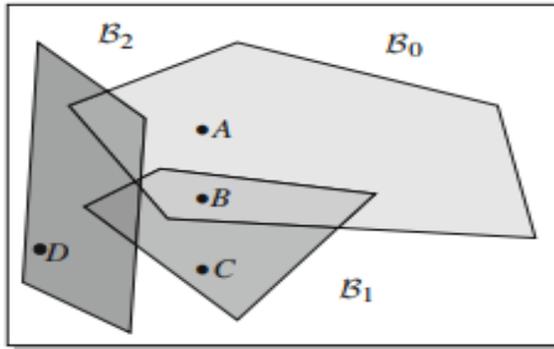


Figura 2.4: Comportamiento del sistema sin falla y defectuoso (Blanke y col., 2016)

Se deben mencionar varias consecuencias directas de este principio de diagnóstico basado en consistencia :

- La detección de fallas es posible sin ninguna información sobre el comportamiento de la planta defectuosa. Los algoritmos de detección de fallas utilizan solo un modelo de la planta nominal.
- Sin información sobre las fallas y sobre la forma en que las fallas afectan el sistema, no es posible identificarlas ni aislarlas.
- Con una configuración de medición dada, no se pueden distinguir todas las fallas (Blanke y col., 2016).

2.4.2. Diagnóstico de sistemas de variables continuas

Los sistemas de variables continuas son sistemas cuyas señales son continuas en el dominio del tiempo, los cuales se pueden representar por ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia o un modelo dinámico de las mismas que describen un conjunto de variables de estado $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$. Estas variables son las que determinan el comportamiento futuro de un sistema cuando se conocen las condiciones iniciales de los estados $[x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0)]$ y las señales de excitación como se ilustra en la Figura 2.5.

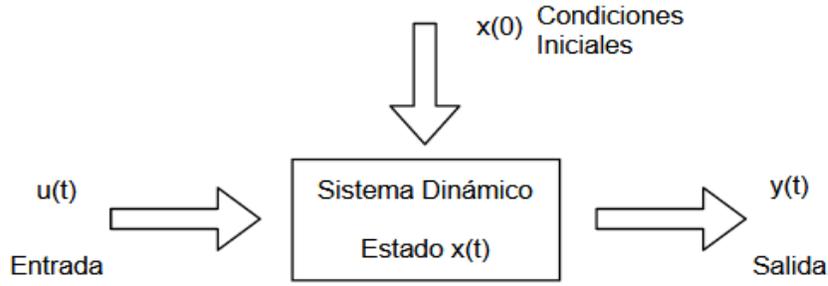


Figura 2.5: Sistema dinámico continuo (Blanke y col., 2016)

Por lo cual, la ecuación de la representación del estado que incorpora ecuaciones de primer orden se describe de manera general en el modelo dinámico de la Ecuación (1):

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad y(t) = g(x(t), u(t)) \quad (1)$$

donde $x(t)$ representan los estados, $y(t)$ es el vector de salida, $u(t)$ es el vector de entradas, $f(\cdot)$ y $g(\cdot)$ pueden ser funciones lineales o no lineales. Si f y g son lineales, entonces se admite una representación según la Ecuación (2):

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad y = Cx(t) + Du(t) \quad (2)$$

Para un sistema no lineal, se puede realizar una aproximación lineal utilizando series de Taylor alrededor de un punto de operación (X, U, Y) para los estados, entradas y salidas, a través de matrices Jacobianas A , B , C y D , obteniendo su representación lineal según la Ecuación (3):

$$\begin{aligned} \dot{x}_d(t) &= Ax_d(t) + Bu_d(t); & x_d(t_0) &= x_{0d} \\ y_d(t) &= Cx_d(t) + Du_d(t) \end{aligned} \quad (3)$$

donde $x_d(t)$ son los estados perturbados, $u_d(t)$ $y_d(t)$ son la entrada y salida perturbada, respectivamente, y se cumple que $x(t) = X + x_d(t)$, $u(t) = U + u_d(t)$, $y(t) = Y + y_d(t)$.

La representación entrada salida del sistema lineal en el dominio de la frecuencia está asociada a una función de transferencia, $G(s)$, tal que $Y(s)=G(s)U(s)$ donde $U(s)$ es la transformada de Laplace de la señal de entrada y $Y(s)$ es la transformada de Laplace de la señal de salida, sin embargo esa representación no la usaremos en este trabajo.

El principio del diagnóstico de fallas basado en modelo usa dicho modelo para determinar mediante una entrada U dada, la secuencia de salida Y y, por consiguiente, verificar en cada instante de tiempo t la consistencia del sistema con el modelo mediante la relación llamada residual $r(t)$ definida por la Ecuación (4):

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (4)$$

lo cual no es otra cosa que el principio de diagnóstico basado en consistencia, como se ilustra en la Figura 2.6. Esta diferencia recibe el nombre de residuo y contiene la información sobre el funcionamiento del sistema. En ausencia de fallas el residuo debe ser cero o tender a éste y cualquier otro valor, en caso contrario (Blanke y col., 2016).

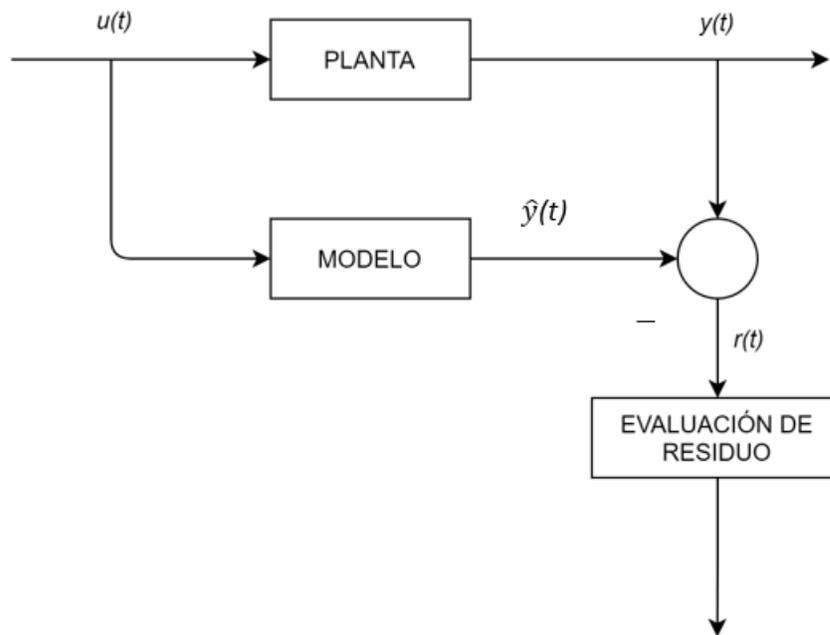


Figura 2.6: Diagnóstico de sistemas de variables continuas (Blanke y col., 2016)

El algoritmo de diagnóstico consta de dos pasos:

1. **Generación residual:** el modelo y el par de E/S se utilizan para determinar los residuos, que describen el grado de consistencia entre la planta y el comportamiento del modelo.
2. **Evaluación residual:** los residuos se evalúan para detectar, aislar e identificar fallas.

En este último se aísla e identifica la falla mediante la información contenida en los residuos. La evaluación proporciona información sobre el tiempo en el que ocurrió la falla y sobre el elemento en el cual esta falla está actuando. En este paso se necesita una función de evaluación de residuos, así como un valor de umbral. La evaluación requiere determinar si los residuos sobrepasan el valor de umbral determinado. Este valor es necesario para evitar falsas alarmas debido a condiciones iniciales, pequeñas perturbaciones o dinámicas no modeladas. Generalmente la evaluación se realiza obteniendo una medida del residuo, estadística o determinista. La primera esta basada en cálculo de desviación estándar, varianza, media, etc., mientras que los segundos son basados en la noción de distancia definida en los espacios vectoriales, tales como normas, siendo las más utilizadas la norma 2 o euclidiana y la norma infinita (N_2 y N_∞) (Cerrada y col., 2011).

2.4.3. Métodos de generación de residuos.

En la literatura existen tres grandes grupos de técnicas para la generación de los residuos como se ilustra en la Figura 2.7. En vista de que para hacer control tolerante a fallas se necesita llegar al nivel más profundo de las etapas de diagnóstico que se corresponde con la estimación de la magnitud del fallo, las técnicas de diagnóstico basadas en modelos (MBD) son las más utilizadas, ya que proporcionan de forma natural herramientas para realizar dicha estimación (Cerrada y col., 2011).

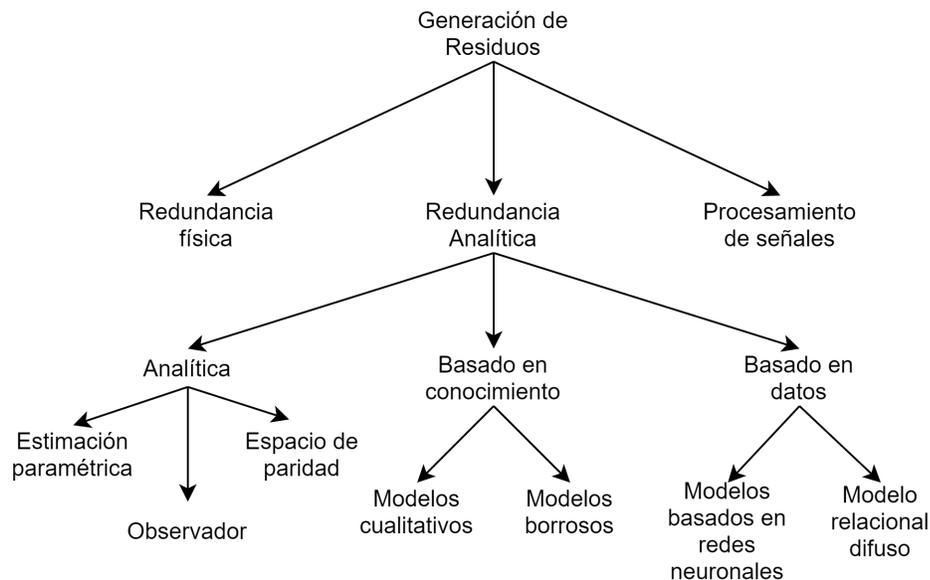


Figura 2.7: Clasificación de los métodos de generación de residuos (Cerrada y col., 2011)

A continuación se reseñan brevemente los procedimientos basados en redundancia analítica, los cuales se pueden dividir en los que están basados en el modelo matemático y los que se basan en un modelo no obtenido a partir de las leyes de la física, sino a partir de procedimientos comúnmente utilizados en inteligencia artificial (Cerrada y col., 2011):

- **Espacio de paridad:** El espacio de paridad consiste en formar ecuaciones a partir del modelo del sistema, las cuales tienen que cumplirse si el funcionamiento nominal del sistema no se ve afectado por alguna falla. Existen tres versiones del espacio de paridad. La primera basada en una representación interna del sistema, en lo que se conoce como variables de estado. La segunda está basada en la misma idea, pero utilizando la representación externa del sistema. La tercera variante considera sistemas continuos y retrasos en las mediciones de la salida del sistema. La implementación de este algoritmo requiere del conocimiento matemático del sistema, así como de las mediciones de salida y entrada.
- **Filtro detector de fallas basado en observadores:** En el filtro detector además de tener un modelo matemático, el cual es capaz de predecir el valor de las salidas del sistema en caso de que no hubiera fallas presentes, se cuenta con términos de corrección o ganancias ajustables. El filtro más simple es el Observador de Luengenger, el cual ajusta un vector de ganancia L para lograr la detección de fallas. Si se requiere localizarla es necesario generar más información. Esta información se obtiene construyendo residuos con sensibilidad a una determinada falla. El análisis de todos los residuos proporciona la información deseada. Este es el procedimiento usado en este trabajo.
- **Estimación paramétrica:** En el caso de estimación paramétrica, los parámetros nominales (sin falla) de un sistema son comparados con los estimados actuales. Si hay diferencia entre los parámetros se concluye que existe una falla. Note que en este caso la localización puede llevarse a cabo de manera directa. Una de las desventajas más grandes de este método es que requiere que la señal de entrada del sistema sea rica en frecuencia, para poder permitir la estimación de los parámetros. Este es un requisito que frecuentemente hace a este procedimiento no operable.
- **Métodos basados en redes neuronales:** La idea básica consiste en encontrar un modelo del sistema, el cual está basado en redes neuronales. El modelo del sistema se obtiene cambiando la ponderación de las entradas de cada red hasta que el comportamiento de la red sea semejante al del sistema.

- **Métodos basados en lógica difusa:** La aplicación de lógica difusa en la detección de fallas consiste en obtener un modelo difuso del sistema y aplicar las mismas ideas que en el espacio de paridad.
- **Métodos basados en modelos cualitativos:** Aquí se revisa el comportamiento del proceso que se considera normal, y se obtiene un modelo cualitativo el cual es obtenido a través de un sistema experto o cualquier técnica de inteligencia artificial. Estos métodos se utilizan frecuentemente cuando la información disponible sobre el sistema se encuentra principalmente en forma de experiencia y no se cuenta con modelos matemáticos precisos.

2.5. Filtros de detección y diagnóstico de fallas basados en observadores de estado

Un dispositivo (o programa de computadora) que estima u observa las variables de estado se llama *observador de estado*, o simplemente observador. La estimación de las variables de estado que no están disponibles a través de mediciones de sensores para su retroalimentación, por lo general, se denomina observación. Si el observador de estado capta todas las variables de estado del sistema, sin importar si algunas están disponibles para su medición directa, se denomina observador de estado de orden completo (solamente los observadores de orden completo serán considerados en este trabajo). Hay ocasiones en las que un observador tal no es necesario, en las que sólo se requiere de la observación de las variables de estado que no se miden, pero no de aquellas que se miden directamente. Por ejemplo, dado que las variables de salida son observables y se relacionan en forma lineal con las variables de estado, no necesitamos observar todas las variables de estado, sino sólo las $n - m$ variables de estado en las que n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión del vector de salida.

Un observador que estima menos de n variables de estado se denomina observador de estado de orden reducido o, simplemente, un observador de orden reducido. Si el observador de estado de orden reducido es el orden mínimo posible, se denomina observador de estado de orden mínimo u observador de orden mínimo.

2.5.1. Filtro de detección basado en el observador de Luenberger

Para un sistema lineal dinámico modelado como en las Ecuaciones (2) o (3) donde, sin pérdida de generalidad, no se considera la existencia de la matriz D , el observador de Luenberger de orden completo es un subsistema para reconstruir el vector de estado mediante el modelo de las Ecuaciones (5) (Ogata, 2010):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - C\hat{x}(t)] \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (5)$$

donde $\hat{x}(t)$ es el estado estimado y $\hat{y}(t)$ es la salida estimada. Las entradas al observador son la salida medida $y(t)$, la salida estimada $\hat{y}(t)$ y la entrada de control $u(t)$. La matriz L , que se llama matriz de ganancia del observador, es una matriz de ponderación al término de corrección que involucra la diferencia entre la salida medida $y(t)$ la salida estimada $\hat{y}(t)$.

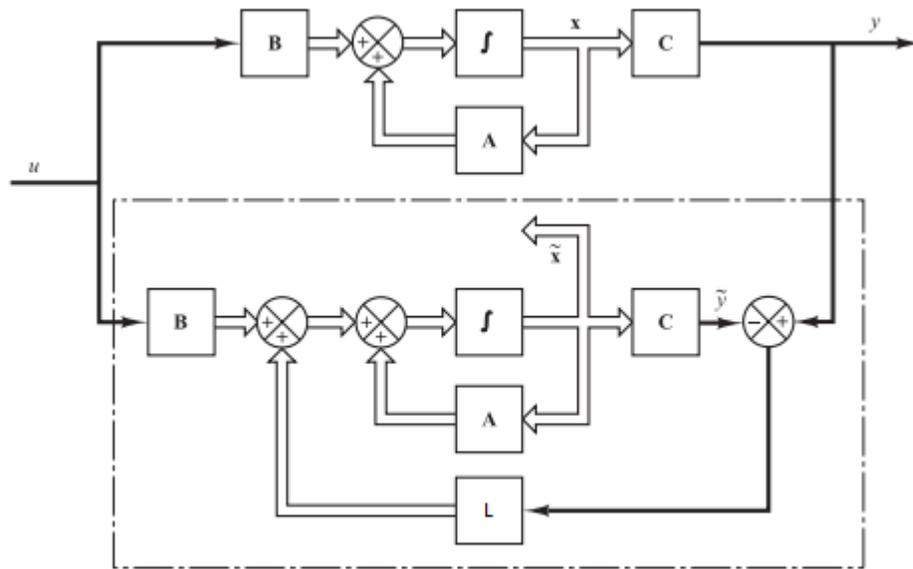


Figura 2.8: Observador de estado de orden completo [7].

A partir de la estructura básica de un observador de estados, se proponen extensiones a este observador, para diseñar diferentes enfoques de filtros de detección y diagnóstico de fallos para la generación de residuales apropiados. Dichas extensiones serán el objeto principal de estudio de este trabajo de titulación .

El filtro de detección de fallas (FDF) basado en el observador de Luenberger es el primer tipo de generadores de residuales basados en observadores propuesto por Beard y Jones a

principios de la década de 1970s. El núcleo de un FDF es un observador de estado de orden completo de las Ecuaciones (6) donde se ha considerado la matriz D del modelo lineal (Ding, 2013):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x} - Du) \\ \hat{y} &= C\hat{x} + Du\end{aligned}\tag{6}$$

que es construido sobre la base del sistema de modelo nominal (2) o (3). El residual $r(t)$ se define como:

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) = y - C\hat{x} - Du\tag{7}$$

Introduciendo la variable de estimación de estado $e = x - \hat{x}$, y obteniendo la derivada de la Ecuación (7), usando la Ecuación (2) y la Ecuación (6), tenemos las Ecuaciones (8) generadores de residuales:

$$\dot{e} = (A - LC)e, \quad r = Ce\tag{8}$$

Es evidente que $r(t)$ tiene los rasgos característicos de un residual cuando la matriz de ganancia del observador L se elige de manera que $A - LC$ sea estable. En este caso, \hat{x} también proporciona una estimación insesgada de x , es decir,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) - \hat{x}(t)) = 0\tag{9}$$

El uso del observador de estados es basado en la suposición que $G_{yu}(s)$ tiene la realización de espacio de estados (A, B, C, D) , esto significa que solo se tienen en cuenta las partes observables y controlables del proceso.

Una señal residual es entendida como un indicador de posibles fallas. Usando la salida del observador dado en la Ecuación (6), se puede generar un residual por comparación:

$$r(s) = y(s) - \hat{y}(s)\tag{10}$$

El rasgo característico más importante de un residual en ausencia de fallas es:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} r(t) = 0 \text{ para todo } u(t), \quad x(0) \text{ y } y(0) \neq 0\tag{11}$$

En caso de la existencia de una falla, entonces $r(t) \neq 0$ y se logra la detección de la falla. El núcleo de un OD es un observador de tipo Luenberger (salida) descrito por las Ecuaciones

(12) (Ding, 2013):

2.5.2. Observador de diagnóstico

El observador de diagnóstico (OD) es, gracias a su estructura flexible y similitud con el observador de tipo Luenberger, una de las formas generadoras de residuos basadas en modelos más investigadas. A continuación se detalla la construcción de generadores de residuos de diagnóstico basados en observadores (Ding, 2013).

El núcleo de un OD es un observador de tipo Luenberger (salida) descrito por las Ecuaciones (12):

$$\dot{z} = Gz + Hu + Ly, \quad \hat{y} = \bar{W}z + \bar{V}y + \bar{Q}u \quad (12)$$

donde $z \in R^s$, s denota el orden del observador y puede ser igual o menor o mayor que el orden del sistema n . Suponga que $G_{yu}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$, esto es, el sistema lineal es controlable y observable. Entonces, las matrices $G, H, L, \bar{Q}, \bar{V}$ y \bar{W} del OD en las Ecuaciones (12) junto con una matriz $T \in R^{s \times n}$ deben satisfacer las llamadas condiciones de Luenberger:

$$I. G \text{ es estable} \quad (13)$$

$$II. TA - GT = LC, \quad H = TB - LD \quad (14)$$

$$III. C = \bar{W}T + \bar{V}C, \quad \bar{Q} = D - \bar{V}D \quad (15)$$

bajo el cual el sistema (12) entrega una estimación insesgada para $y(t)$, es decir,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - \hat{y}(t)) = 0. \quad (16)$$

Su aplicación en la generación de residuales se describe a continuación, para más detalles revisar. Consideramos un sistema dinámico con $e = Tx - z$ como su vector de estado, y $y - \hat{y}$ como su salida. Resulta, según las condiciones en (13) - (14),

$$\dot{e} = Ge, \quad y - \hat{y} = \bar{W}e \quad (17)$$

que asegura la condición (16). Con base en (17), se puede reescribir el residual $r(t)$ como la Ecuación (18):

$$r = V^*(y - \hat{y}), \quad V^* \neq 0 \quad (18)$$

el cual construye un vector residual cuya dinamica es descrita por las Ecuaciones (19) y (20):

$$\dot{z} = Gz + Hu + Ly \quad (19)$$

$$r = V^*y - V^* \bar{W}z - V^* \bar{V}y - V^* \bar{Q}u = Vy - Wz - Qu \quad (20)$$

donde

$$V = V^* (I - \bar{V}), \quad W = V^* \bar{W}, \quad Q = V^* \bar{Q} \quad (21)$$

Por lo tanto, para la condición de diseño del generador residual *III* dada por (15), esta debe reemplazarse por la condición (22):

$$III.VC - WT = 0, \quad Q = VD \quad (22)$$

Las Ecuaciones (19) y (20) definen un esquema de diseño de generadores residuales que se pueden formular como un observador y un posfiltro, como muestra la Figura 2.9. Entonces el problema en la búsqueda de una matriz de ganancia del observador y un posfiltro. Por lo tanto, es de interés práctico y teórico revelar las relaciones entre las matrices G , L , T , V y W resolviendo las Ecuaciones de Luenberger (13), (14), (22).

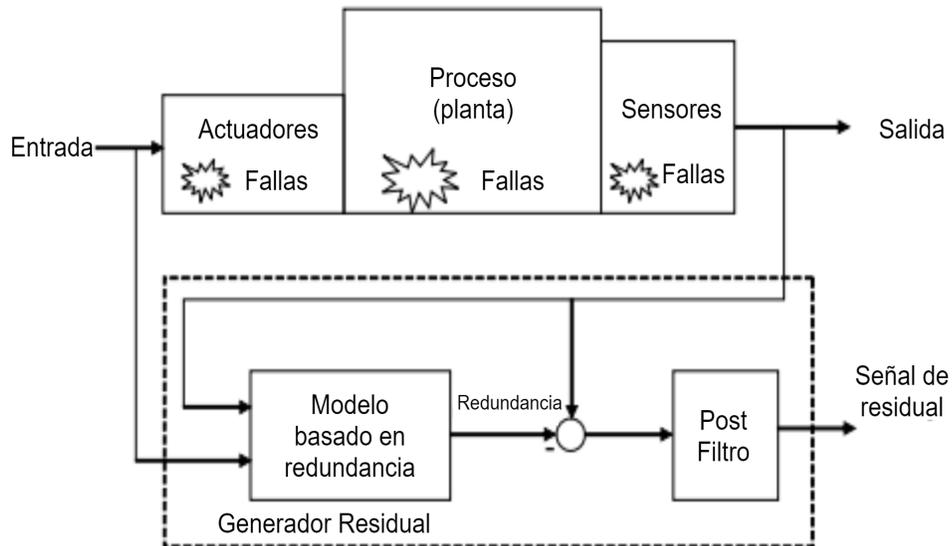


Figura 2.9: Esquema de generación de residuales de un OD (Ding, 2013)

Una comparación con el esquema FDF deja claro que

- El esquema del observador de diagnóstico puede conducir a un generador residual de orden reducido, que es deseable y útil para la implementación en línea.
- Tenemos un mayor grado de libertad de diseño pero, por otro lado.
- Diseño más complicado.

Habiendo demostrado la importancia de las Ecuaciones de Luenberger (13) - (14), (22) en el diseño de observadores de diagnóstico, concentramos nuestra atención en lo siguiente en sus soluciones (Ding, 2013).

2.5.3. Algoritmo de aproximación algebraica para la solución de las condiciones de Luenberger

La solución de las matrices que satisfacen las condiciones de Luenberger se establecen en el siguiente Teorema, cuya prueba se desarrolla en (Ding, 2013).

Teorema. Dado el modelo de sistema $G_{yu}(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ y $s \geq \sigma_{min}$, donde σ_{min} es el mínimo índice de observabilidad del sistema, entonces las matrices L, T, V, W definidas por:

$$L = -c(G)X, \quad T = YJ \quad (23)$$

$$V = WTC^T(CC^T)^{-1}, \quad WTC_N^T = 0 \quad (24)$$

satisfacen las condiciones de Luenberger, donde la matriz G debe ser escogida estable, $X \in R^{s \times m}$ es una matrix arbitraria, donde m es el número de salidas del sistema. Además, se tiene que:

$$C_N \in R^{(n-m) \times n} \text{ y } \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ C_N \end{bmatrix} = n, \quad CC_N^T = 0 \quad (25)$$

$$Y = [X \quad GX \quad \dots \quad G^{n-1}X] \quad (26)$$

$$\begin{aligned} c(s) &= \det(sI - A) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0 \\ c(G) &= a_n G^n + a_{n-1} G^{n-1} + \dots + a_1 G + a_0 I \end{aligned} \quad (27)$$

$$J = \begin{bmatrix} a_n CA^{n-1} + a_{n-1} CA^{n-2} + \dots + a_2 CA + a_1 C \\ a_n CA^{n-2} + a_{n-1} CA^{n-3} + \dots + a_2 C \\ \vdots \\ a_n C \end{bmatrix} \quad (28)$$

Dado lo expuesto previamente, se establece el algoritmo de solución de las Ecuaciones de Luenberger (Ding, 2013)

- **Paso 1:** Establecer las matrices X y G .
- **Paso 2:** Calcule $c(s) = \det(sI - A)$ para a_0, a_1, \dots, a_n .
- **Paso 3:** Calcule las matrices L, T según las Ecuaciones (23).
- **Paso 4:** Resolver $WTC_N^T = 0$ para W .
- **Paso 5:** Establezca V de acuerdo a las Ecuaciones (24)

2.6. Modelado de sistemas sujeto a fallas

Considerando fallas en los sensores y actuadores, el modelo del sistema que incluye las fallas tiene la forma de la Ecuación (29):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + E_f f. \\ y &= Cx + F_f f \end{aligned} \quad (29)$$

donde E_f y F_f denotan matrices definidas en el espacio $R^{n \times nf}$ y $R^{m \times nf}$, $f \in R^{nf}$ es el vector de fallas en sensores y actuadores, n y m es el número de estados y salidas del sistema.

Para ilustración el uso de este modelo, se presenta el siguiente ejemplo que corresponde al modelo de una turbina de aire (Paluszek y Thomas, 2015). Según la Figura 2.10, el sistema tiene un sensor de presión y un tacómetro, además tiene una válvula reguladora de presión, que es el actuador en el sistema, para regular la presión de entrada desde un suplidor de de aire a presión constante.

El sistema tiene el modelo en espacio de estados de la Ecuación (30):

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_t} & 0 \\ \frac{K_t}{\tau_t} & \frac{-1}{\tau_t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_p}{\tau_p} \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (30)$$

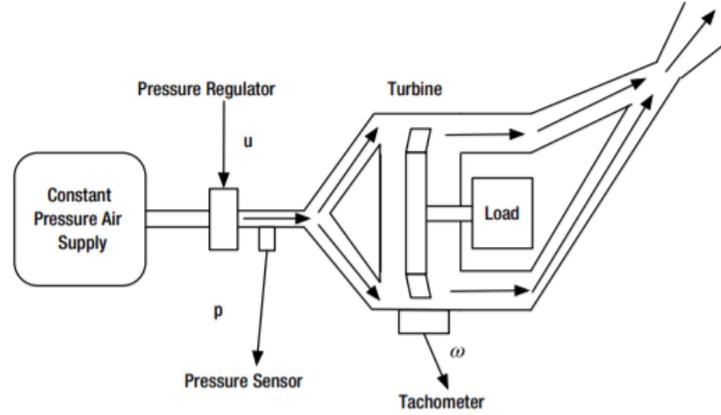


Figura 2.10: Turbina de aire (Paluszek y Thomas, 2015)

donde p es la presión, w es la velocidad, las salidas son la presión y la velocidad, por ello la matriz $C = I$

En el modelo de ejemplo se introducirá una falla en el actuador y una falla en el sensor de velocidad, por lo que las matrices E_f y F_f se definen como en (31):

$$E_f = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad F_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Por lo que considerando el desarrollo de la ecuación diferencial para el error de estimación, de acuerdo a lo explicado en la sección 2.5.1, podemos ver que:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu + E_f f - (A\hat{x} + Bu + L(Cx + F_f f + Du - C\hat{x} - Du))$$

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ax + Bu + E_f f - LC(x - \hat{x}) - F f$$

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = (A - LC)(x - \hat{x}) + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} f \quad (32)$$

Notese que cuando la falla en el actuador ocurre, solamente el residual 1 se ve afectado, y en caso de la falla en el sensor de velocidad solo el residual 2 sufre cambios.

Entonces, $A - LC$ debería ser diseñado para tener una matriz estable y diagonal.

$$(A - LC) = \begin{bmatrix} a_{11} - l_{11} & -l_{12} \\ a_{21} - l_{21} & a_{22} - l_{22} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Con el fin de obtener una matriz estable y diagonal $l_{12} = 0, a_{21} - l_{21} = 0, a_{11} - l_{11} = p_1, a_{22} - l_{22} = p_2$ para ello p_1 y p_2 deben ser polos estables.

2.7. Simulación software in the loop (SIL) e implementación en tiempo real

Durante el proceso de desarrollo de sistemas complejos, Software-In-The-Loop (SIL) es una metodología común para pruebas de componentes repetibles y controlables. Este tipo de simulación no requiere prototipos de sistemas físicos, por lo que admite la validación temprana y evita daños en los prototipos de sistemas reales(Pieper y Obermaisser, 2018).

SIL es un enfoque ampliamente utilizado para validar la interacción de un algoritmo de control de software con el modelo de una planta simulada. Esta técnica permite la verificación del sistema durante la fase de diseño teniendo en cuenta los efectos secundarios tecnológicos. SIL además permite el análisis del comportamiento del sistema en caso de fallas. En varios ámbitos, SIL ya se utiliza para la creación rápida de prototipos de sistemas de control, así como dispositivos electrónicos y mecatrónicos. Se pueden encontrar ejemplos en el ámbito automotor, aeronáutico, entre otros(Pieper y Obermaisser, 2018).

Uno de los enfoques de solución es usa un simulador lo bastante potente como para poder simular en él, en tiempo real, tanto la planta como el controlador, ver Figura 2.11. Aquí surge la ventaja de que el simulador no tiene que enviar señales de entrada o de salida hacia los dispositivos externos, ya que el controlador y la planta funcionan en el mismo simulador, con lo que se consigue preservar la integridad de la señal. Con este tipo de simulaciones desaparece el problema que surgía al tener una simulación acelerada o retardada, así como el problema con los overrun al no tener que enviar o recibir señales. De esta manera la simulación puede ser más rápida o más lenta que el tiempo real, sin tener ninguna repercusión en la validez de los resultados obtenidos (Fernández Vela, 2017).



Figura 2.11: Simulación SIL (Fernández Vela, 2017)

A diferencia de la simulación HIL que está más enfocada a las tareas de desarrollo, pruebas y validación de componentes hardware (Santana Cruz, 2017), la técnica de simulación SIL está orientada a las tareas de desarrollo de software. La técnica de simulación Software in the Loop ha surgido como un enfoque alternativo a las pruebas de software embebido. Básicamente consiste en la interacción de un código fuente compilado con la simulación de un modelo matemático, proporcionando así un entorno práctico y virtual de simulación para el desarrollo y prueba de estrategias de control detalladas para sistemas grandes y complejos.

El empleo de SIL como técnica de simulación facilita mucho el trabajo de desarrollo de software de control, ya que permite al desarrollador tener la posibilidad de probar y modificar de forma directa e iterativa el código fuente. Con esta técnica de simulación es posible probar la parte software de un sistema antes de la inicialización de la fase de prototipado hardware, lo que contribuye a disminuir considerablemente los tiempos y los costes de desarrollo (Santana Cruz, 2017).

Los ambientes de pruebas mas actuales de SIL pueden abarcar soluciones de implementación basadas en PC y simulación basada en la nube (*cloud-based simulation*). Actualmente se ha difundido el uso del protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, MQTT), el cual es un protocolo de conectividad de IoT.

El protocolo MQTT se usa en aplicaciones con miles de sensores, incluyendo el monitoreo de consumo de energía y de oleoductos. El protocolo MQTT es eficiente en términos de ancho de banda, batería y recursos. MQTT tiene una arquitectura de publicación/suscripción la cual se observa en la Figura 2.12, donde el sistema tiene de tres componentes principales:

editores, suscriptores y un agente intermediario. Desde el punto de vista de Iot, el editor seria el sensor de temperatura que conecta al agente intermediario, por lo general toma el nombre de MQTT Broker para enviar datos. Adicionalmete el celular llamado cliente Mqtt es el interesado en receptor datos especificos, por lo que se conectan con agentes intermediarios para informarse cada vez que reciben datos nuevos. Los datos sensoriales los clasifican en temas llamados topicos y los envian hacia los suscriptores interesados (Muñoz, 2019).

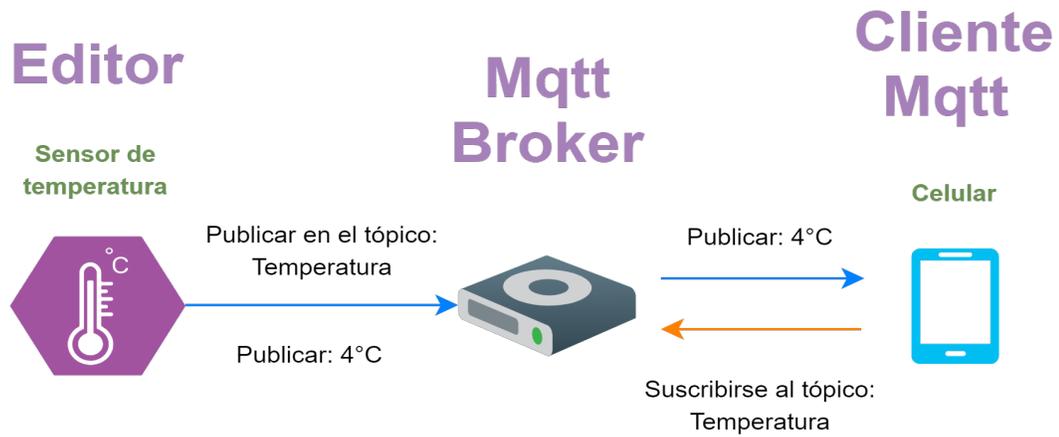


Figura 2.12: Arquitectura MQTT

3. Marco Metodológico

En este capítulo se explicará, paso a paso, el procedimiento para el diseño e implementación del conjunto de filtros de detección y diagnóstico de fallas para el caso de estudio del sistema de tanques interconectados. La información se encuentra distribuida en varias secciones, cada una constituye un paso específico de la metodología seguida.

3.1. Descripción del proceso sistema de tanques interconectados

El proceso bajo estudio corresponde a un sistema de tanques interconectados, el cual puede representar una parte de un sistema de distribución de aguas, compuesto por tanques de almacenamiento, válvulas de entrada, salida y de interconexión, en el cual pueden ocurrir diferentes fallas tanto internas (o estructurales), como en los sensores y actuadores. Un prototipo de este caso de estudio es el sistema de tanques interconectados del laboratorio LACTI de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, ver Figura 3.1, donde se asume que se tienen sensores para medir el nivel de líquido de cada tanque, la cual ha sido configurada para representar el caso de estudio. En la Figura 3.2 se observa el diagrama P&ID de la planta A del laboratorio LACTI, en la cual ha sido resaltado el circuito de flujo y posición las válvulas que permiten la alimentación e interconexión de los dos tanques del proceso.



Figura 3.1: Planta de Procesos A del laboratorio LACTI de la UPS Sede Cuenca

El proceso comienza con el suministro de flujo de agua hacia el tanque 1 por medio de la válvula proporcional FICV A4-1 que nos entrega un flujo de ingreso de $0.0074 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual se obtiene mediante el procedimiento realizado en la Sección 3.2.1. Posteriormente para

la interconexión con el tanque 2 se lo realiza a través de la válvula de asiento inclinado NV VA-2 que extrae el líquido desde el tanque 1. Finalmente, el agua fluye por la válvula NV VA-3, que es el desfogue del tanque 2 hacia el reservorio para poder tener una recirculación de fluido en el sistema.

Para la representación de las fallas relacionadas con filtraciones (roturas) en los tanques, se van a utilizar 2 válvulas de esfera las cuales son HV UA-2 y HVT VA-2 para el tanque 1 y 2 respectivamente. Estas válvulas, al igual que la válvula de desfogue del tanque 2, están conectadas hacia el reservorio. El tanque 2 del laboratorio LACTI es cerrado eso quiere decir que es un tanque a presión y para nuestro análisis se va a tomar la consideración de que ambos tanques están a presión atmosférica para lo cual la válvula HV VA-07 del tanque 2 la vamos a considerar abierta para que ambos tanques se encuentren en igualdad de condiciones (tanques abiertos).

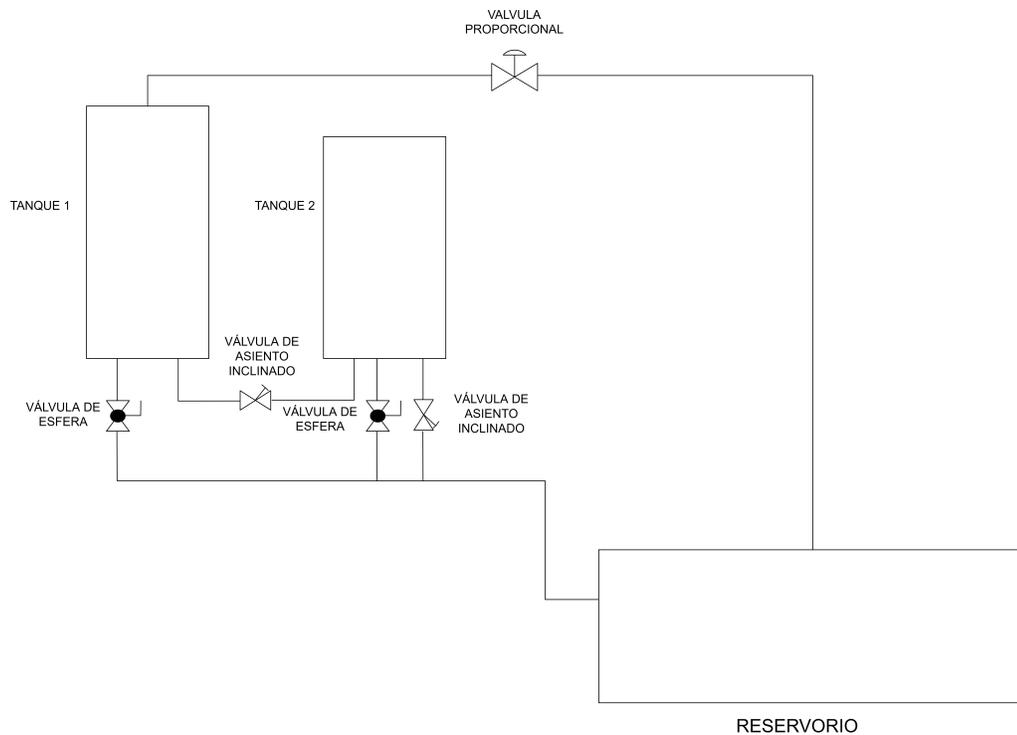


Figura 3.2: Diagrama P&ID Planta A de procesos Laboratorio LACTI (Fernández Vela, 2017)

3.2. Modelado del sistema nominal e identificación de parámetros

En general, este tipo de sistemas es modelado mediante ecuaciones diferenciales. Para el caso en estudio, se tienen dos ecuaciones diferenciales de primer orden que describen la dinámica del proceso. Para comprender el desarrollo del modelo, se representa el sistema según la Figura 3.3, donde se indican las variables h_1 y h_2 correspondientes a las alturas del fluido (en este caso es agua) dentro de cada tanque, y los flujos q_i , q_{12} y q_2 de entrada, interconexión entre los tanques y salida del tanque 2, respectivamente.

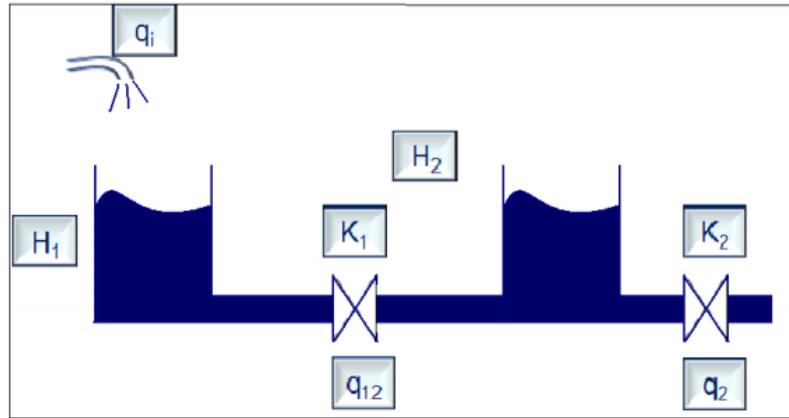


Figura 3.3: Modelado del Sistema (Cerrada y col., 2011)

Las ecuaciones dinámicas de sistema de tanques interconectados son las siguientes descritas por las Ecuaciones (34) y (35) :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{C_1}q_i - \frac{1}{C_1}q_{12} \quad (34)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{C_2}q_{12} - \frac{1}{C_2}q_2 \quad (35)$$

donde C_1 es el área de la sección transversal del tanque 1 y C_2 es el área de la sección transversal del tanque 2, en m^2 .

Los flujos están modelados de la siguiente manera:

$$q = C_{v,max} * f(x) * \sqrt{\frac{\Delta_p}{G_f}} \quad (36)$$

Donde:

- G_f que es la gravedad específica del agua tiene un valor de 1, es adimensional.
- Δ_p es la diferencia de presión a través de la válvula, en *psi*.
- $f(x)$ es una función de la curva característica de la válvula que relaciona a la apertura de la válvula para nuestro estudio esa función será lineal, donde 0 significa que esta completamente cerrada y 1 completamente abierta.
- C_v es el coeficiente de la válvula en $\frac{gpm}{\sqrt{psi}}$, C_v es numéricamente igual al número de galones (U.S.) de agua a 15,5 °C (60 °F) que fluirán a través de la válvula en un minuto cuando la diferencia de presión a través de la válvula es de 1 *psi*.

Sabiendo que la presión de fondo de un tanque es la siguiente:

$$P = \rho * g * h \text{ [psi]} \quad (37)$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de gravedad, y h es la altura, para el flujo q_{12} la diferencia de presión entre los dos tanques se denota en la Ecuación (38):

$$\Delta_p = \rho * g * h_1 - \rho * g * h_2 = (h_1 - h_2) * \rho * g \text{ [psi]} \quad (38)$$

Reemplazando (38) en (36), el flujo q_{12} se ve reflejado en las Ecuaciones (39) y (40)

$$q_{12} = C_{v,max} * f(x) * \sqrt{(h_1 - h_2) * \rho * g} \text{ [gpm]} \quad (39)$$

$$q_{12} = K_{v,max} * f(x) * \sqrt{(h_1 - h_2) * \rho * g} \text{ [m}^3\text{/h]} \quad (40)$$

Por otro lado, la resistencia fluidica del modelo de la válvula, denotada por la letra K, se representan según las Ecuaciones (41) y (42) :

$$K = C_{v,max} * f(x) * \sqrt{p * g} \left[\frac{gpm}{\sqrt{ft}} \right] \quad (41)$$

$$K = K_{v,max} * f(x) * \sqrt{p * g} \left[\frac{m^3/h}{\sqrt{m}} \right] \quad (42)$$

Usando las Ecuaciones (42) y (40) en las Ecuaciones (34) y (35), teniendo en cuenta que el flujo de salida q_2 solo considera la altura h_2 , el modelo se reescribe según las Ecuaciones (43) y (44) :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{C_1}q_i - \frac{K_1}{C_1}\sqrt{h_1 - h_2} \quad (43)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{K_1}{C_2}\sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_2}{C_2}\sqrt{h_2} \quad (44)$$

donde K_1 y K_2 son parámetros constantes que representan la resistencia fluídica en la válvula. Por otro lado, el flujo volumétrico q_i es entregado por una válvula de actuación.

El valor de estos parámetros K_1 y K_2 se obtuvo a partir de las hojas de datos de los fabricantes de cada una de las válvulas configuradas en el prototipo asociado a nuestro modelo. De igual manera, el flujo volumétrico que puede entregar la válvula de actuación, también se estima a partir de la hoja de datos. Por lo que es necesario partir de los modelos matemáticos de las válvulas, los cuales son presentados a continuación.

3.2.1. Modelado de las válvulas

La Figura 3.4 muestra el diagrama de bloques de una válvula de control. Por lo general, es suficiente modelar la válvula como un modelo de primer orden, lo que da como resultado la función de transferencia:

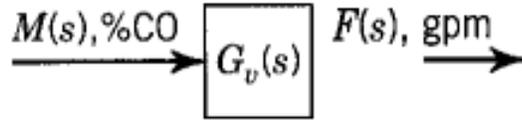


Figura 3.4: Diagrama de Bloques del Modelo de la Válvula de Control.

$$G_v(s) = \frac{F(s)}{M(s)} = \frac{K_v}{\tau_v s + 1} \quad (45)$$

Donde:

- %CO: Porcentaje de apertura de la válvula, y es determinada por la señal de control.
- K_v : Ganancia de la válvula, en $gpm/\%CO$, $(lb/h)/\%CO$, $scfh/\%CO$
- τ_v : Constante de tiempo de la válvula, en s .

La constante de tiempo del actuador suele ser del orden de unos pocos segundos y puede despreciarse cuando las constantes de tiempo del proceso son grandes (tiempos de respuesta

largos).

El diagrama de bloques de la Figura 3.4 asume que la caída de presión a través de la válvula es constante o es una función únicamente del flujo. Cuando la caída de presión a través de la válvula es función de otras variables del proceso, como en el control de nivel o presión de gas, el diagrama de bloques debe incluir el efecto de estas variables en el flujo a través de la válvula.

▪ **Identificación de parámetros de las válvulas de interconexión y de salida**

De acuerdo al modelo presentado y basándonos en las tablas que nos proporciona el fabricante de cada actuador, podemos obtener los coeficientes K_1 y K_2 del modelo. Ya que el fabricante proporciona diferentes tablas y valores de K_v , dependiendo del diametro de la tubería, vamos a tener que tomar consideraciones. Primero, la tubería utilizada para la instrumentación de la planta de LACTI es de 1 pulgada, a partir de conocer este dato podemos proceder a revisar la hoja de datos proporcionado por el fabricante de la válvula de asiento inclinado Burkert 2702:

Flow values for orifice 25

Stroke [%]	Kv value [m ³ /h]	Stroke [%]	Kv value [m ³ /h]
5	0.39	60	10.5
10	0.41	70	12.2
20	0.6	80	13.5
30	1.25	90	14.2
40	4.5	100	15.0
50	8.5		

Tab. 6: Flow values for orifice 25

Figura 3.5: Coeficiente de apertura válvula de asiento inclinado Burkert 2702.

Partiendo de la Ecuación (42), se considera que la densidad del agua $\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$, y para la aceleración gravitacional $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$, en nuestro caso de estudio vamos a tomar en cuenta que para la válvula de interconexión se va a tomar un valor de apertura nominal del 20 %, por lo tanto su resistencia fluidica k_1 se denota en la Ecuación (46), además hay que considerar que $f(x)$ no se la va a tomar en cuenta ya que en la tabla 3.5 los valores de K_v estan en función de la apertura $f(x)$:

$$\begin{aligned}
K_1 &= K_v * \sqrt{p * g} \left[\frac{m^3/h}{\sqrt{m}} \right] \\
K_1 &= 0,6 * \sqrt{1000 * 9,81} \left[\frac{m^3/h}{\sqrt{m}} \right] \\
K_1 &= 59,4273 \left[\frac{m^3/h}{\sqrt{m}} \right] = 0,016508 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right]
\end{aligned} \tag{46}$$

Para la válvula de salida se tomo un valor de apertura de 5%, por lo tanto su resistencia fluidica K_2 se ve reflejada en la Ecuación (47).

$$K_2 = 386277 \left[\frac{m^3/h}{\sqrt{m}} \right] = 0,01073 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right] \tag{47}$$

■ Estimación del flujo de entrada

Para poder estimar el flujo de entrada debemos partir de la hoja de datos que nos proporciona el fabricante para la válvula Mark 70SP, cuyo $Cv = 9,5$ y su maxima diferencia de presión es de $350PSI$ los cuales son los parámetros para el diámetro de 1 pulgada y se resaltan en la Figura 3.6.

Flow Coefficient		Valve Size	Seat Material	Maximum Differential Pressure (PSI)									
Cv	Kv			Std. 35M Actuator		35M with Positioner		Optional 55M Actuator		55M with Positioner		Optional 85M Actuator	
				PSI	BAR	PSI	BAR	PSI	BAR	PSI	BAR	PSI	BAR
2.5 or 4.4	2.2 or 3.8	1/2" & 3/4" (DN15 & 20)	SST	125	8,6	175	12,1	175	12,1	175	12,1	175	12,1
			Jorcote	250	17,2	500	34,5	350	24,1	700	48,3	550	37,9
6.4 or 9.5	5.5 or 8.2	1" & 1-1/4" (DN25 & 32)	SST	100	6,9	150	10,3	150	10,3	150	10,3	150	10,3
			Jorcote	150	10,3	300	20,7	225	15,5	425	29,3	350	24,1
15	12,9	1-1/2" (DN40)	SST	75	5,2	125	8,6	100	6,9	125	8,6	125	8,6
			Jorcote	125	8,6	250	17,2	175	12,1	350	24,1	275	19,0
25 or 30	21,5 or 25,8	2" (DN50)	SST	75	5,2	125	8,6	100	6,9	125	8,6	125	8,6
			Jorcote	125	8,6	250	17,2	175	12,1	350	24,1	275	19,0

Figura 3.6: Parámetros de la válvula Mark 70SP

El flujo de entrada q_i el cual se denota en la Ecuación (48), se estimó partiendo de la Ecuación (36), considerando que la apertura de la válvula es de un 55%, en este caso la constante que se toma para la determinación del flujo de entrada es $C_{v,max}$, por lo tanto se debe conserdar el porcentaje de apertura $f(x)$.

$$\begin{aligned}
q &= C_{v,max} * f(x) * \sqrt{\frac{\Delta p}{G_f}} [gpm] \\
q_i &= 9,5 * 0,55 * \sqrt{\frac{350}{1}} [gpm] \\
q_i &= 97,7508 [gpm] = 0,007403 [m^3/s]
\end{aligned} \tag{48}$$

3.2.2. Modelado de sensores

La función de transferencia de la combinación de sensor/transmisor relaciona su señal de salida con su entrada, que es la variable de proceso; esto se muestra en la Figura 3.7. La forma más simple de la función de transferencia de sensor de primer orden es:

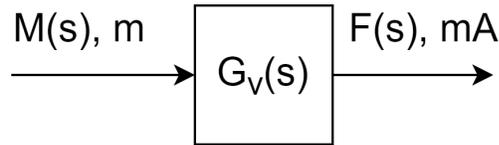


Figura 3.7: Diagrama de Bloques de Modelo del Sensor.

$$H(s) = \frac{TO(s)}{PV(s)} = \frac{K_t}{\tau_T s + 1} \quad (49)$$

donde:

- K_t : es la ganancia del transmisor.
- τ_T : es la constante de tiempo del transmisor.
- TO es la salida del transmisor
- PV es la variable del proceso

Cuando la relación entre TO y PV es lineal, la ganancia del transmisor es fácil de obtener una vez que se conoce el intervalo de medición.

▪ Identificación de parámetros de los sensores de nivel

De acuerdo al modelo presentado y basándonos en los datos que nos proporciona en fabricante respecto a los sensores disponibles en el prototipo, vamos a poder obtener la función de transferencia entre la variable real y la variable medida.

Primero vamos a realizar un análisis del sensor **Cerabar T PMC131** , para ello vamos a tomar en cuenta que tenemos una constante de tiempo τ_T la cual es igual a:

$$\tau_T = 2,23 * T90 = 0,0446s \quad (50)$$

donde $T90$ viene dada por el fabricante según la Tabla 1. Ahora tomando en cuenta la ganancia del transmisor K_t , que viene dado por la Ecuación (51), considerando que:

Rise Time (T90)	PMC131 20ms
-----------------	-------------

Tabla 1: Constante de tiempo sensor T PMC131.

- Intervalo de medición: $0 - 1m$
- Variable del proceso: $4 - 20mA$

$$K_t = \frac{(20 - 4)mA}{(1 - 0)m} = \frac{16mA}{m} \quad (51)$$

Entonces, finalmente la función de transferencia es la siguiente:

$$H(s) = \frac{TO(s)}{PV(s)} = \frac{16}{0,0446s + 1} \quad (52)$$

Ahora analizaremos el sensor **Deltabar M PMD55**, para ello vamos a tomar en cuenta que tenemos una constante de tiempo τ_T que se denota en la Ecuación (53) la cual fue obtenida a partir de los datos de la Tabla 3.8, donde $t_1 = 220(ms)$ y $t_1 + \tau_T = 310(ms)$:

$$\tau_T = \tau_{63} = 90ms = 0,090s \quad (53)$$

	Dead time (t_1) [ms]	Dead time (t_1) [ms] + Time constant T63 (= t_2) [ms]	Dead time (t_1) [ms] + Time constant T90 (= t_3) [ms]
min.	220	310	370
max.	1020	1110	1170

Figura 3.8: Constante de tiempo sensor Deltabar M PMD55.

Tomando en cuenta la ganancia del transmisor K_t en la Ecuación 54, donde:

- Intervalo de medición: $0 - 1m$
- Variable del proceso: $4 - 20mA$

$$K_t = \frac{(20 - 4)mA}{(1 - 0)m} = \frac{16mA}{m} \quad (54)$$

entonces, finalmente la función de transferencia es la siguiente:

$$H(s) = \frac{TO(s)}{PV(s)} = \frac{16}{0,090s + 1} \quad (55)$$

Realizado el análisis de los modelos de los sensores disponibles, vamos a poder darnos cuenta de dos aspectos importantes: (i) sabiendo que los modelos son de primer orden, vamos a despreciar la constante de tiempo ya que son demasiado pequeñas, respecto a la constante de tiempo del proceso, como para tomarlas en cuenta y se va a considerar una respuesta inmediata del sensor, (ii) para efectos del modelo, y para estudio de fallas en el sensor, vamos a asumir que realizar una transformación de variables en el modelo de altura [m] a [mA] sería innecesario por cuanto esta transformación es lineal, y podemos enviar directamente las señales en magnitud real como variables de retroalimentación para el control del sistema en el modelo de simulación.

3.2.3. Identificación de parámetros de los tanques

Para la identificación de los parámetros de interés de los tanques que sabemos que es el área de la sección transversal vamos a partir de los datos técnicos proporcionados por una tesis realizada en la Universidad Politécnica Salesiana (Molina-Nacipucha, 2013).

Volumen del recipiente	$V = 8.1 \text{ ft}^3$
Dimensiones del recipiente	$L = 3.94 \text{ ft}$ $D = 1.63 \text{ ft}$
Espesor del recipiente.	$t = 3 \text{ mm}$
Tapa Plana rebordeada	$t = 3 \text{ mm}$

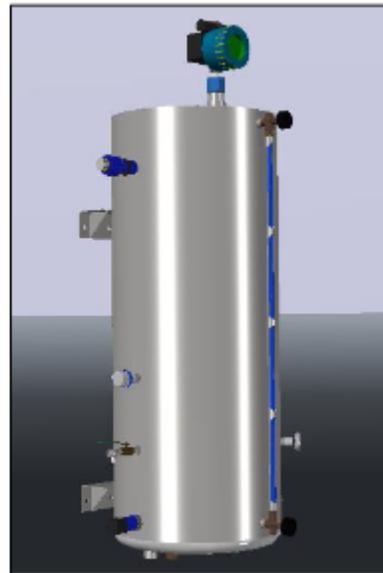


Figura 3.9: Información de los tanques (Molina-Nacipucha, 2013)

Tomando en cuenta el diámetro del tanque que cabe recalcar que va a ser el mismo para los dos tanques que tenemos en nuestro caso de estudio, vamos a poder calcular las áreas:

$$C_1 = C_1 = 0,1938 \text{ m}^2 \quad (56)$$

3.2.4. Modelo nominal del proceso

Con base a los datos de las secciones previas, el modelo nominal para el sistema de tanques interconectados esta descrito por la Ecuaciones (57) y (58):

$$\frac{dh_1}{dt} = 5,15996q_i - 0,085181\sqrt{h_1 - h_2} \quad (57)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = 0,085181\sqrt{h_1 - h_2} - 0,055366\sqrt{h_2} \quad (58)$$

3.3. Identificación de los modos de fallas y modelado de sistema sujeto a falla

A continuación se presenta el modelo de las fallas consideradas en este trabajo, las cuales son cuatro fallas internas, o estructurales, y 3 fallas relativas al actuador y a los dos sensores.

3.3.1. Modelado de las fallas internas

Se consideraron cuatro fallas. La primera, llamada falla 1, es una fuga en el tanque 1, la cual fue modelada como un flujo de salida adicional en el tanque a través de la Ecuación (59).

$$q_l = K_3\sqrt{h_1} \quad (59)$$

donde K_3 se ajusta de acuerdo con la magnitud de la falla y para nuestro caso el máximo valor sería de $0,00107 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right]$ que representaría el 100 % de la magnitud de falla.

Una segunda falla, falla 2, es el bloqueo total o parcial de la válvula de interconexión en la posición cerrada. Esta falla se modela como un cambio $\Delta K = 0,000278 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right]$ en la constante K_1 , este valor representaría el 100 % de magnitud de falla:

$$K_{\delta_1} = K_1 - \Delta K \quad (60)$$

donde:

- K_1 : es la constante del modelo nominal

- ΔK : es la constante del modelo con falla, y se ajusta según la magnitud de la falla.

Le agregamos una falla 3 que es una fuga en el tanque 2 y una falla 4 que es un bloqueo en la válvula de salida del tanque 2. La tercera falla se modela como un flujo de salida adicional en el tanque:

$$q_{L2} = K_4 \sqrt{h_2} \quad (61)$$

donde K_4 se ajusta de acuerdo con la magnitud de la falla y para nuestro caso el máximo valor sería de $0,00107 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right]$ que representaría el 100 % de la magnitud de falla.

La cuarta falla es el bloqueo total o parcial de la válvula de salida del tanque 2. Esta falla se modela como un cambio $\Delta K_2 = 0,000278 \left[\frac{m^3/s}{\sqrt{m}} \right]$ en la constante K_2 , este valor representaría el 100 % de magnitud de falla:

$$K_{\delta_2} = K_2 - \Delta K_2 \quad (62)$$

Donde:

- K_2 : es la constante del modelo nominal
- ΔK_2 : es la constante del modelo con falla

3.3.2. Modelado de las fallas en sensores y actuadores

Una falla en el actuador es una desconfiguración de la válvula de ingreso al sistema. Esta falla se modela como un cambio del flujo de entrada real, denotado como q_{fa} , que depende del valor que tome K_a entre el intervalo $0 - 1$, provocando que el flujo de ingreso varíe respecto al flujo de entrada nominal de control q_i :

$$q_{fa} = K_a q_i \quad (63)$$

Una falla los sensores cambian el valor de medición de las variables reales, y pueden representarse como variaciones F_{s1} y F_{s2} en las mediciones de la salida:

$$\begin{aligned} F_{s1} &= K_{s1} h_1 \\ F_{s2} &= K_{s2} h_2 \end{aligned} \quad (64)$$

donde K_{s1} y K_{s2} son ajustables según la magnitud de la falla en los sensores.

En consecuencia, el modelo del sistema sujeto a fallas internas, en sensores y actuadores, está dado por las Ecuaciones diferenciales (65), 66 y las Ecuaciones algebraicas de salida (67) :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{C_1} (q_i + q_{fa}) - \frac{K_1}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_3}{C_1} \sqrt{h_2} + \frac{\Delta K}{C_1} \sqrt{h_1 - h_2} \quad (65)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{K_1}{C_2} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_2}{C_2} \sqrt{h_2} - \frac{\Delta K}{C_2} \sqrt{h_1 - h_2} - \frac{K_4}{C_2} \sqrt{h_2} + \frac{\Delta K_2}{C_2} \sqrt{h_2} \quad (66)$$

$$\begin{aligned} h1 &= h1 + F_{s1} \\ h2 &= h2 + F_{s2} \end{aligned} \quad (67)$$

3.3.3. Linealización aproximada del modelo

Dado que los observadores de diagnóstico que se desarrollarán solo aplica para modelos lineales, se procederá con la linealización del modelo no lineal. Para la linealización del modelo se representarán las fallas en sensores y actuadores en formas de matrices y vectores, como se ilustró en la Sección 2.6.

Una falla aditiva de actuador se introduce a través de la matriz de falla E_f y el escalar f_a . Entonces:

$$E_f f = \begin{bmatrix} q_{fa}/C_1 \\ 0 \end{bmatrix} * f_a \quad (68)$$

Las fallas de sensores serian representadas a través de la matriz de falla F_f y el vector $f_s = [f_{s1} \ f_{s2}]^T$:

$$F_f f = \begin{bmatrix} F_{s1} & 0 \\ 0 & F_{s2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{bmatrix} \quad (69)$$

Notese que f_a, f_{s1} y f_{s2} pueden tomar el valor de 0 cuando no existe falla o 1 que representaria que la falla esta presente.

Basándonos en el modelo sujeto a falla, primero vamos a obtener los puntos de operación Q_i , H_1 y H_2 . A partir de las ecuaciones del modelo no lineal haciendo $\dot{h}_1 = 0$ y $\dot{h}_2 = 0$ y despejando cualquiera de las variables ya sea h_1 o h_2 en ambas ecuaciones, se obtienen lo puntos de operación H_1 y H_2 según la Ecuación (70) y la Ecuación (71):

$$H_1 = \frac{(H_{11} + H_{12})^2 * q_i^2}{(\Delta K^2 * (K_2^2 - K_3^2) - 2 * \Delta K * K_1 * (K_2^2 - K_3^2) + K_1^2 * (K_2^2 - K_3^2) - K_2^2 * K_3^2)^2} \quad (70)$$

Donde:

- $H_{11} = (\Delta K^2 - 2 * \Delta K * K_1 + K_1^2 + K_2^2) * \left(\sqrt{\Delta K^2 - 2 * \Delta K * K_1 + K_1^2 + K_2^2} \right) * K_3$
- $H_{12} = (\Delta K - K_1) * K_2$

$$H_2 = \frac{-q_i^2 * (H_{21} - (\Delta K - K_1)^2 * H_{22})}{(\Delta K^2 * (K_2^2 - K_3^2) - 2 * \Delta K * K_1 * (K_2^2 - K_3^2) + K_1^2 * (K_2^2 - K_3^2) - K_2^2 * K_3^2)^2} \quad (71)$$

Donde:

- $H_{21} = 2 * \sqrt{\Delta K^2 - 2\Delta K * K_1 + K_1^2 + K_2^2} * |(\Delta K - K_1)^3| * K_2 * K_3$
- $H_{22} = (\Delta K^2 * (K_2^2 + K_3^2) - 2 * \Delta K * K_1 * (K_2^2 + K_3^2) + K_1^2 * (K_2^2 + K_3^2) + K_2^2 * K_3^2)$

El punto de operación para el flujo de entrada es $Q_i = 0,0073 \frac{m^3}{s}$, el cual se estimó en la Ecuación (48), y debe sustituirse en las Ecuaciones (70) y (71) con las constantes que modelan al sistema y fueron obtenidas previamente, cabe recalcar que los puntos de operación en las alturas fueron obtenidas en condiciones nominales, por lo que los valores que modelan las fallas son 0, por consiguiente los puntos de operación de las alturas son $H_1 = 0,6771 \text{ m}$ y $H_2 = 0,4760 \text{ m}$, respectivamente. Esto se mostrará en la sección 3.4.

Haciendo $q_i = Q_i$. Ahora, obtenemos los Jacobianos para representar el modelo lineal del sistema sujeto a las fallas y fallos del sistema, obteniéndose:

$$\dot{h}_\delta = (A_n + A_f) h_\delta + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} q_\delta + \begin{bmatrix} K_a/C_1 \\ 0 \end{bmatrix} f_a \quad (72)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} K_{s1} & 0 \\ 0 & K_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{s1} \\ f_{s2} \end{bmatrix} \quad (73)$$

donde $A_f = \sum_{i=1}^4 A_{fi}$ es la matriz de fallas, y cada A_{fi} es una matriz que modela cada una de las 4 fallas internas del sistema; estas matrices estan indicadas en las Ecuaciones (74),(75),(76) y (77).

La matriz A_n representa la matriz nominal del sistema:

$$A_n = \begin{bmatrix} \frac{-K_1}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} & \frac{K_1}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} \\ \frac{K_1}{2C_2 \sqrt{h_1-h_2}} & -\left(\frac{K_1 \sqrt{h_2} + K_2 \sqrt{h_1-h_2}}{2C_2 \sqrt{h_2} \sqrt{h_1-h_2}}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} \quad (74)$$

La matriz A_{f1} representa la fuga en el tanque 1:

$$A_{f1} = \begin{bmatrix} \frac{-K_3}{2C_1 \sqrt{h_1}} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0034 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (75)$$

La matriz A_{f2} representa la fuga en el tanque 2:

$$A_{f2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{2C_2 \sqrt{h_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -0,0040 \end{bmatrix} \quad (76)$$

La matriz A_{f3} representa la desconfiguración en la válvula de interconexión:

$$A_{f3} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta K}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} & \frac{-\Delta K}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} \\ \frac{-\Delta K}{2C_2 \sqrt{h_1-h_2}} & \frac{\Delta K}{2C_2 \sqrt{h_1-h_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0016 & -0,0016 \\ -0,0016 & 0,0016 \end{bmatrix} \quad (77)$$

La matriz A_{f4} representa la desconfiguración en la válvula de salida:

$$A_{f4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta K_2}{2C_2 \sqrt{h_2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,001 \end{bmatrix} \quad (78)$$

La Ecuación (67) de salida es lineal, así que no cambia en la linealización.

3.4. Diseño de un controlador por realimentación del vector de estados con acción integral para el sistema de tanques interconectados

Con el fin de diseñar los filtros de detección y diagnóstico de fallas para el sistema controlado, y ver los efectos de las fallas en el mismo, se procede a diseñar un Control por Realimentación del Vector de Estados (CRVE) con acción integral para controlar el nivel h_1 del tanque 1 al punto de operación $H_1 = 0,6771 \text{ m}$. Partiendo del modelo nominal en espacio de estados del sistema sin fallas, se verifica la controlabilidad del sistema:

$$\dot{h}_\delta = \begin{bmatrix} \frac{-K_1}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} & \frac{K_1}{2C_1 \sqrt{h_1-h_2}} \\ \frac{K_1}{2C_2 \sqrt{h_1-h_2}} & -\frac{(K_1 * \sqrt{h_2} + K_2 * \sqrt{h_1-h_2})}{2C_2 \sqrt{h_2} \sqrt{h_1-h_2}} \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} q_\delta \quad (79)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} h_\delta$$

$$\dot{h}_\delta = \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} h_\delta + \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} q_\delta \quad (80)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} h_\delta$$

Encontramos la matriz de controlabilidad del sistema la cual está representada de la siguiente manera:

$$C_{Mz} = [B_z \quad A_z B_z] = \begin{bmatrix} 5,16 & -0,136224 \\ 0 & 0,136224 \end{bmatrix} \quad (81)$$

Se calcula el determinante de la matriz de controlabilidad $\det[C_{Mz}] = 0,702916$, por lo tanto, el sistema es controlable ya que es diferente de cero.

3.4.1. Diseño del controlador

En el diseño del CRVE con acción integral, además de la realimentación de los estados, se realimenta también la salida, como se muestra en la Figura 3.10. La inclusión de la acción

integral aumenta el tipo de sistema y elimina el error en estado estable para seguimiento de consigna, que en este caso de estudio es la referencia deseada para la altura h_1 (Nise, 2015).

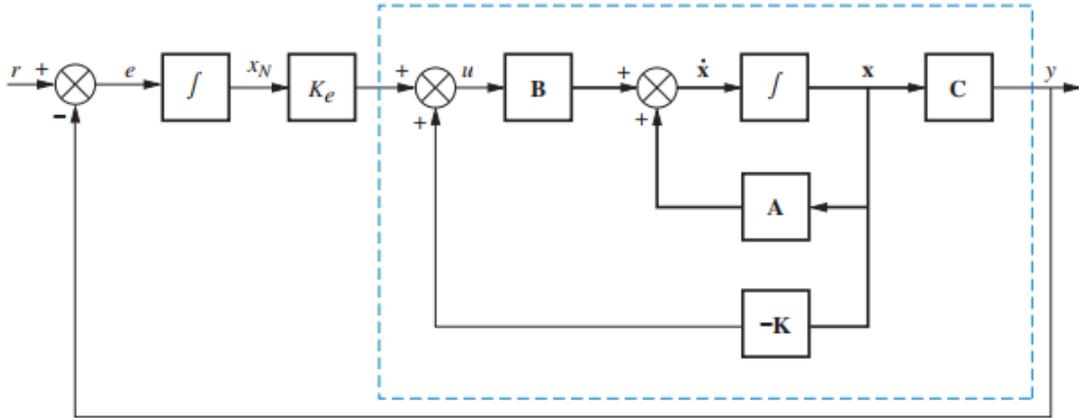


Figura 3.10: Diagrama del control integral (Nise, 2015) .

Entonces, en el diseño se ha agregado una variable de estado adicional, x_N :

$$\dot{x}_N = r - C_x \quad (82)$$

Ahora teniendo en cuenta el modelo por variables de estado, tenemos:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{x}_N &= r - C_x \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (83)$$

Por lo tanto:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (84)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} \quad (85)$$

La señal de control $u(t)$ es:

$$u = -K_x + K_e x_N = - \begin{bmatrix} K & -K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} \quad (86)$$

donde $K \in R^n$ son las ganancias de realimentación de estado y $K_e \in R$ en la ganancia integral.

Sustituyendo la Ecuación (86) en la Ecuación (84) obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A - BK) & BK_e \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (87)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} \quad (88)$$

Usando las matrices A y B de la condición nominal, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} K_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (89)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5,16k_1 - 0,095 & 0,095 - 5,16k_2 & 5,16k_e \\ 0,095 & -0,1351 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (90)$$

$$y_\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_N \end{bmatrix} \quad (91)$$

Nota: La Matriz C para este caso es tomada como un vector columna de la forma $\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$ en la cual consideramos a H_1 como la salida a controlar en el sistema.

Para un sistema de segundo orden, el polinomio característico en el cual se requiere del coeficiente de amortiguamiento ζ y de la frecuencia natural w_n se presenta en la Ecuación (92):

$$s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2 \quad (92)$$

Se conoce que el tiempo de asentamiento t_s esta dado en la Ecuación (93), que depende de ζ y w_n :

$$t_s = \frac{4}{\zeta w_n} \quad (93)$$

De la Ecuación (93), se proponen los valores $t_s = 500 \text{ s}$ y $\zeta = 1,5$ para obtener el valor de w_n como se explica en (94):

$$t_s = \frac{4}{\zeta w_n} \quad 300 = \frac{4}{1,5 w_n} \quad w_n = 0,008889 \text{ rad/s} \quad (94)$$

Por lo tanto, el polinomio característico deseado se denota en la Ecuación (95):

$$s^2 + 0,02667s + 0,000079 \quad (95)$$

Los polos dominantes del polinomio característico de segundo orden estan dados en la Ecuación (96):

$$(s + 0,023271)(s + 0,003395) \quad (96)$$

Al añadirse un estado adicional por el control integral el sistema será de tercer orden, lo que conlleva a que el polinomio característico sea de orden 3, para encontrar el tercer polo, verificaremos si nuestro sistema en lazo abierto incluye un cero el cual pueda ser cancelado con el tercer polo que se debe adicionar al polinomio característico. La función de transferencia del sistema en lazo abierto esta dada por la Ecuación (97):

$$G(s) = C(SI - A)^{-1} + D$$

$$G(s) = [1 \quad 0] \left(S \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \frac{5,16(s + 0,1351)}{(s + 0,2121)(s + 0,01797)} \quad (97)$$

De la Ecuación (97), se puede observar que existe un cero en -0.13501, el cual sera cancelado por el control integral añadiendo un polo en el polinomio característico de segundo orden y ese procedimiento se denota en la Ecuación (98):

$$D(s) = (s^2 + 0,02667s + 0,000079)(s + 0,135097)$$

$$D(s) = s^3 + 0,06s^2 + 0,001s + 0,000003 \quad (98)$$

Calculando el polinomio característico del sistema controlado de la Ecuación (90), se

obtiene la Ecuación (99):

$$F(s) = Det \begin{pmatrix} -5,16k_1 - 0,095 & 0,095 - 5,16k_2 & 5,16k_e \\ 0,095 & -0,1351 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$F(s) = s^3 + 5,16(k_1 + 0,001)s^2 + 0,18(k_1 + 0,75(k_2 + 37,8(k_e + 0,00004)))s + 0,18k_e \quad (99)$$

Igualando (98) y (99), se procede a despejar las ganancias del control por realimentación de estado con control integral, indicadas en la Ecuación (100):

$$\begin{aligned} k_e &= -0,0132 \\ k_1 &= 0,0184 \\ k_2 &= 0,000015311 \end{aligned} \quad (100)$$

3.4.2. Validación del sistema de control

Para la validación se realizaron varias simulaciones en la herramienta Simulink de MATLAB. Para todas ellas se uso un tiempo de simulación de $t = 10000s$. El flujo de entrada se establece en el punto de operación $Q_i = 0,007403 \text{ m}^3/s$ para el control de la variable h_1 . Las condiciones de falla van a ser activadas de manera simultánea para poder visualizarlas en distintas partes de la simulación y así analizar como el controlador actúa respecto a esos cambios que se van a producir en el sistema. La altura h_1 se indica en color amarillo y la altura h_2 se indica en color azul.

Las siguientes simulaciones muestran los resultados del modelo no lineal (sistema real) actuado por la señal de control lineal. Se consideran distintas referencias para el control de h_1 para verificar la robustez del controlador. Como se puede observar en la Tabla 2, el sistema se estabiliza en la referencia establecida en cada caso, y la señal de control tiene una magnitud apropiada que puede ser obtenida de la válvula actuadora.

Punto Operación	Señal de Control	Modelo no lineal
0,5m		
0,6771m		
0,8m		

Tabla 2: Simulación del sistema no lineal y señal de control.

Una vez validado el sistema de control, se procederá a simular el sistema sujeto a 7 fallas que puede presentar el sistema. Su activación esta dada en diferentes tiempos, con una magnitud del 100 % cuyos valores estan proporcionados en la Sección 3.3.1. En este caso se presentan cada una por separado y se muestran en las Tablas 3 y 4.

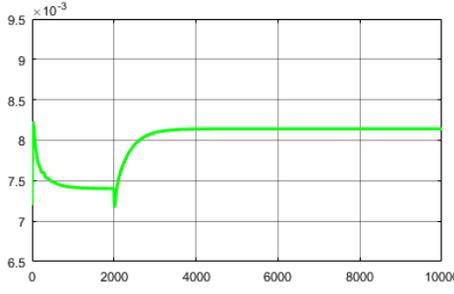
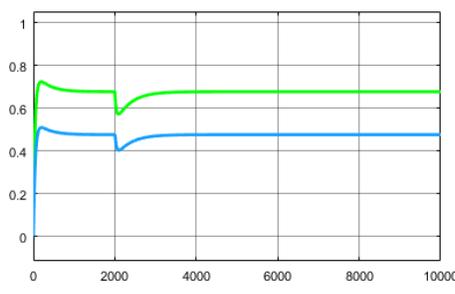
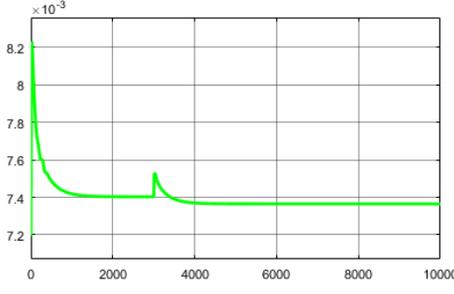
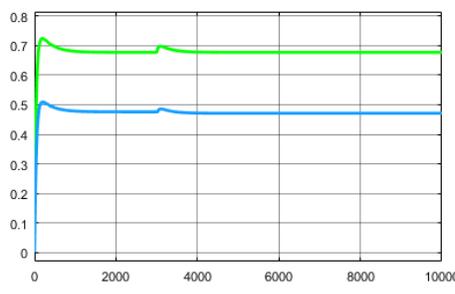
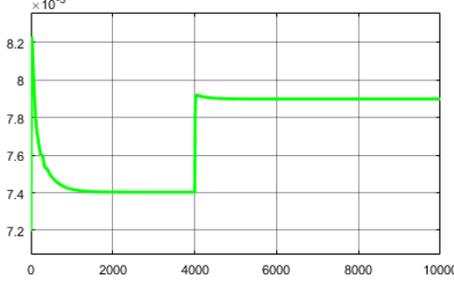
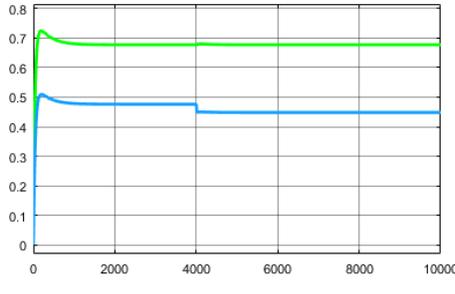
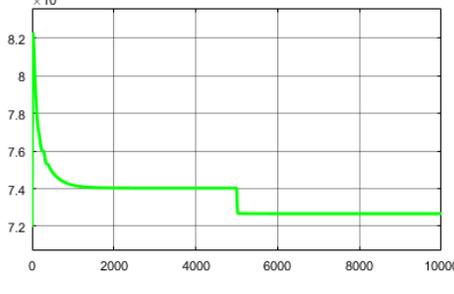
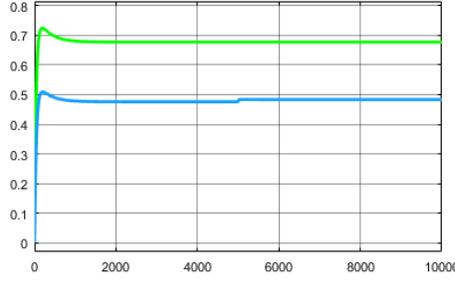
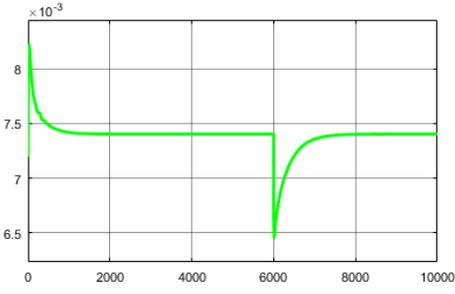
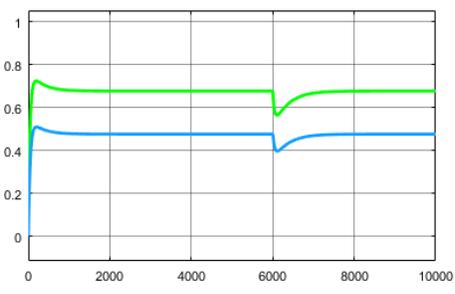
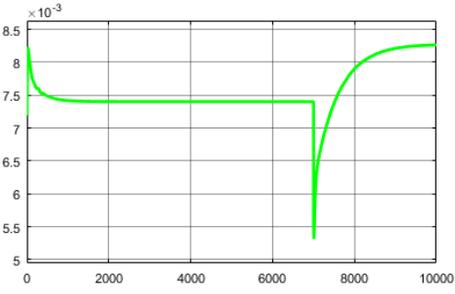
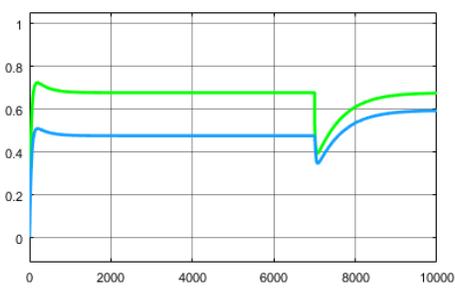
Falla	Señal de control	Modelo no lineal
Fuga Tanque 1 (100 % magnitud de falla)		
Desconfiguración de la válvula de interconexión (100 % magnitud de falla)		
Fuga Tanque 2 (100 % magnitud de falla)		
Desconfiguración de la válvula de salida (100 % magnitud de falla)		

Tabla 3: Simulación del sistema con cada una de las fallas internas que puede presentar.

En el caso de la fuga en el tanque 1 ante la disminución en el nivel de los tanques el control lo que hace es proporcionar mas flujo lo que ayudará a volver al punto de operación normal. Para la fuga en el tanque 2 se usa el mismo principio, al tener niveles que van disminuyendo el controlador hace que el sistema introduzca mas flujo de entrada para mantener al sistema en el punto de operación.

En el caso de la desconfiguración de la válvula interconexión teniendo en cuenta que ante el taponamiento entre los dos tanques que produce que se tenga un mayor nivel en el tanque 1, el control procede a disminuir el flujo de ingreso para evitar el que tanque se llene mas de la capacidad que tiene. De igual manera que en el caso anterior para la desconfiguración de la válvula de salida el control al darse cuenta que el tanque 2 empieza a llenarse y por ende también el tanque 1, se procede a disminuir el flujo de ingreso para evitar llenar demasiado los tanques.

Falla	Señal de control	Modelo no lineal
<p>Falla en el actuador (100% magnitud de falla)</p>		
<p>Falla sensor 1 (100% magnitud de falla)</p>		

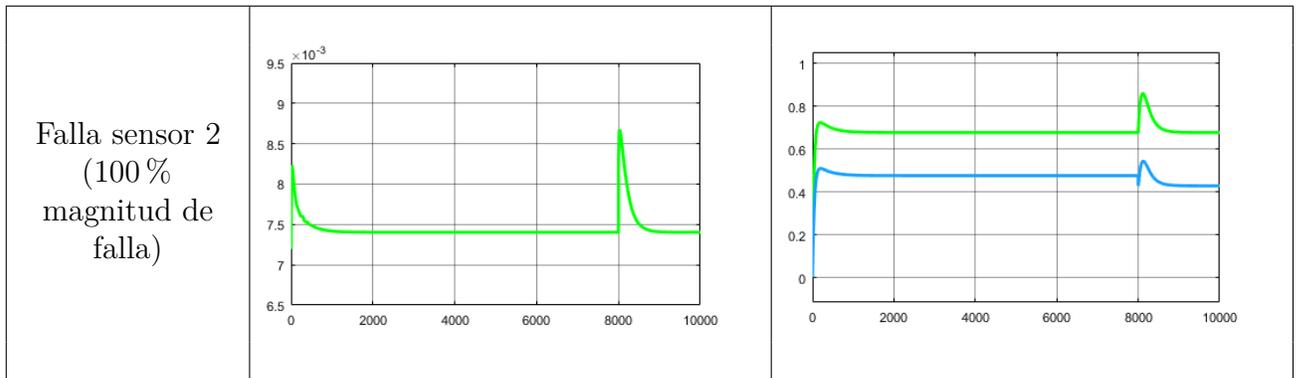


Tabla 4: Simulación del sistema con cada una de las fallas en sensores y actuadores que se pueden presentar.

La Figura 3.11 presenta la señal propuesta por el controlador ante la existencia de una falla de desconfiguración de la válvula de ingreso, entonces debe salir menor flujo a lo propuesto por el controlador, por lo tanto en la Tabla 4 se visualiza la señal control de flujo que efectivamente entra a la planta.

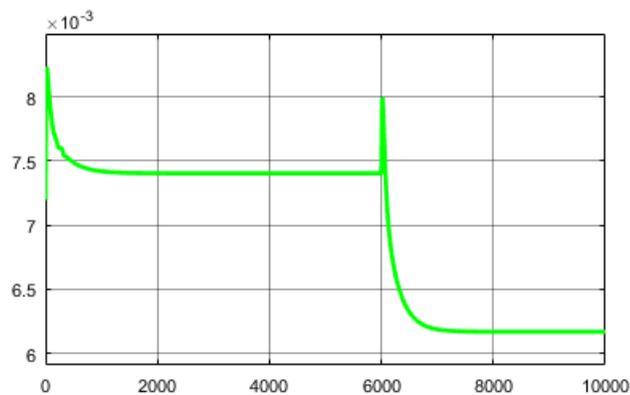


Figura 3.11: Señal propuesta por el controlador ante la falla de actuador.

Ahora para las fallas de sensores, se presentan las simulaciones que muestran los niveles reales de los tanques y así contrastar con las gráficas de los niveles medidos por los sensores presentados en la tabla 4.

La Figura 3.12 muestra los niveles reales de los tanques expuestos a la falla de sensor 1. Ante esta falla, se presenta un decrecimiento en los niveles de los tanques, y el sistema proporciona un flujo mayor de ingreso para así tratar de compensar el bajon de nivel y por

lo tanto empieza a subir el nivel de manera rápida y se situa en otro punto que no es el de operación.

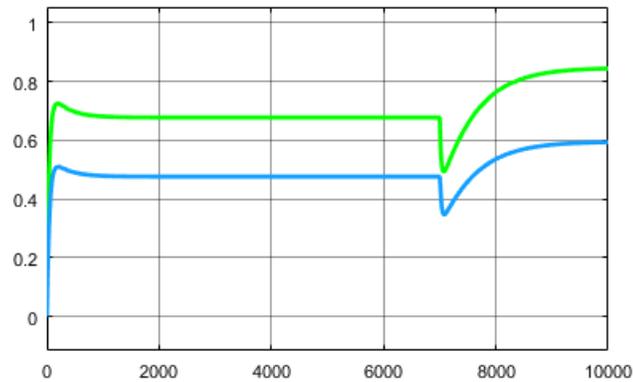


Figura 3.12: Niveles reales ante la falla de sensor 1.

La Figura 3.13 presenta los niveles reales de los tanques expuestos a la falla de sensor 2. En este caso teniendo en cuenta que al disminuir el nivel del tanque 2 lo que incurre en un decremento de nivel en el tanque 1, que es el nivel controlado, hace que el controlador empiece a aumentar el flujo de ingreso para mantener el punto de operación normal. sin embargo, de acuerdo con la Tabla 4, el nivel del tanque 2 no está en el punto de operación.

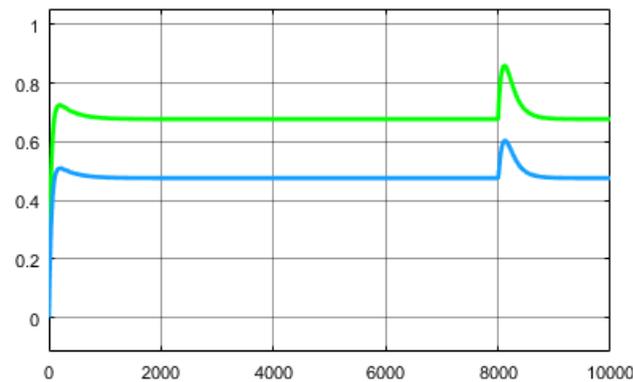


Figura 3.13: Niveles reales ante la falla de sensor 2.

Para realizar todas estas simulaciones se utilizó el diagrama de Simulink presentado en el Anexo B en la Figura B.2.

3.5. Diseño del observador de Luenberger de orden completo y los observadores de diagnóstico

A continuación se va a presentar el diseño del sistema de detección de fallas basado en observadores. Después de diferentes análisis experimentales, el sistema quedó conformado por un observador de Luenberger de detección y dos observadores de diagnóstico diseñados con una sola salida para cada observador, es decir, la altura h_1 como la salida disponible para un observador, y la altura h_2 como la salida disponible para el otro. Con este banco de observadores, es posible detectar las siete fallas consideradas en este trabajo. Primeramente se debe verificar que el sistema es completamente observable.

■ Observabilidad del sistema

Un sistema es observable si cualquier estado desconocido puede ser determinado conociendo únicamente su entrada y su salida sobre un determinado intervalo de tiempo. Partiendo del modelo lineal de la planta, cuyas ecuaciones de estado y salida son, respectivamente (72) y (73), se procederá en toda esta sección a calcular los OD con base en ese modelo. Primeramente es necesario calcular la matriz de observabilidad del sistema como se denota a continuación en la Ecuación (101) antes de diseñar nuestro OD.

$$O_M = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$
$$O_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} \quad (101)$$

Una vez obtenida la Matriz (101), el sistema es completamente observable si la matriz es de rango n . Por lo cual el rango de la matriz de observabilidad nuestra se denota en la Ecuación (102). Entonces es posible diseñar observadores de estado de orden completo.

$$\text{rango de } O_M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} = 2 \quad (102)$$

3.5.1. Observador de estado de orden completo

Partiendo del modelo del observador de estado de orden completo dado en la Ecuación (6) con $D = 0$, y de la Ecuación (8), que son las generadoras de residuales, si se incluye la matriz de fallas A_f definida por las ecuaciones (75),(76),(77), dentro del modelo de nominal del sistema, esto es como en la Ecuación (103):

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + A_f) + Bu \\ \hat{y} &= Cx \end{aligned} \quad (103)$$

entonces, la dinámica del error de estimación queda:

$$\dot{e}_x = (A - LC) e_x + A_f x \quad (104)$$

La matriz $A - LC$ debe ser estable y diagonal de tal manera que permita que la falla f_1 afecte al residual r_1 y las fallas f_2 y f_4 afectan al residual r_2 . Permittiéndonos así reconocer en que parte del sistema está ocurriendo la falla. En el caso de aparecer la falla f_3 , esta va a afectar a los residuales r_1 y r_2 .

Ahora teniendo en cuenta la matriz A y C de las Ecuaciones (74) y (73) respectivamente, definimos la matriz L como en la Ecuación (105):

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix} \quad (105)$$

Por lo tanto la operación de $A - LC$ se refleja en la Ecuación (106)

$$\begin{aligned} A - LC &= \begin{bmatrix} a_{11} - l_{11} & a_{12} - l_{12} \\ a_{21} - l_{21} & a_{22} - l_{22} \end{bmatrix} \\ A - LC &= \begin{bmatrix} -0,095 - l_{11} & 0,095 - l_{12} \\ 0,095 - l_{21} & -0,1351 - l_{22} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (106)$$

Para que $A - LC$ sea estable y nos brinde una respuesta rápida se imponen 2 polos $s = -20$,

con esto vamos a poder calcular los valores de las ganancias para la matriz L .

$$\begin{aligned}
 a_{12} - l_{12} &= 0 & 0,095 - l_{12} &= 0 & l_{12} &= 0,095 \\
 a_{21} - l_{21} &= 0 & 0,095 - l_{21} &= 0 & l_{21} &= 0,095 \\
 a_{11} - l_{11} &= -p_1 & -0,095 - l_{11} &= -20 & l_{11} &= 19,9050 \\
 a_{22} - l_{22} &= -p_2 & -0,135 - l_{22} &= -20 & l_{22} &= 19,8649
 \end{aligned} \tag{107}$$

Donde $-p_1$ y $-p_2$ son polos estables, por lo tanto matriz L de ganancias de observador se muestran en la Ecuación (108):

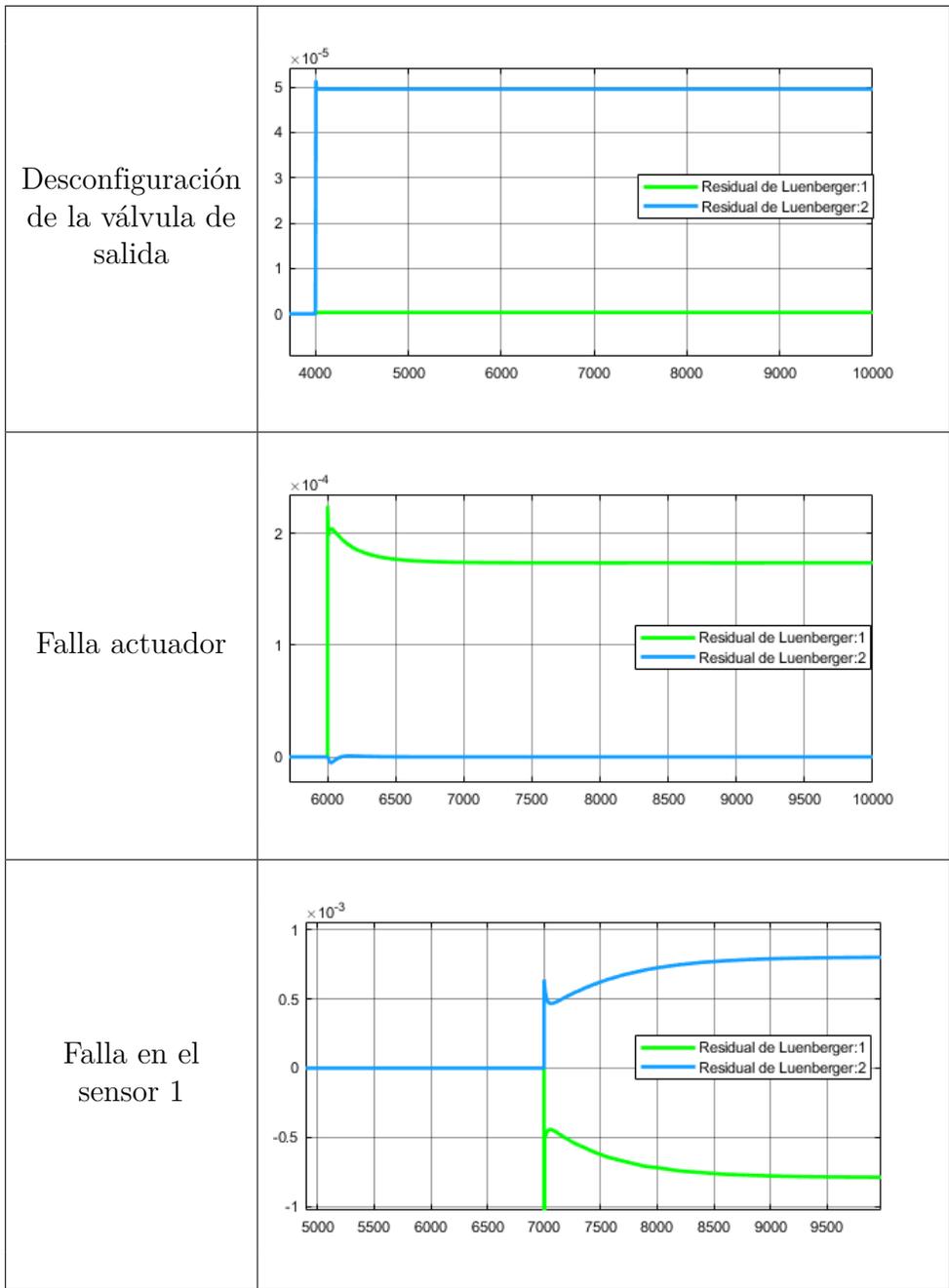
$$L = \begin{bmatrix} 19,9050 & 0,095 \\ 0,095 & 19,8649 \end{bmatrix} \tag{108}$$

Una vez obtenida la matriz L si además se consideran las fallas de sensores y actuador para el sistema nominal, entonces el error de estimación queda definido como en la Ecuación (109):

$$\begin{aligned}
 \dot{e}_x &= (A - LC)e_x + A_{fn}x + E_f f - LF_f f \\
 \dot{e}_x &= \begin{bmatrix} -20 & 0 \\ 0 & -20 \end{bmatrix} e_x + A_{fn}x + \begin{bmatrix} K_i/C_1 \\ 0 \end{bmatrix} * f_a - L \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{109}$$

El observador diseñado será insertado en el sistema según la Figura 2.8 y su funcionamiento se puede ver a través los resultados de las simulaciones que muestra la Tabla 5, para este caso se simularon cada una de las fallas de manera independiente, todas las gráficas se obtuvieron en Simulink, para este caso el diagrama se muestra en la Figura B.1.

Falla	Residuales
Fuga en el Tanque 1	
Desconfiguración en la válvula de interconexión	
Fuga en el Tanque 2	



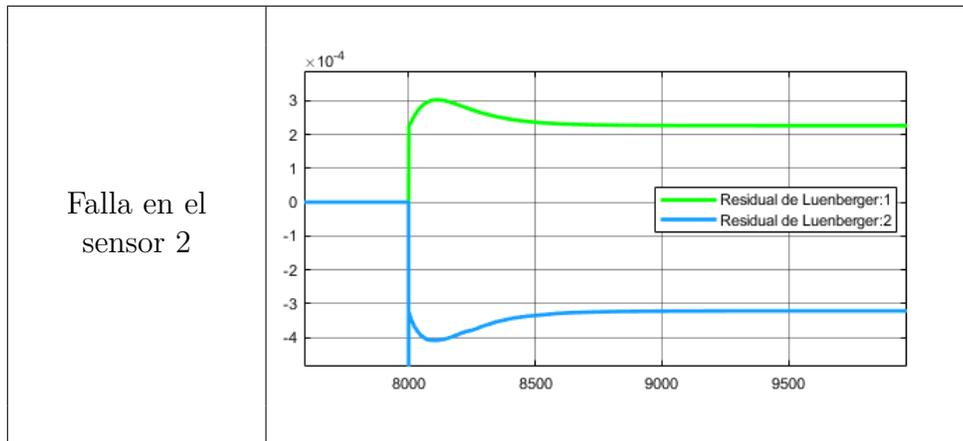


Tabla 5: Residuales del observador de Luenberger ante la presencia de las distintas fallas

En las Figuras 3.14 y 3.15 se muestra el comportamiento del primer residual debido a la presencia de todas las fallas.

En $t = 2000$ se produce la fuga en el tanque 1, provocando que el residual 1 tenga un gran cambio de magnitud negativa mientras que en el residual 2 tiene un ligero cambio pero la magnitud tiende a estabilizarse nuevamente hacia 0.

En $t = 3000$ se produce la fuga en el tanque 2, en este caso la magnitud del residual 1 aumenta pero no de manera significativa, mientras que el residual 2 sufre un cambio negativo muy notorio.

En $t = 4000$ se produce el bloqueo en la válvula de salida donde el residual 1 tiene un ligero cambio negativo, mientras que en el residual 2 tiene un significativo cambio positivo en su magnitud.

En $t = 5000$, se produce falla de la válvula de interconexión donde el residual 1 cambia positivamente mientras que el residual 2 tiene un cambio negativo pero ninguno vuelve a estabilizarse nuevamente.

En $t = 6000$ se produce una falla en el actuador, en el residual 1 se observa un gran cambio en su magnitud a un valor menor mientras que en el residual 2 disminuye por un tiempo y vuelve a estabilizarse.

En $t = 7000$ se genera la falla en el sensor 1 lo que provoca que el residual 1 tiene un gran cambio negativo en su magnitud, mientras que en el residual 2 su magnitud tiene un gran cambio de manera positiva.

Para finalizar en $t = 8000$ se produce la falla en el sensor 2, se puede observar que el residual 1 tiene un gran cambio en su magnitud de forma positiva mientras que en el residual 2 el valor de la magnitud disminuye considerablemente.

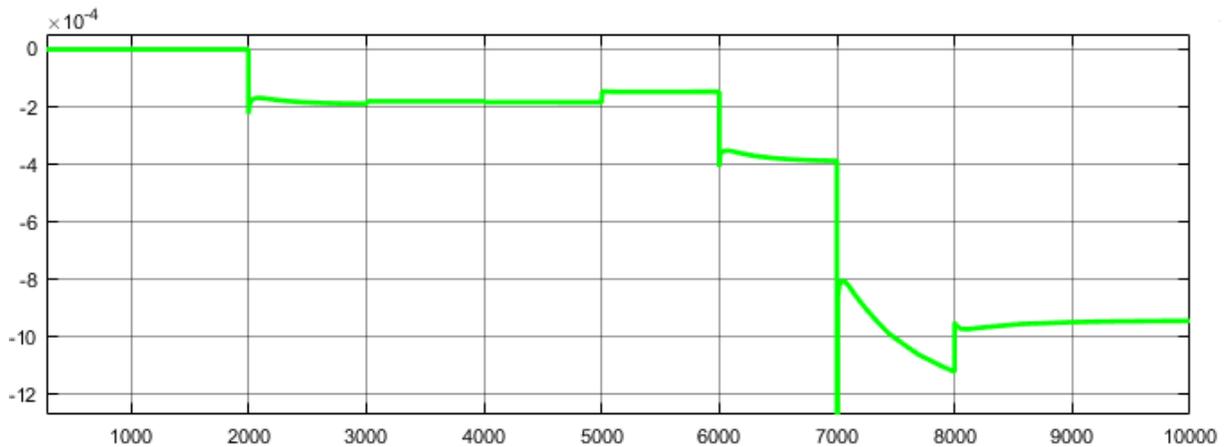


Figura 3.14: Residual 1

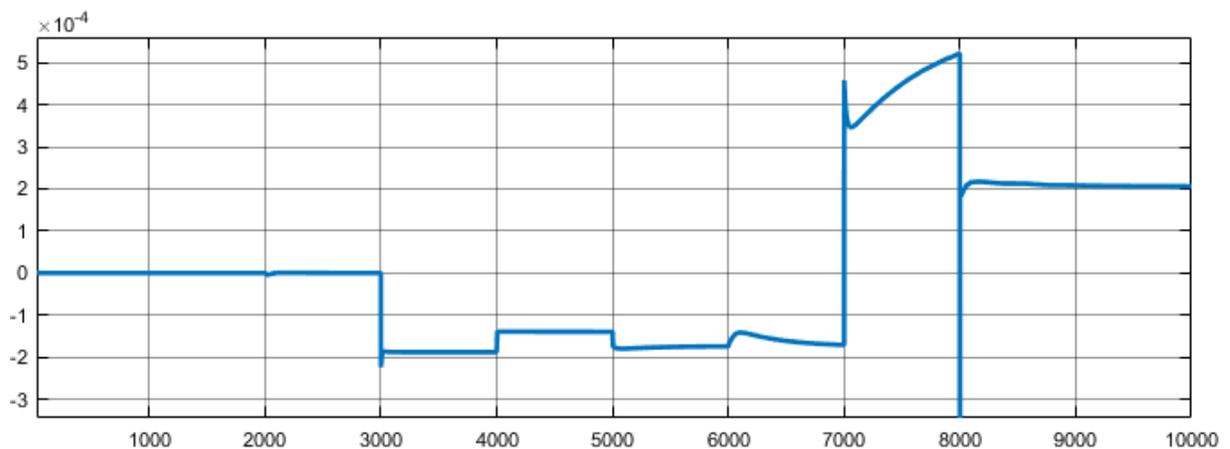


Figura 3.15: Residual 2

En conclusión las simulaciones muestran que, en efecto, en ausencia de fallas ambos residuales son cero, y al aparecer las fallas estos se desvía a otros valores. Cuando las fallas aparecen individualmente, la desviación de un solo residual es claro, tal y como muestra la

Tabla 5. Pero cuando aparecen de forma simultánea, como en las Figuras 3.14 y 3.15, las desviación de los residuales no permite identificar un patrón claro de desviación. Entonces, se diseñan otros observadores adicionales para generar más residuales, además de los dos residuales disponibles en el observador de detección.

3.5.2. Observadores de diagnóstico (OD)

En esta sección se diseñará un observador de diagnóstico para nuestro sistema de detección y diagnóstico de fallos, para ello seguiremos los pasos del algoritmo algebraico dado en la Sección 2.5.3. Previo al diseño del observador es necesario calcular sus índices de observabilidad, y determinar el valor mínimo.

■ Cálculo de los índices de observabilidad del sistema

Para el diseño de OD se debe determinar el valor s el cual se debe escoger de acuerdo a $s \geq \sigma_{\text{mín}}$, tal que:

$$\sum_{i=1}^m \sigma_i = n,$$

$$\sigma_{\text{mín}} = \min_i \sigma_i \quad (110)$$

donde:

- σ_i son los índices de observabilidad que corresponden a cada sub matriz de la matriz de observabilidad.
- $\sigma_{\text{mín}}$ es el mínimo valor de observabilidad.

Para el cálculo del mínimo valor de observabilidad la matriz C se divide en C_1 y C_2 debido a que vamos a definir a nuestro sistema con una sola salida para cada observador de diagnóstico.

Comenzaremos definiendo la matriz C_1 que tendrá como salida el primer estado y se denota en la Ecuación (111),

$$\text{Matriz } C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (111)$$

Para obtener los índices de observabilidad se obtendrán las matrices de observabilidad que se definen como en la Ecuación (112), además debe cumplir con la igualdad dada por los

rangos segun la Ecuación (113):

$$O_v = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{v-1} \end{bmatrix} \text{ notamos que } v \leq n \quad (112)$$

$$\text{rango}(O_v) = \text{rango}(O_{v+1}) \quad (113)$$

Comenzaremos calculando los rangos de las submatrices con $v = 1$ que se ven en las Ecuaciones (114) y (115):

$$\text{rango de } O_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} = 1 \quad (114)$$

$$\text{rango de } O_{v+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,095 & 0,095 \end{bmatrix} = 2 \quad (115)$$

Como se puede observar en este primer caso no se cumple la igualdad de la Ecuación (113) por lo cual aún no tenemos un minimo grado de observabilidad. Ahora se calcularán los rangos con $v = 2$:

$$\text{rango de } O_v = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,095 & 0,095 \end{bmatrix} = 2 \quad (116)$$

$$\text{rango de } O_{v+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,095 & 0,095 \\ 0,0014 & -0,0016 \end{bmatrix} = 2 \quad (117)$$

Cumplandose lo dado en la Ecuación (113), el mínimo grado de observabilidad para la salida h_1 es:

$$\sigma_{\min} = 2 \quad (118)$$

Procedemos a calcular el minimo indice de observabilidad para la matriz C_2 con el mismo procedimiento que se hizo con C_1 , dichos calculos se ven desde la Ecuación (119) hasta la Ecuación (123):

$$\text{Matriz } C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (119)$$

Definiendo $v = 1$:

$$\text{rango de } O_v = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} = 1 \quad (120)$$

$$\text{rango de } O_{v+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} = 2 \quad (121)$$

Definiendo $v = 2$:

$$\text{rango de } O_v = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} = 2 \quad (122)$$

$$\text{rango de } O_{v+1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0,095 & -0,1351 \\ -0,0016 & 0,0019 \end{bmatrix} = 2 \quad (123)$$

Cumplíndose nuevamente la igualdad de la Ecuación (113), el mínimo grado de observabilidad para la salida del tanque 2 es el valor denotado en la Ecuación (124):

$$\sigma_{\text{mín}} = 2 \quad (124)$$

Conociendo que el mínimo valor de observabilidad es 2 para ambos casos, basandonos en que $s \geq \sigma_{\text{mín}}$ estableceremos a $s = 2$.

Siguiendo el mismo procedimiento para obtener los polos deseados como se calcularon en la Sección 3.4.1 Ahora vamos a obtener los polos deseados del sistema partiendo del polinomio característico del sistema en lazo cerrado que se denotó en la Ecuación (92). Por lo tanto impusimos los siguientes valores:

- Tiempo de asentamiento de $t_s = 20$
- $\zeta = 0,3162$

Obteniendo como resultado $w_n = 0,632456 \text{rad/s}$ y el polinomio característico que deseamos se formula en la Ecuación (125):

$$s^2 + 0,4s + 0,4 \quad (125)$$

Los polos dominantes del polinomio característico de segundo orden estan dados en la Ecuación (126):

$$(s + 0,2 + 0,6i) (s + 0,2 - 0,6i) \quad (126)$$

- **Desarrollo de un observador de diagnóstico con un algoritmo de aproximación algebraica**

Con los valores previamente obtenidos de $s = 2$, procederemos a seguir los 5 pasos dados en la Sección 2.5.3 para la obtención de los OD.

- **Paso 1.** Establecer la matriz X , cuyos valores son aleatorios denotados en la Ecuación (127) y G escrita en la Ecuación (128) de acuerdo a los polos obtenidos en la Ecuación (126), cabe recalcar que m representa el número de salidas que tiene el sistema que es 1.

$$X \in R^{s \times m} \quad G = [G_O \quad g] \quad G_O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{s \times (s-1)} \quad g = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_s \end{bmatrix} \in R^s$$

$$X = \begin{bmatrix} 0,08 \\ 0,03 \end{bmatrix} \quad (127)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} \quad (128)$$

- **Paso 2.** Se procede a calcular $c(s) = \det(sI - A)$ para obtener los coeficientes a_0, a_1, \dots, a_n según la Ecuación (130):

$$c(s) = \det(sI - A)$$

$$c(s) = \det \left(s \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} \right)$$

$$c(s) = s^2 + 0,2301s + 0,003809 \quad (129)$$

$$a_0 = 0,003809, a_1 = 0,2301, a_2 = 1 \quad (130)$$

- **Paso 3.** De acuerdo con las Ecuaciones (131),(132),(133) que se muestran a continuación, ver sección 2.5.3:

$$L = -c(G)X, T = YJ \quad (131)$$

$$Y = [X \quad GX \quad \dots \quad G^{n-1}X] \quad (132)$$

$$J = \begin{bmatrix} a_nCA^{n-1} + a_{n-1}CA^{n-2} + \dots + a_2CA + a_1C \\ a_nCA^{n-2} + a_{n-1}CA^{n-3} + \dots + a_2C \\ \vdots \\ a_nC \end{bmatrix} \quad (133)$$

se calculan las matrices Y , J_1 y J_2 , teniendo en cuenta la matriz C fue redefinida en C_1 y C_2 como se establecieron en las Ecuaciones (111) y (118):

$$Y = \begin{bmatrix} 0,08 & -0,012 \\ 0,03 & 0,068 \end{bmatrix} \quad (134)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0,1351 & 0,095 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (135)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0,095 & 0,095 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (136)$$

Seguidamente, se procede a calcular las matrices T_1, T_2 y L , descritas en las Ecuaciones (138),(140) y (146) respectivamente:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 0,08 & -0,012 \\ 0,03 & 0,068 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,1351 & 0,095 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (137)$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} -0,0012 & 0,0076 \\ 0,0721 & 0,0028 \end{bmatrix} \quad (138)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0,08 & -0,012 \\ 0,03 & 0,068 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,095 & 0,095 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (139)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 0,0076 & -0,0044 \\ 0,0028 & 0,0709 \end{bmatrix} \quad (140)$$

$$c(G) = a_n G^n + a_{n-1} G^{n-1} + \dots + a_1 G + a_0 I \quad (141)$$

$$c(G) = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix}^2 + 0,2301 \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} + 0,003809 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (142)$$

$$c(G) = \begin{bmatrix} -0,3962 & 0,068 \\ -0,1699 & -0,3282 \end{bmatrix} \quad (143)$$

$$L = -c(G) X \quad (144)$$

$$L = - \begin{bmatrix} -0,3962 & 0,068 \\ -0,1699 & -0,3282 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,08 \\ 0,03 \end{bmatrix} \quad (145)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} \quad (146)$$

- **Paso 4.** Se procede a calcular las matrices C_{N1} , C_{N2} , de acuerdo con las condiciones de las Ecuaciones (147) y (148), ver Sección 2.5.3, para poder obtener los valores de W_1 y W_2 de acuerdo con la Ecuación (149) para el diseño del OD, donde $C_N \in R^{(n-m) \times n}$.

$$\text{rango} \begin{bmatrix} C \\ C_N \end{bmatrix} = n \quad (147)$$

$$CC_N^T = 0 \quad (148)$$

$$W_1 T_1 C_{N1}^T = 0 \quad (149)$$

Primero se verificó la condición de la Ecuación (147) correspondiente para el caso de $C_1 = [1 \ 0]$ para ello $C_{N1} = [0 \ 1]$, donde el rango obtenido es igual al rango de la matriz de observabilidad del sistema, por lo tanto el valor de $C_{N1} = [0 \ 1]$ es la correcta.

$$\text{rango} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_N \end{bmatrix} = \text{rango} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 2 \quad (150)$$

Dada la condición de la Ecuación (148), reemplazando con los valores de las matrices se verificó que se cumple la condición como se observa en la Ecuación (151):

$$C_1 C_{N1}^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T = 0 \quad (151)$$

Dada la última condición en la Ecuación (149) se procede a obtener los valores de la matriz W_1 mostrada en la Ecuación (153) despejando los valores de k de la Ecuación (152):

$$W_1 T_1 C_{N1}^T = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,0012 & 0,0076 \\ 0,0721 & 0,0028 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (152)$$

$$\text{Matriz } W_1 = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} \quad (153)$$

Para el caso de $C_2 = [0 \ 1]$ donde $C_{N2} = [1 \ 0]$, se realizaron los mismos procedimientos que en el caso de C_1 cuyos cálculos se resumen desde la Ecuación (154) hasta la (157), notándose que todas las condiciones de diseño se cumplen y obteniéndose la matriz W_2 dada en la Ecuación (157).

$$\text{rango} \begin{bmatrix} C_2 \\ C_{N2} \end{bmatrix} = \text{rango} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = 2 \quad (154)$$

$$C_2 C_{N2}^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T = 0 \quad (155)$$

$$W_2 T_2 C_{N2}^T = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0076 & -0,0044 \\ 0,0028 & 0,0709 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (156)$$

$$\text{Matriz } W_2 = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} \quad (157)$$

- **Paso 5.** Establezca V de acuerdo con la Ecuación (158), ver Sección 2.5.3. Como en

este caso se estan diseñando 2 OD, se necesitan de V_1 y V_2 cuyas matrices se dan en las Ecuaciones (161) y (164):

$$V = WTC^T (CC^T)^{-1}, WTC_N^T = 0 \quad (158)$$

$$V_1 = W_1T_1C_1^T (C_1C_1^T)^{-1} \quad (159)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2625 \\ 2 & -5,25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0,0012 & 0,0076 \\ 0,0721 & 0,0028 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T \left(\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \quad (160)$$

$$V_1 = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} \quad (161)$$

$$V_2 = W_2T_2C_2^T (C_2C_2^T)^{-1} \quad (162)$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2625 \\ 2 & -5,25 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,0076 & -0,0044 \\ 0,0028 & 0,0709 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T \left(\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T \right)^{-1} \quad (163)$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} \quad (164)$$

- **Paso 6.** Se calcula H_1, H_2 y Q que se obtuvieron en las Ecuaciones (167)(169) y (170) respectivamente, de acuerdo con las Ecuaciones (165) y (170).

$$H = TB - LD \quad (165)$$

$$H_1 = T_1B - LD = \begin{bmatrix} -0,0012 & 0,0076 \\ 0,0721 & 0,0028 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,0297 \\ 0,0234 \end{bmatrix} [0] \quad (166)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} 0,0061 \\ 0,3718 \end{bmatrix} \quad (167)$$

$$H_2 = T_2B - LD = \begin{bmatrix} 0,0076 & -0,0044 \\ 0,0028 & 0,0709 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0,0297 \\ 0,0234 \end{bmatrix} [0] \quad (168)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 0,0392 \\ 0,0147 \end{bmatrix} \quad (169)$$

$$Q = VD = 0 \quad (170)$$

Los modelos finales en el espacio de estados de los Observadores de Diagnóstico basandonos en las Ecuaciones (19) y (20), para el primer observador con su respectivo residual se denota a continuación en la Ecuación (171).

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0,0061 \\ 0,3718 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} y, \quad r = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} \quad (171)$$

Mientras que para el segundo observador su modelo se denota en la Ecuación (172).

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0,0392 \\ 0,0147 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} y, \quad r = \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} y \quad (172)$$

A partir de los observadores diseñados en este capítulo, se procedera a implementar en el sistema simulado en Simulink y obtener los resultados con presencia de fallas los cuales se reflejan en las Tablas 6 y 7. Los residuales correspondientes a cada observador son cualitativamente iguales en su comportamiento, notando variación en sus magnitudes, pero a diferencia del observador de Luenberguer estos tienen un comportamiento diferente.

Como se observa en la Tabla 6 correspondiente a los residuales del observador 1, las fallas se generan independientemente y se mantienen con el transcurrir del tiempo. Con el accionar de la fuga en el tanque 1 los residuales aumentan el valor de su magnitud. Al ocurrir la desconfiguración de la válvula de interconexión sucede lo contrario la magnitud de los residuales se disminuyen. Con la aparición de la fuga en el tanque 2, falla en el actuador y la falla en el sensor 1, su magnitud aumenta pero los valores en los que se estabilizan son diferentes. Por último, la falla del sensor 2 tiene un comportamiento interesante ya que tiene un ligero pico negativo pero conforme transcurre el tiempo los valores tienden a regresar a su valor previo.

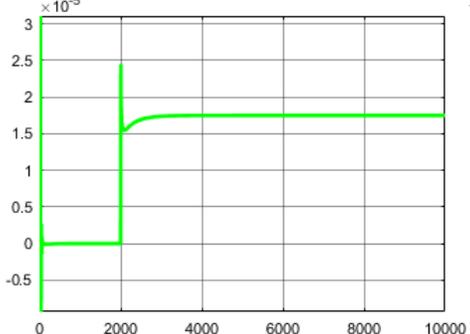
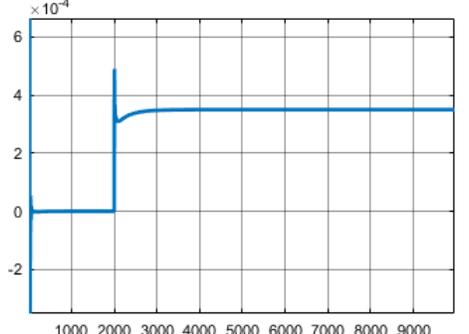
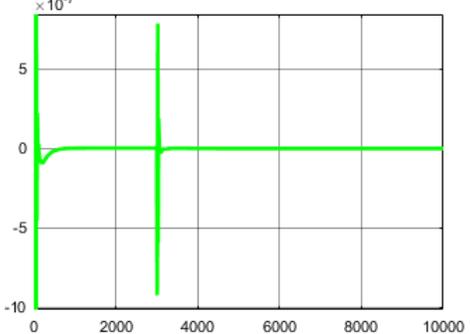
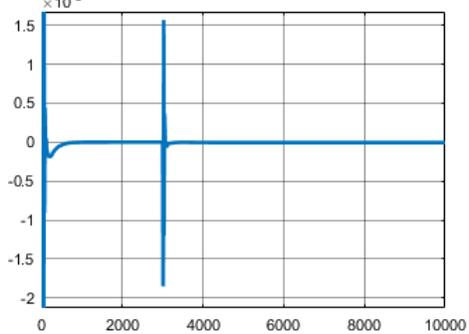
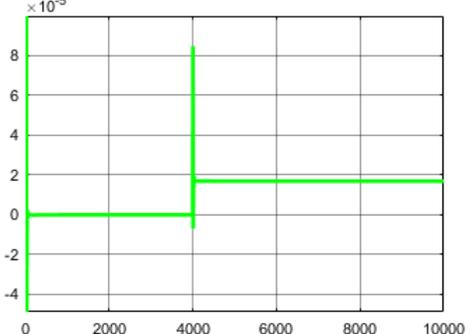
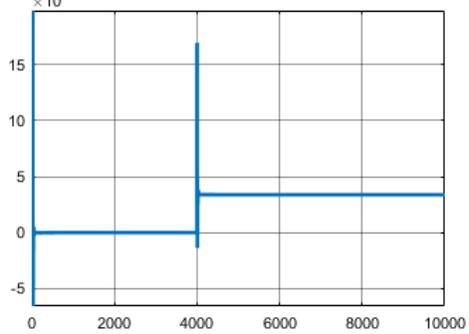
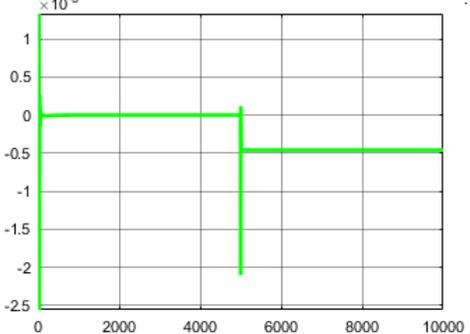
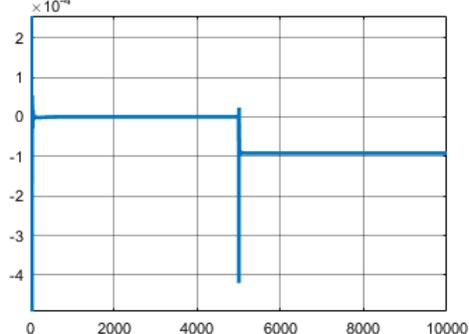
En cuanto a los residuales mostrados en la Tabla 7 se observa que las fallas de fuga en el tanque 1, fuga en el tanque 2, en el actuador y en el sensor 2, la magnitud de cada uno aumenta. Mientras que para la falla en la desconfiguración de la válvula de salida y en el sensor 2 ocurre lo contrario su magnitud disminuye y se estabiliza en otro valor. Para finalizar en la desconfiguración de la válvula de interconexión se puede observar en los residuales que se generan unos picos cuando esta ocurre pero con el pasar del tiempo sus valores vuelven a estabilizarse en el valor anterior.

Los valores y comportamientos de todos los residuales en conjunto se analizarán con mucha mas profundidad en la Sección 4.2.

Falla	Residual 1 Observador 1	Residual 2 Observador 1
Fuga en el tanque 1	<p>Graph showing Residual 1 (green line) for 'Fuga en el tanque 1'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-5}$ and ranges from 0 to 8. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 2000, then spikes to about 8.5 and stabilizes at approximately 2.5.</p>	<p>Graph showing Residual 2 (blue line) for 'Fuga en el tanque 1'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-4}$ and ranges from 0 to 20. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 2000, then spikes to about 18 and stabilizes at approximately 5.</p>
Desconfiguración en la válvula de interconexión	<p>Graph showing Residual 1 (green line) for 'Desconfiguración en la válvula de interconexión'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-7}$ and ranges from -20 to 5. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 3000, then drops to about -18 and stabilizes at approximately -13.</p>	<p>Graph showing Residual 2 (blue line) for 'Desconfiguración en la válvula de interconexión'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-5}$ and ranges from -5 to 1. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 3000, then drops to about -4.5 and stabilizes at approximately -2.5.</p>
Fuga en el tanque 2	<p>Graph showing Residual 1 (green line) for 'Fuga en el tanque 2'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-5}$ and ranges from -1 to 3. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 4000, then spikes to about 2.5 and stabilizes at approximately 1.5.</p>	<p>Graph showing Residual 2 (blue line) for 'Fuga en el tanque 2'. The y-axis is scaled by $\times 10^{-4}$ and ranges from -2 to 6. The x-axis ranges from 0 to 10000. The residual is at 0 until approximately 4000, then spikes to about 4.5 and stabilizes at approximately 3.5.</p>

Falla	Residual 1 Observador 1	Residual 2 Observador 1
Desconfiguración en la válvula de salida		
Falla en el actuador		
Falla en el sensor 1		
Falla en el sensor 2		

Tabla 6: Residuales del observador de diagnóstico 1 ante la presencia de fallas.

Falla	Residual 1 Observador 2	Residual 2 Observador 2
Fuga en el tanque 1		
Desconfiguración en la válvula de interconexión		
Fuga en el tanque 2		
Desconfiguración en la válvula de salida		

Falla	Residual 1 Observador 2	Residual 2 Observador 2
Falla en el actuador		
Falla en el sensor 1		
Falla en el sensor 2		

Tabla 7: Residuales del observador de diagnóstico 2 ante la presencia de fallas.

A continuación en la Tabla 8 se muestran los resultados de los residuales cuando las fallas actúan simultáneamente.

Observador	Residuales
Observador 1 Residual 1	
Observador 1 Residual 2	
Observador 2 Residual 1	
Observador 2 Residual 2	

Tabla 8: Residuales de los observadores de diagnóstico ante la presencia de todas las fallas

3.6. Discretización del observador de Luenberger y observador de diagnóstico

La discretización del modelo forma parte importante al momento de realizar la implementación del mismo, sabiendo que en la vida real los sistemas no son continuos en el tiempo lo que obliga a tomar muestras periódicamente para lograr aproximar lo mejor posible el modelo por medio de este método.

■ Tiempo de muestreo

Para obtener el tiempo de muestreo T vamos a tomar en cuenta que va a ser 10 veces más rápido que la constante de tiempo del sistema controlado. La constante de tiempo τ está dando en función de $h_1(t = \tau) = 0,63H_1$, por lo tanto tomando en cuenta que el sistema se estabiliza en $H_1 = 0,6771 m$, la constante de tiempo es:

$$h_1(\tau) = 0,63 * 0,6771 = 0,426573 m \quad (173)$$

Ahora, verificando el tiempo obtenido en la Figura 3.16 que corresponde a la altura $H_2 = 0,426573 m$ se tiene:

$$\tau = 35,5s \quad (174)$$

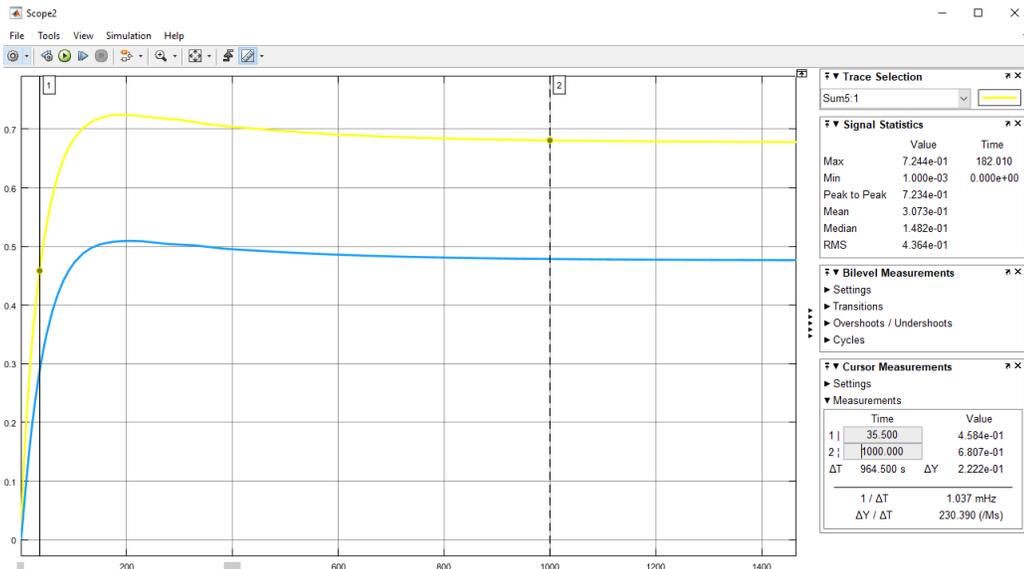


Figura 3.16: Tiempo de muestreo Observadores

Con eso podemos calcular el tiempo de muestreo T el cual sería el valor obtenido en la Ecuación (175):

$$T = \frac{\tau}{10} = \frac{35,5}{10} = 3,55s \quad (175)$$

■ **Discretización del observador de Luenberger usando el método de Euler (atrás/backward)**

Dada la aproximación a la derivada en la Ecuación(176), donde T es el tiempo de muestreo.

$$\frac{dx(k+1)}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (176)$$

Partiendo del modelo de estados del observador generalizado:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (177)$$

$$\dot{\hat{x}} = \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} \hat{x} + \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} (y - \hat{y}) \quad (178)$$

$$r = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x} \quad (179)$$

Dado que $t = (k + 1)$, la ecuación de estado en tiempo discreto tendrá la forma:

$$\frac{\hat{x}(k+1) - \hat{x}(k)}{T} = A\hat{x}(k+1) + Bu(k+1) + Ly(k+1) - L\hat{y}(k+1) \quad (180)$$

$$\hat{x}(k+1) - \hat{x}(k) = AT\hat{x}(k+1) + BTu(k+1) + LTy(k+1) - LT\hat{y}(k+1) \quad (181)$$

$$[I - AT]\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + BTu(k+1) + LTy(k+1) - LT\hat{y}(k+1) \quad (182)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= [I - AT]^{-1} \hat{x}(k) + [I - AT]^{-1} BT u(k+1) \\ &\quad + [I - AT]^{-1} LT y(k+1) - [I - AT]^{-1} LT \hat{y}(k+1) \end{aligned} \quad (183)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) &= [I - AT]^{-1} \hat{x}(k-1) + [I - AT]^{-1} BT u(k) \\ &\quad + [I - AT]^{-1} LT y(k) - [I - AT]^{-1} LT \hat{y}(k) \end{aligned} \quad (184)$$

$$r(k) = Cx(k) - C\hat{x}(k) \quad (185)$$

Cálculo del observador de Luenberger discretizado:

Sustituyendo las matrices correspondientes en las Ecuación (184) y Ecuación (185), se obtiene:

$$\begin{aligned} \hat{x}(k) = & \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \hat{x}(k-1) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \\ & \begin{bmatrix} 5,16 \\ 0 \end{bmatrix} Tu(k) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} Ty(k) - \\ & \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -0,095 & 0,095 \\ 0,095 & -0,1351 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} T \hat{y}(k) \quad (186) \end{aligned}$$

$$r(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x(k) - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{x}(k) \quad (187)$$

■ Discretización del observador de diagnóstico (OD) usando el método de Euler (atrás/backward)

Considerando de nuevo la aproximación a la derivada, donde T es el tiempo de muestreo:

$$\frac{dx(k+1)}{dt} = \frac{x(k+1) - x(k)}{T} \quad (188)$$

y dado el modelo de estados del observador de diagnóstico:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= Gz + Hu + Ly \\ r &= Vy - Wz - Qu \end{aligned} \quad (189)$$

se obtienen los modelos discretos de los dos OD diseñados, tomando en cuenta cada una de las salidas del modelo que serán las alturas $h1$ y $h2$, por lo tanto tenemos:

- Salida $h1$:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0,0061 \\ 0,3718 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} y \quad (190)$$

$$r = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} y - \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z \quad (191)$$

- Salida $h2$:

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0,0392 \\ 0,0147 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} y \quad (192)$$

$$r = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} y - \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z \quad (193)$$

Dado que $t = (k + 1)$, la ecuación de estado en tiempo discreto deseada tendrá la forma:

$$\frac{z(k+1) - z(k)}{T} = Gz(k+1) + Hu(k+1) + Ly(k+1) \quad (194)$$

$$z(k+1) - z(k) = GTz(k+1) + HTu(k+1) + LTy(k+1) \quad (195)$$

$$[I - GT]z(k+1) = z(k) + HTu(k+1) + LTy(k+1) \quad (196)$$

$$z(k+1) = [I - GT]^{-1}z(k) + [I - GT]^{-1}HTu(k+1) + [I - GT]^{-1}LTy(k+1) \quad (197)$$

$$z(k) = [I - GT]^{-1}z(k-1) + [I - GT]^{-1}HTu(k) + [I - GT]^{-1}LTy(k) \quad (198)$$

$$r(k) = Vy(k) - Wz(k) \quad (199)$$

Cálculo del observador de diagnóstico discretizado:

- Salida $h1$:

$$z(k) = [I - GT]^{-1} z(k-1) + [I - GT]^{-1} HT u(k) + [I - GT]^{-1} LTy(k) \quad (200)$$

$$z(k) = \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} z(k-1) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0061 \\ 0,3718 \end{bmatrix} Tu(k) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} Ty(k) \quad (201)$$

$$r(k) = Vy(k) - Wz(k) \quad (202)$$

$$r(k) = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} y(k) - \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z(k) \quad (203)$$

■ Salida $h2$:

$$z(k) = [I - GT]^{-1} z(k-1) + [I - GT]^{-1} HT u(k) + [I - GT]^{-1} LTy(k) \quad (204)$$

$$z(k) = \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} z(k-1) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0392 \\ 0,0147 \end{bmatrix} Tu(k) + \left[\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -0,4 \\ 1 & -0,4 \end{bmatrix} T \right]^{-1} \begin{bmatrix} 0,0279 \\ 0,0234 \end{bmatrix} Ty(k) \quad (205)$$

$$r(k) = Vy(k) - Wz(k) \quad (206)$$

$$r(k) = \begin{bmatrix} -0,0193 \\ -0,3867 \end{bmatrix} y(k) - \begin{bmatrix} 0,1 & -0,2667 \\ 2 & -5,33 \end{bmatrix} z(k) \quad (207)$$

4. Resultados: Validación y pruebas del diseño

En este capítulo se realizará un análisis de los resultados obtenidos con la implementación tanto del observador de diagnóstico, así como del observador de Luenberger aplicados a sistema de tanques interconectados. Se presentará una sección en la cual se explicará la Implementación en tiempo Real usando una simulación *Software In the Loop* bajo el protocolo MQTT, y además se presentará una sección en la cuál se realizará el análisis de resultados con base en el resultado del comportamiento del sistema en condición normal y con presencia de fallas.

4.1. Implementación en tiempo real (software in the loop)

Para la implementación del sistema de monitoreo se realizó una interfáz en el software LabVIEW la cual consta de dos partes: (i) Una primera parte se encontrará en una laptop que simulará el sistema de tanques interconectados en sus puntos de operación y además en la interfaz mencionada se podrán activar cada una de las 7 fallas que se pueden presentar en el sistema como se muestra en la Figura (4.2), (ii) Una segunda parte de la interfáz se encontrará en una diferente laptop la cual simulará el observador de diagnóstico junto con el observador generalizado de Luenberger, en esta parte se podrá mediante las gráficas detectar las fallas simuladas que se pueden presentar en el modelo como se observa en la Figura (4.3) .

Los programas de LabVIEW se denominan instrumentos virtuales, o VI, porque su apariencia y funcionamiento imitan instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros. LabVIEW contiene un conjunto completo de herramientas para adquirir, analizar, mostrar y almacenar datos, así como herramientas para ayudarlo a solucionar problemas en el código que escribe. En LabVIEW, usted construye una interfaz de usuario, o panel frontal, con controles e indicadores. Los controles son perillas, botones pulsadores, diales y otros mecanismos de entrada. Los indicadores son gráficos, LED y otras pantallas de salida. Después de construir el panel frontal, agrega código usando VIs y estructuras para controlar los objetos del panel frontal. El diagrama de bloques contiene este código.

Los programadores desarrollan aplicaciones de software todos los días para aumentar la eficiencia y la productividad en diversas situaciones. LabVIEW, como lenguaje de programación, es una herramienta poderosa que puede usarse para ayudar a lograr estos objetivos. Su naturaleza gráfica lo hace ideal para aplicaciones de medición, automatización, control de instrumentos, adquisición de datos y análisis de datos. Esto da como resultado mejoras de

productividad significativas en comparación con los lenguajes de programación convencionales. Welch y Shearman, 2012.

Para la implementación de este trabajo, para el envío de datos entre computadoras se utilizó el protocolo de comunicación MQTT, para el cual se especificó que son necesarios tres componentes: un Broker MQTT, un editor, y un cliente, ver Sección 2.7. El Broker MQTT que se utilizó es el maqiatto.com, el cual permite utilizar 3 tópicos en su versión gratuita, los cuales son suficientes para los datos que necesitamos enviar de ordenador a ordenador.

La comunicación realizada para el sistema de monitoreo se observa de forma gráfica en la Figura (4.1), donde el editor que corresponde al ordenador 1 donde se encuentra el sistema no lineal controlado implementado en LabVIEW, el cual publica los datos al broker a través de los tópicos /nivel1, /nivel2 y /flujo, correspondientes a los valores de los sensores de nivel de tanque 1, 2 y del flujo de entrada que brinda el llamado “SISTEMA DE CONTROL DE UNA CLASE DE PROCESO INDUSTRIAL SUJETO A FALLA”, cuya interfaz se muestra en la Figura (4.2). El broker se encarga de recibir los datos que le brinda el editor y los publica hacia el cliente que en este caso es el ordenador 2 ya que este se encuentra suscrito a los 3 tópicos para recibir los datos y luego procesarlos en el llamado “SISTEMA DE MONITOREO DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESO INDUSTRIAL”, implementado en LabVIEW, para la detección y diagnóstico de fallos, cuya interfaz se muestra en la Figura (4.3).

En la interfaz de control del sistema que muestra la Figura (4.2), sus gráficas reflejan los niveles de los tanques reales y los valores de los sensores, ya que en la fallas de sensores y actuadores los valores reales no coinciden con los sensores. Además la gráfica de la magnitud del control nos sirve para apreciar que en ningún momento la válvula que entrega el flujo de ingreso sobrepase su valor máximo. En esta interfaz existen botones que permiten que se generen la activación de las fallas en el sistema y slides que modifican la magnitud de la falla a generarse que puede ser del 10% al 100% como se muestra en la interfaz.

En la interfaz del sistema de monitoreo que se muestra en la Figura (4.3), se presentan los 6 residuales que se generan con los observadores diseñados, los cuales nos van a permitir detectar y diagnosticar la falla que ocurrió en el sistema. Además cuenta con un panel de alarmas cuyos indicadores se encienden de acuerdo a una serie de condiciones que tiene el sistema basandose en los valores de cada residual. Por ultimo el sistema cuenta con botones para cada indicador que permiten que el indicador se apague que el la practica seria de gran ayuda si la falla llegara a solucionarse.

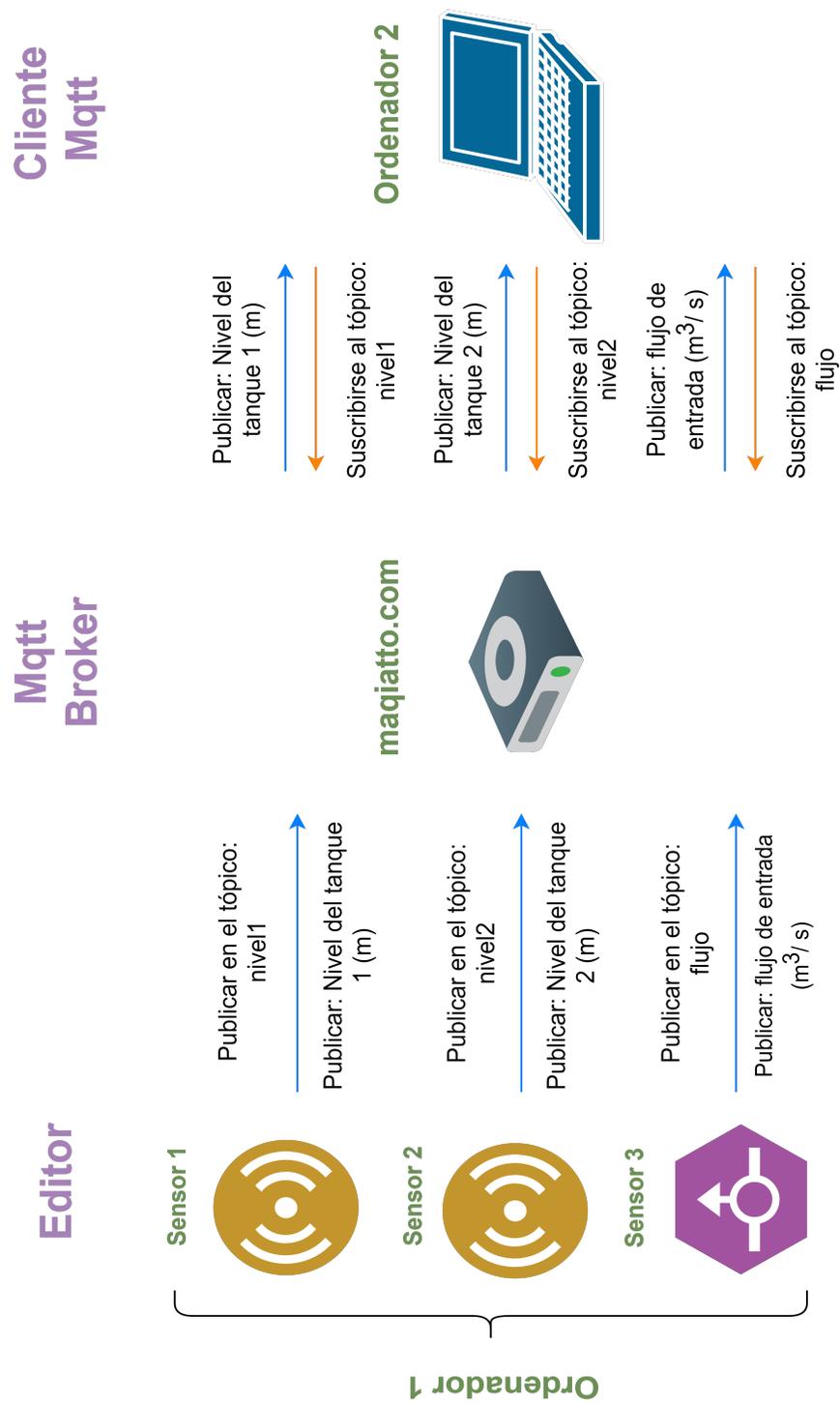


Figura 4.1: Protocolo de comunicación MQTT entre 2 ordenadores utilizado para el sistema de detección y diagnóstico de fallas en una clase de proceso industrial

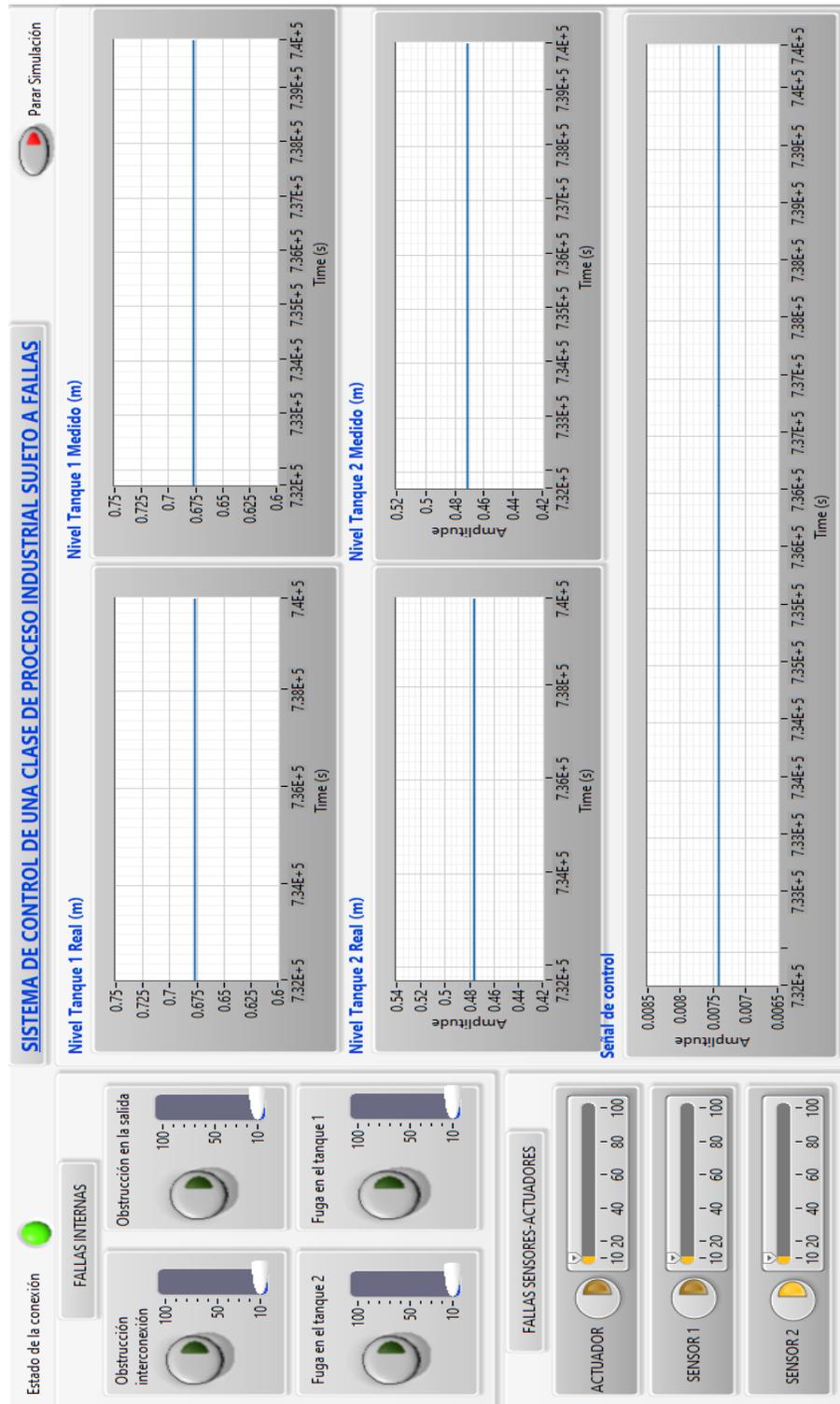


Figura 4.2: Interfaz Sistema de control de una clase de proceso industrial sujeto a fallas.

SISTEMA DE MONITOREO DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESO INDUSTRIAL

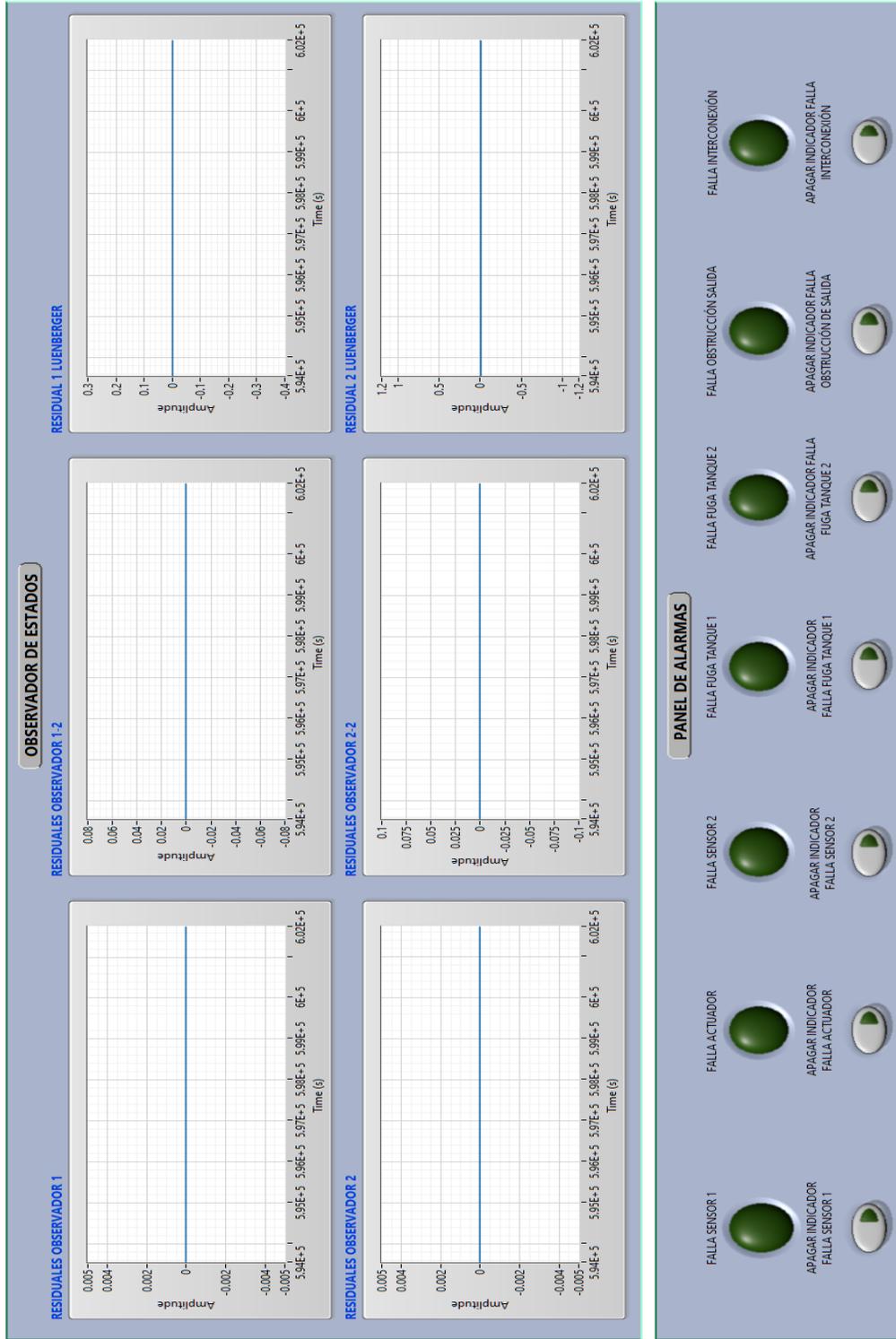


Figura 4.3: Sistema de Monitoreo de Fallas en una clase de proceso Industrial.

4.2. Análisis de resultados

Al igual que en las simulaciones realizadas con anterioridad en el Capítulo 3 vamos a simular los mismos escenarios para poder visualizar y analizar el comportamiento de los residuales de los Observadores de Diagnóstico y Luenberger. El sistema se estableció con los siguientes parámetros:

- Flujo de entrada de $0,007403 [m^3/s]$
- Tiempo de muestreo de $3,55 s$.
- Las condiciones iniciales del sistema se establecieron en el valor de 0.
- Puntos de operación del sistema en $h_1 = 0,6771 m$ y $h_2 = 0,4760 m$.

Luego de haber establecido los parámetros, se procedió a realizar las pruebas del sistema de detección de fallos obteniendo los siguientes resultados:

1. El Sistema de Tanques Interconectados fue llevado a los puntos de operación como se observa en la Figura 4.2, que como se puede notar son los niveles a los cuales el sistema va a trabajar en la condición nominal. En la Figura 4.3 se visualiza el comportamiento nominal de los residuales de ambos observadores sin presencia de fallas, cabe mencionar que estos residuales no son exactamente cero como se espera en ausencia de fallos, pero si toman un valor muy cercano a éste. Esto se debe a que la dinámica del observador con respecto a la planta no lineal no son las mismas, por lo tanto esto provoca un pequeño error que a su vez se puede considerar insignificante para la simulación del modelo. A pesar de esto, los resultados obtenidos son lo suficientemente buenos por lo que se procedió a generar las fallas en el sistema de Tanques Interconectados.
2. La primera falla (Fuga en el tanque 1) visualizada en la Figuras 4.4 y 4.5 en las cuales se muestra el comportamiento del sistema ante la presencia de esta falla generada con un flujo que va a simular la fuga en el tanque. Las salidas reales y estimadas ante esta falla tienden a disminuir, pero el controlador logra compensar la falla, y al transcurrir el tiempo el sistema vuelve a estabilizarse en su punto de operación y continua operando en modo de falla. En este caso los residuales del Observador de Diagnóstico tienden a tener un cambio considerable de manera positiva, en cambio los residuales del Observador de Luenberger tienden a tener un cambio negativo no tan considerable. Finalmente luego de presentarse estos cambios vuelven a estabilizarse los residuales en un valor cercano a cero,

3. Para la falla 2 (Obstrucción en la válvula de Interconexión) visualizada en las Figuras 4.6 y 4.7, se seleccionó un valor que altere la constante resistencia fluídica de la válvula, por lo cual esto va a afectar en el flujo de agua desde el tanque 1 hacia el tanque 2, simulando así una obstrucción entre los tanques. Las salidas reales y estimadas ante la presencia de esta falla tienden a aumentar debido a que al pasar menos fluido entre los tanques provoca que el tanque 1 al ser el que recibe el fluido aumente su nivel de manera considerable, pero el sistema trata de controlar esto hasta lograrlo y hacer que vuelva a estabilizarse y seguir su funcionamiento. Los residuales del observador de diagnóstico en este caso tienen un pequeño cambio negativo, en cambio los residuales del Observador de Luenberger tienen un cambio pequeño de manera positiva, luego de presentarse estos cambios en los residuales se estabilizan en un valor cercano a cero.
4. Para generar la falla 3 (Fuga en el tanque 2) se toma el mismo principio generado en la primera falla, por lo cual con un flujo simulado como fuga del tanque 2 se puede observar en las Figuras 4.8 y 4.9. Las salidas reales y estimadas en este caso ante la presencia de la falla tienden a bajar su nivel debido a la fuga, pero el controlador realizar su trabajo y trata de mantener el sistema en su punto de operación y que pueda continuar en funcionamiento luego de la falla. Los primeros residuales del Observador de Diagnóstico en este caso tienen pequeños cambios negativos, en cambio los segundos residuales de este mismo observador tienden a tener un cambio positivo pero no tan considerable, ahora en el caso de el primero Observador de Luenberger se tiene un cambio pequeño de manera positiva y para el segundo residual se da lo contrario el cambio es negativo y de igual magnitud que el primero. Finalmente luego de presentarse los cambios los residuales se estabilizan en un valor cercano a cero.
5. Una cuarta falla (Obstrucción en la válvula de salida) para la cual se tomó el mismo principio con el cual se genero la falla 2, por lo cual con un valor que altera la resistencia fluídica en la válvula de salida se observa el comportamiento en las Figuras 4.10 y 4.11. En este caso las salidas reales y estimada del sistema tienden a subir pero no exageradamente como en la falla de interconexión debido a que en este caso el tanque 2 no esta directamente recibiendo el flujo desde la válvula, el control se encarga de que el sistema vuelva a su punto de operación y funcionamiento normal. En este caso los residuales del Observador de Diagnóstico tienen un ligero cambio negativo, en cambio los residuales del Observador de Luenberger solo se ve reflejado en el segundo residual un pequeño cambio positivo. Luego de los cambios los residuales se estabilizan en valores cercanos a cero.

6. La falla 5 (Falla de Actuador) visualizada en las Figuras 4.12 y 4.13 se puede generar mediante un cambio en el porcentaje de flujo que nos va a entregar esta al sistema por lo que se multiplica un valor directamente en el flujo que proporcional válvula al sistema y se tiene una mayor o menor entrada de fluido al sistema de tanques interconectados. En este caso se va a considerar un flujo de ingreso del 10% menos del flujo normal por lo tanto las salidas reales y estimadas tienden a tener un decrecimiento considerable debido a que el sistema esta recibiendo mucho menos fluido de lo esperado, pero gracias al controlador que inmediatamente permite mayor flujo de infreso para que el sistema se pueda estabilizar y seguir funcionando normalmente luego de esta falla. Los residuales del Observador de Diagnóstico en este caso tienen un cambio considerable de manera positiva lo cual permite tener una mejor detección de falla, mientras que los residuales del Observador de Luenberger generan un ligero cambio negativo en su magnitud. Finalmente estos residuales se estabilizan luego de un tiempo en un valor cercano a cero.
7. Para generar la falla 6 (Falla Sensor 1) visualizada en las Figuras 4.14 y 4.15 se resta un porcentaje del valor medido que va a alterar la medición real del sensor, en este caso para la falla de sensor 1 le restó un 20% del valor que nos provee la planta y esto modifica la medición final de la altura del tanque, es decir que la medición se va a ver reflejada en un valor mucho menor al que realmente se tiene en el modelo. El controlador al detectar un nivel menor en el tanque va a proveer de mayor flujo provocando que el sistema se sala de su punto de operación real, ya que el medido vuelve a su estado normal por acción del controlador, pero los niveles reales no están controlados. Los residuales del Observador de Diagnóstico tienen un cambio grande de manera positiva lo cual permite tener una mejor detección de la falla, en cambio en los Observadores de Luenberger se da de manera diferente, el primer residual tiene un cambio significativo de manera negativa y el segundo residual tambien de manera negativo pero el cambio es bastante pequeño. Finalmente luego de presentarse esos cambios los residuales se vuelven a estabilizar en valores cercanos a cero.
8. Para la última falla (Falla Sensor 2) visualizada en las Figuras 4.16 y 4.17 se toma el mismo principio que se realizo para la falla de sensor 1 solo que en este caso se le restó un 10% al sistema y de igual manera se va a ver reflejado con un valor mucho menor en la medición de nivel, en este caso se tiene una pequeña diferencia debido a que el nivel del tanque 2 no tiene controlador el sistema se sale del punto de operacion medido y no regresa a su estado normal. Los residuales del Observador de Diagnóstico en este caso tienden a tener un cambio considerable de manera negativa lo cual permite tener una

mejor detección de la falla, en cambio en los residuales del Observador de Luenberger se tienen cambios positivos en ambos casos solo que en el primer residual de manera mas considerable que en el segundo residual. Luego de darse los cambios los residuales se vuelven a estabilizar en valores cercanos a cero.

La respuesta del controlador ante la presencia de las fallas presentadas al sistema fue satisfactorio, se pudo diseñar de tal manera que pueda actuar de la manera mas óptima, es decir, realizando un control suave, con tiempo de respuesta apropiada ante las variaciones que se puedan presentar en el sistema.

La presencia de fallas puede provocar que el sistema salga de los puntos de operación de manera considerable en caso de que las fallas sean significativas. Para efectos de la simulación, se consideraron condiciones de falla que puedan permitir que el controlador pueda ejercer su tarea de manera eficaz y comprobando que es funcional para la aplicación en la que se esta trabajando.

El control es eficaz en todos los casos de falla que se han propuesto, excepto en el caso de fallas en el actuador y los sensores. En esta situación, el controlador puede no mantener al sistema en el punto de operación. Por ejemplo, en caso de las fallas en los sensores la señal realimentada no es la real, por ello el controlador no puede compensar este error de sensado, esto es, las señales reales y las medidas por el sensor ante este tipo de fallas no van a ser las mismas provocando que el sistema salga del punto de operación. Para la falla en el actuador, el flujo de entrada no esta relacionado con el propuesto por el controlador, haciendo que el nivel del tanque 1 no quede controlado a la referencia. Es por esto que es necesario, en un trabajo futuro, diseñar un control tolerante a fallos, una vez detectada su existencia.

Respecto a los observadores, se puede resaltar que se pudo hacer un diseño que permite que los residuales presentados den respuestas acertadas ante la presencia de los fallos en el sistema. Dado el comportamiento diferenciable en cuanto a la magnitud de los residuales, se va a poder realizar un buen análisis para la detección de fallas, además sabiendo que cada falla va a tener un comportamiento diferente que se va a reflejar en cada uno de los residuales tanto del Observador de Diagnóstico como en el Observador de Luenberger. Esta característica va a facilitar la detección de cada una de estas fallas presentadas, y así poder implementar el sistema de detección de fallos, que es el objetivo por el cual se trabajó en este proyecto de titulación.

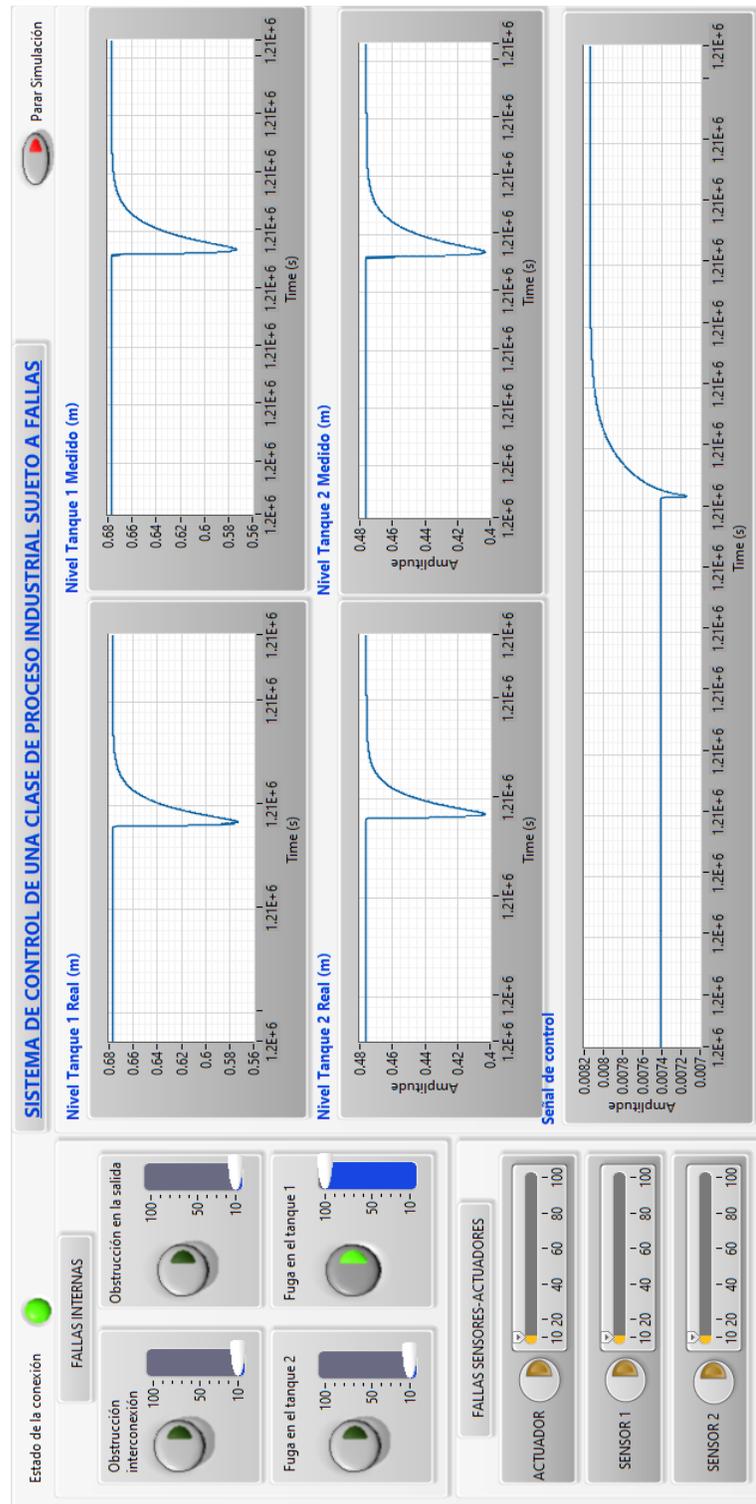


Figura 4.4: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de fuga en el tanque 1.

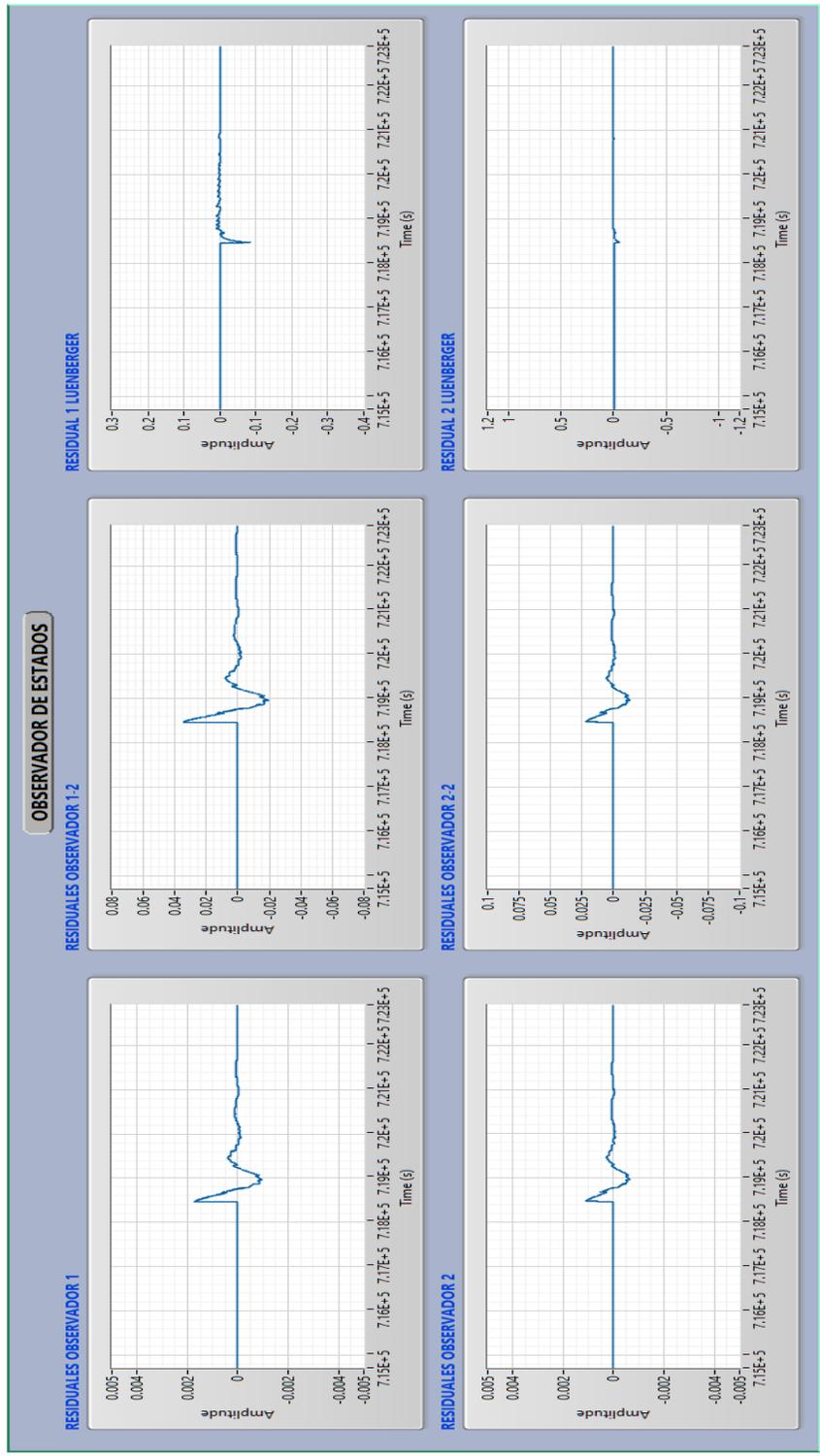


Figura 4.5: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla fuga tanque 1.

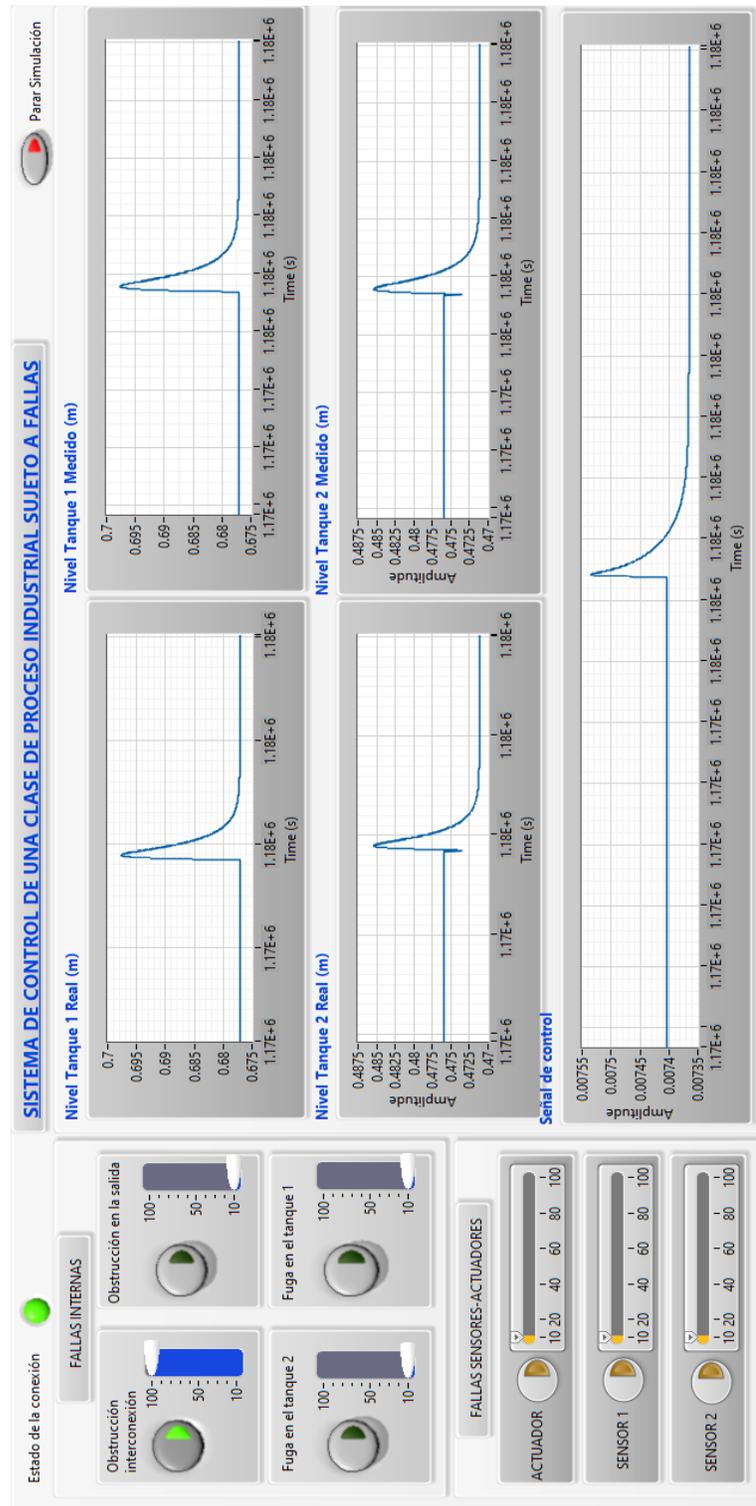


Figura 4.6: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de interconexión.

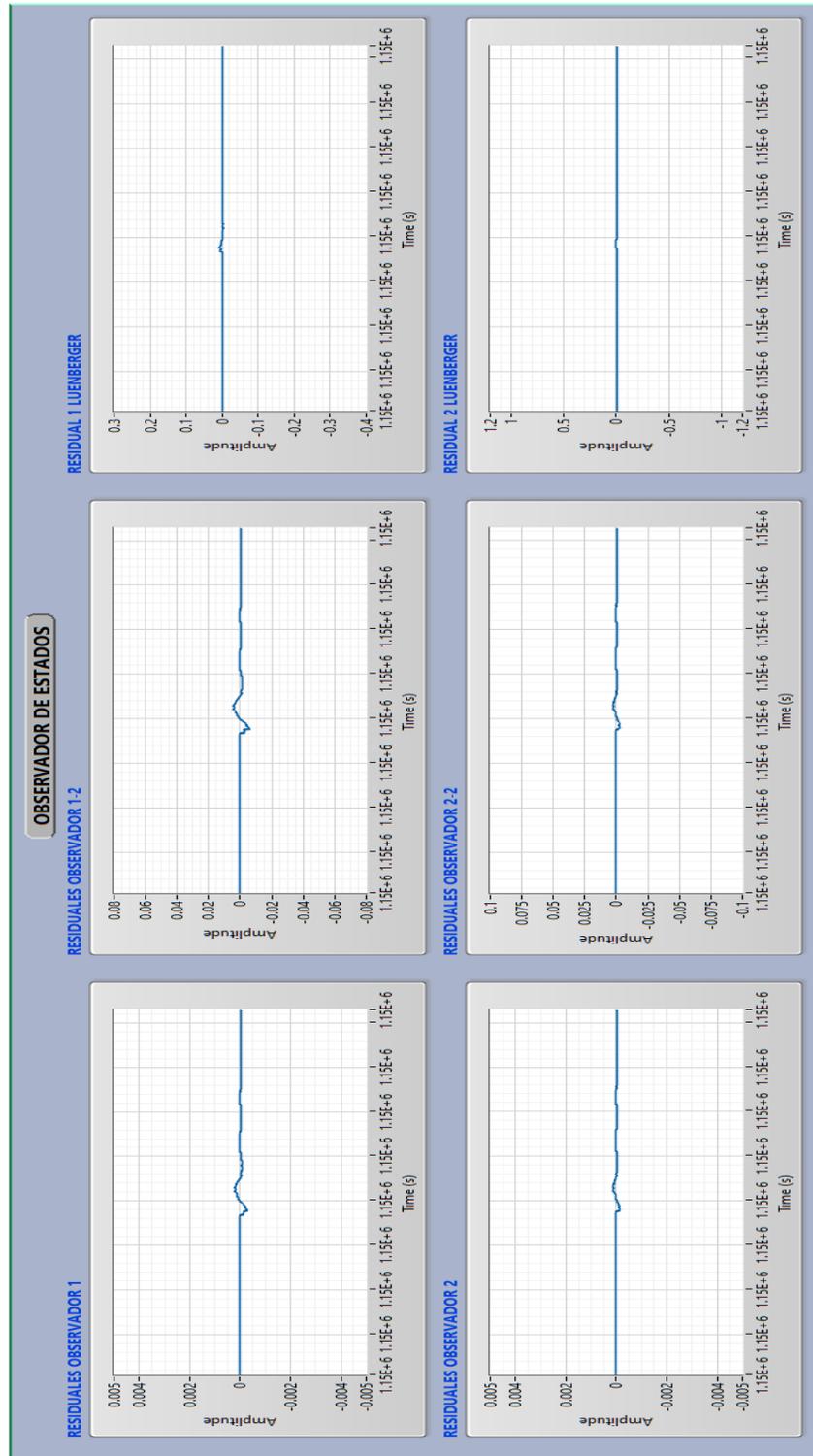


Figura 4.7: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla de interconexión.

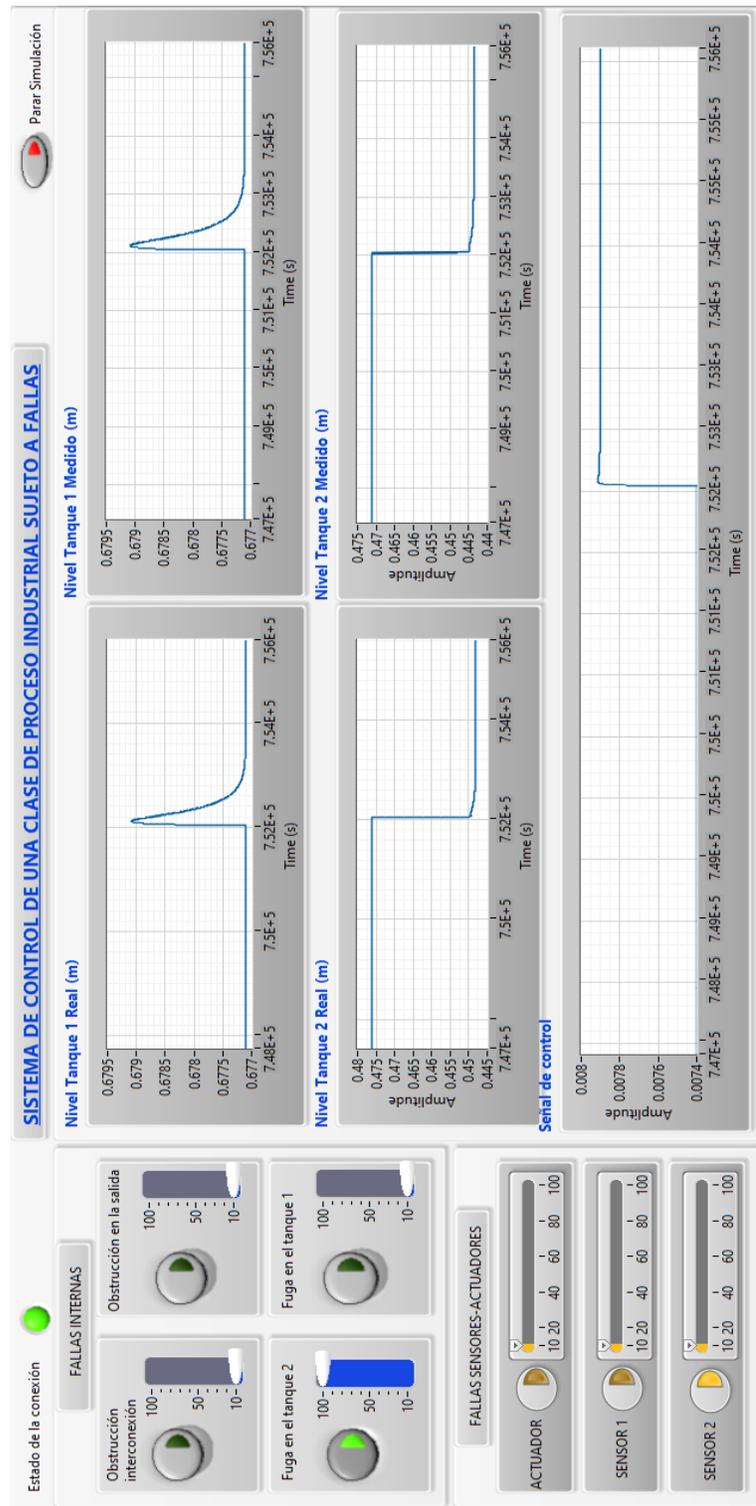


Figura 4.8: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla de fuga en el tanque 2.

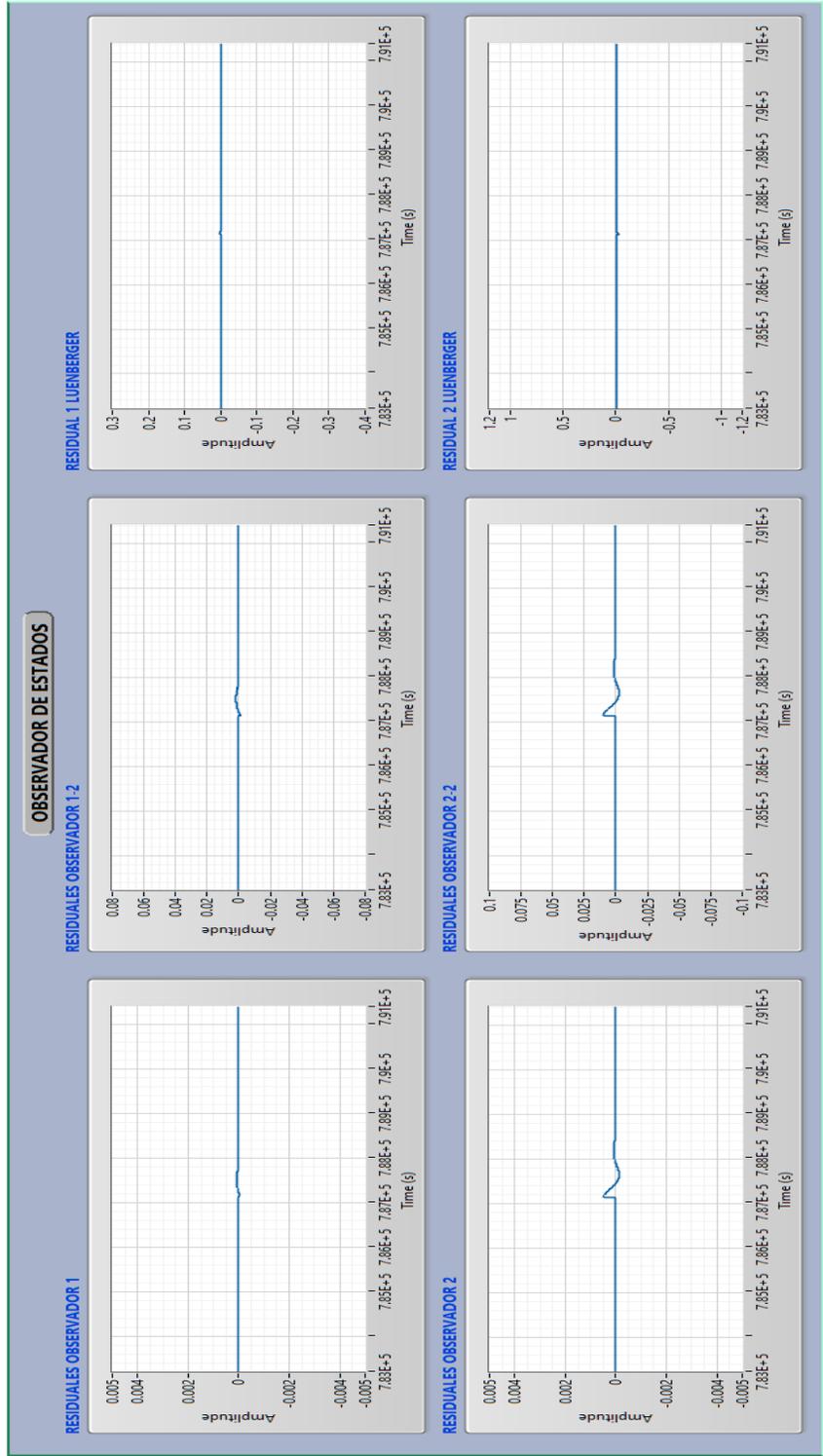


Figura 4.9: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla fuga tanque 2.

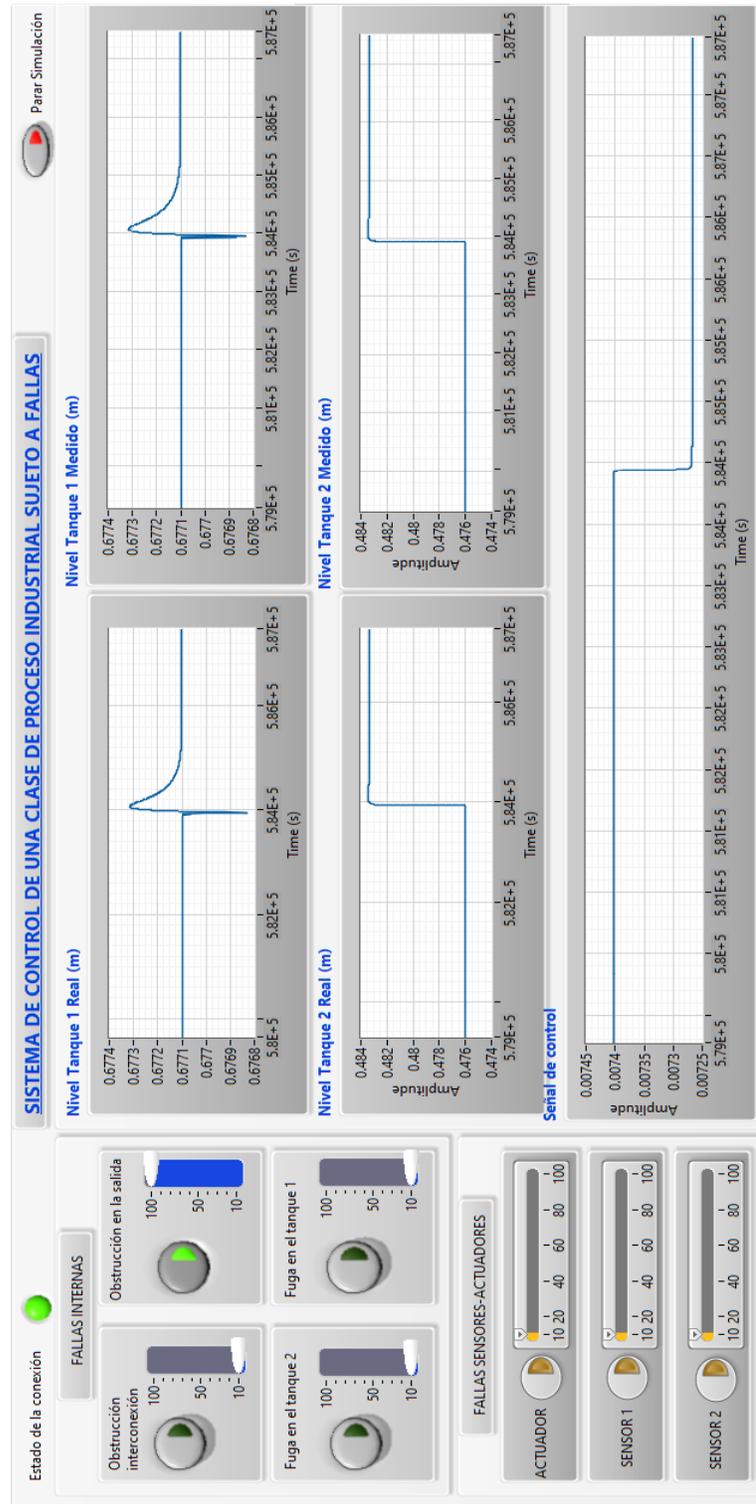


Figura 4.10: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla obstrucción de salida.

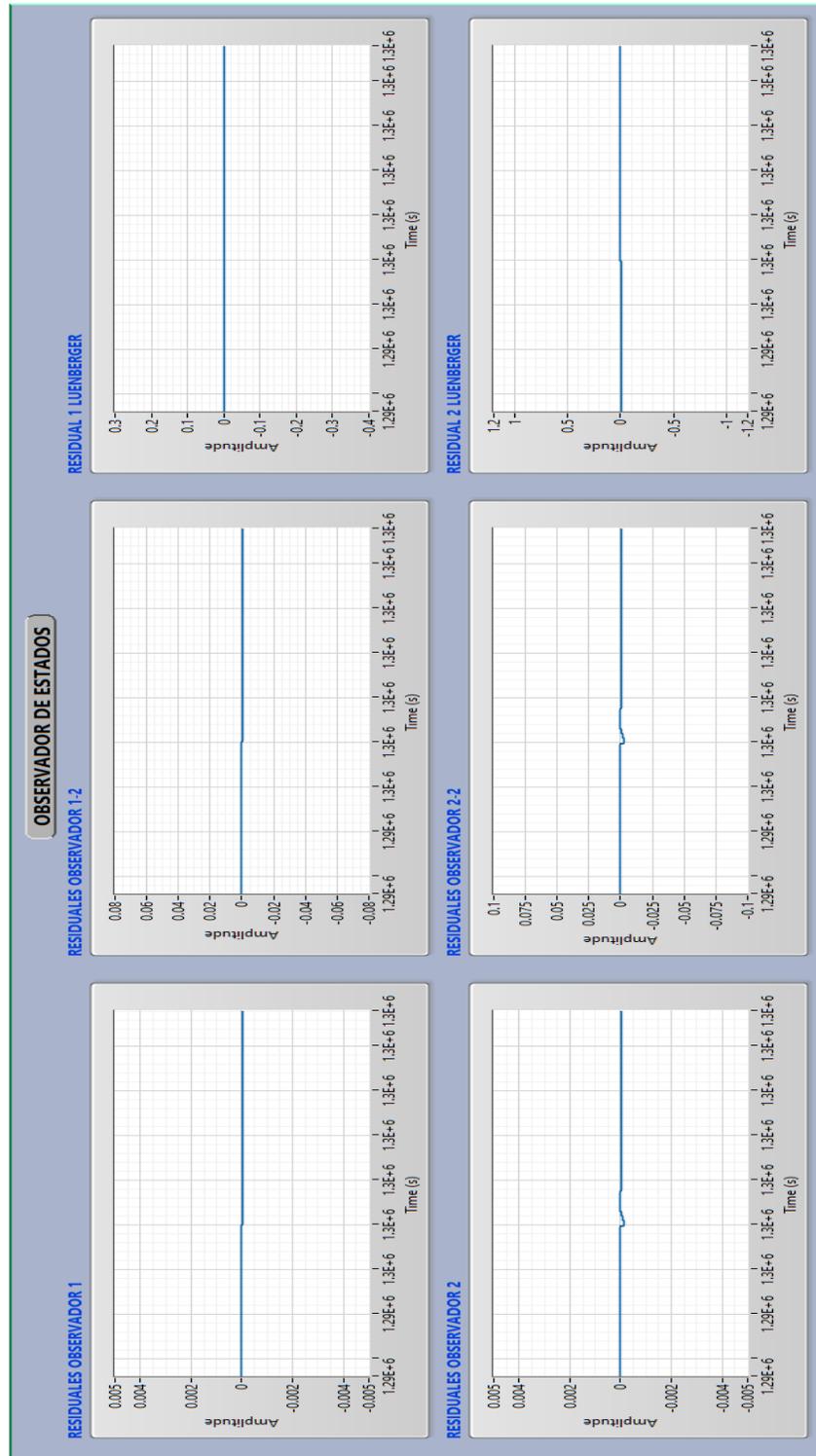


Figura 4.11: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla obstrucción de salida.

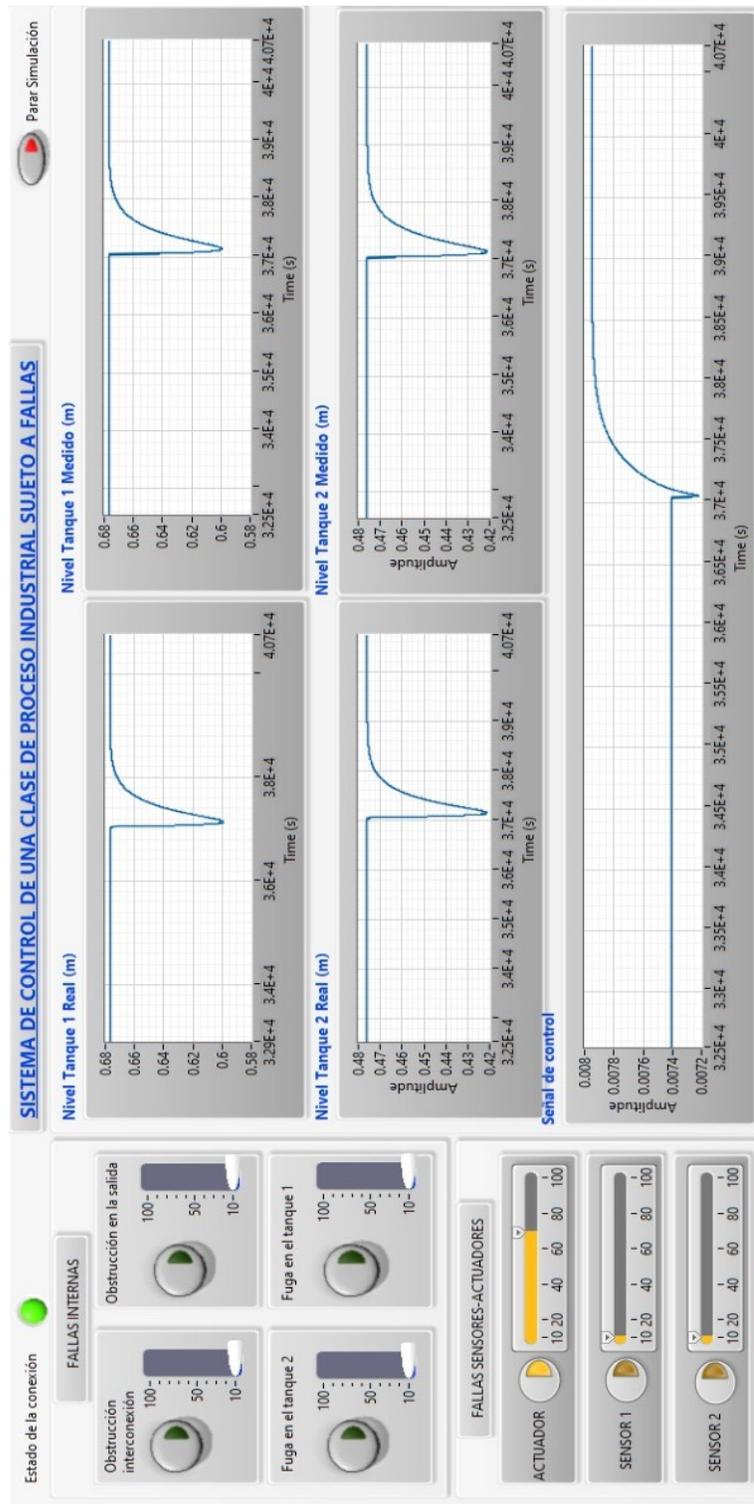


Figura 4.12: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla del actuador.

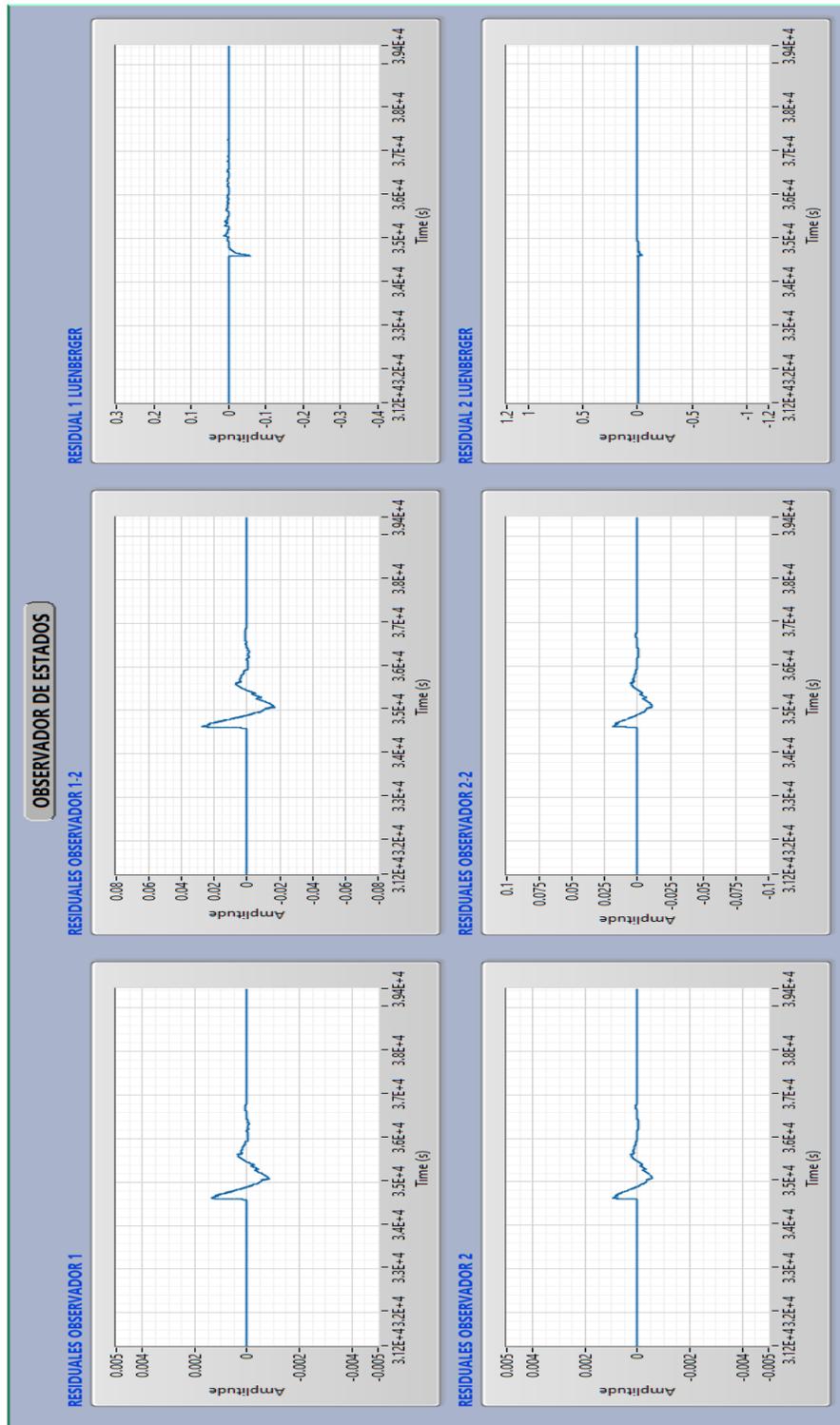


Figura 4.13: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla de actuador.

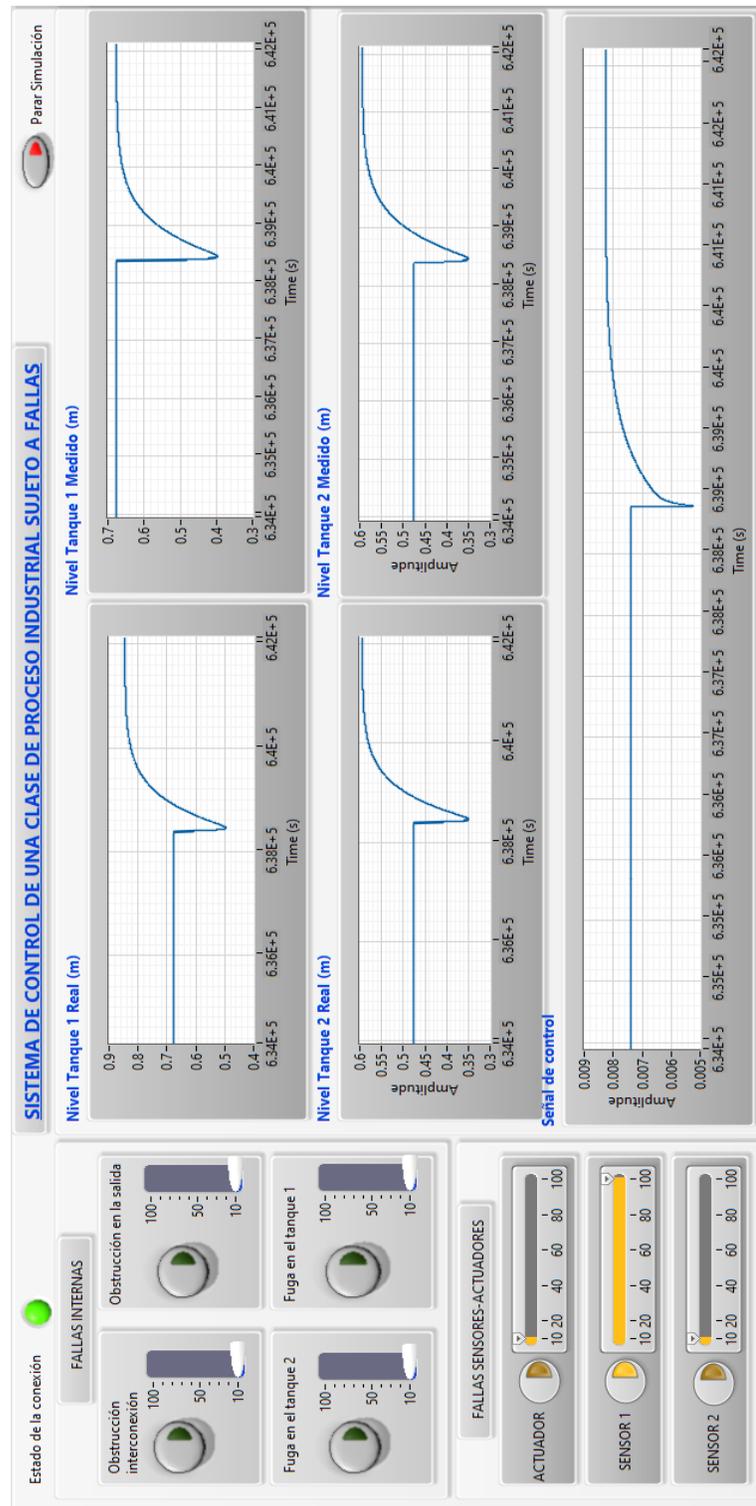


Figura 4.14: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla en el sensor 1.

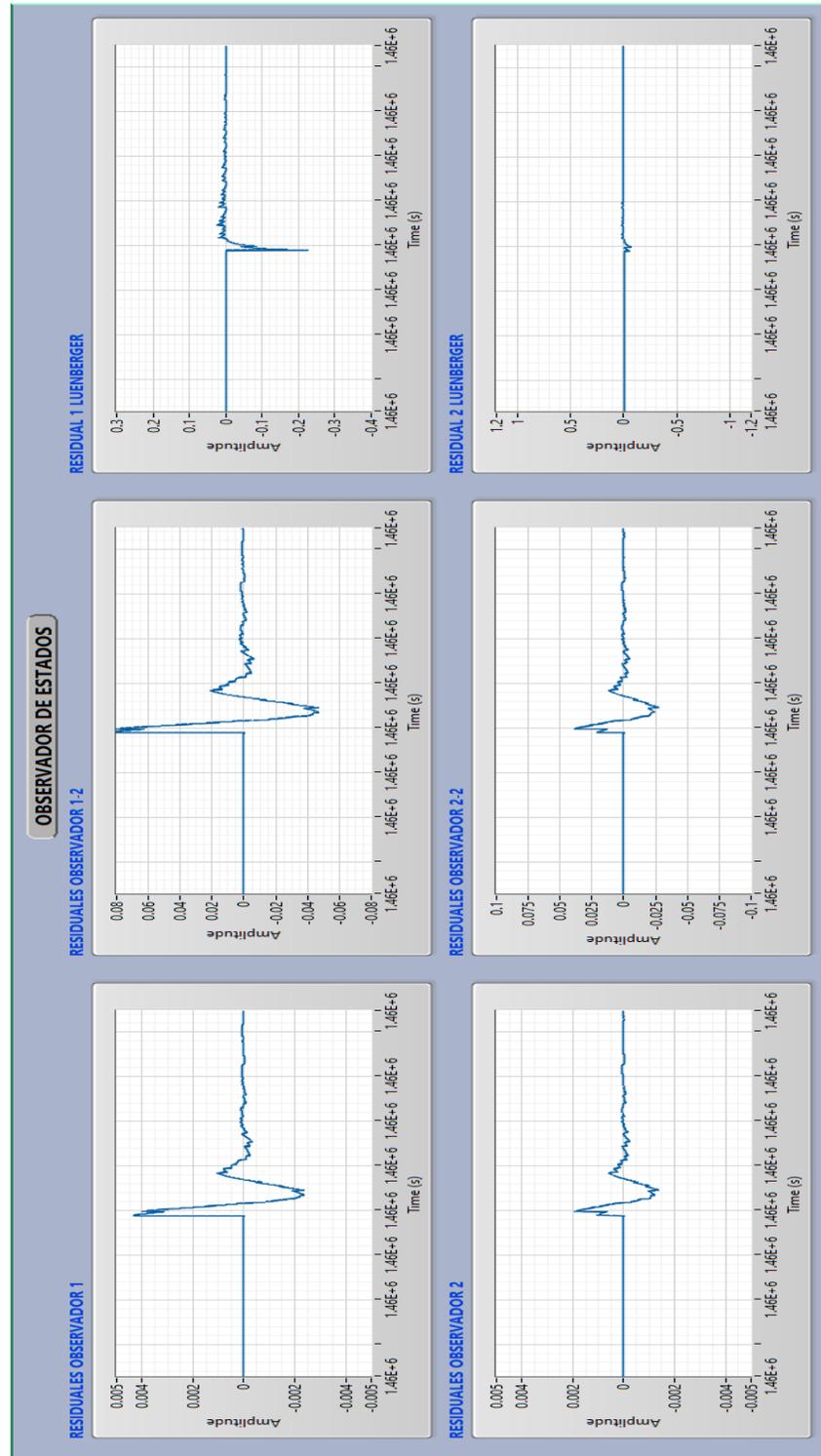


Figura 4.15: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla en el sensor 1.

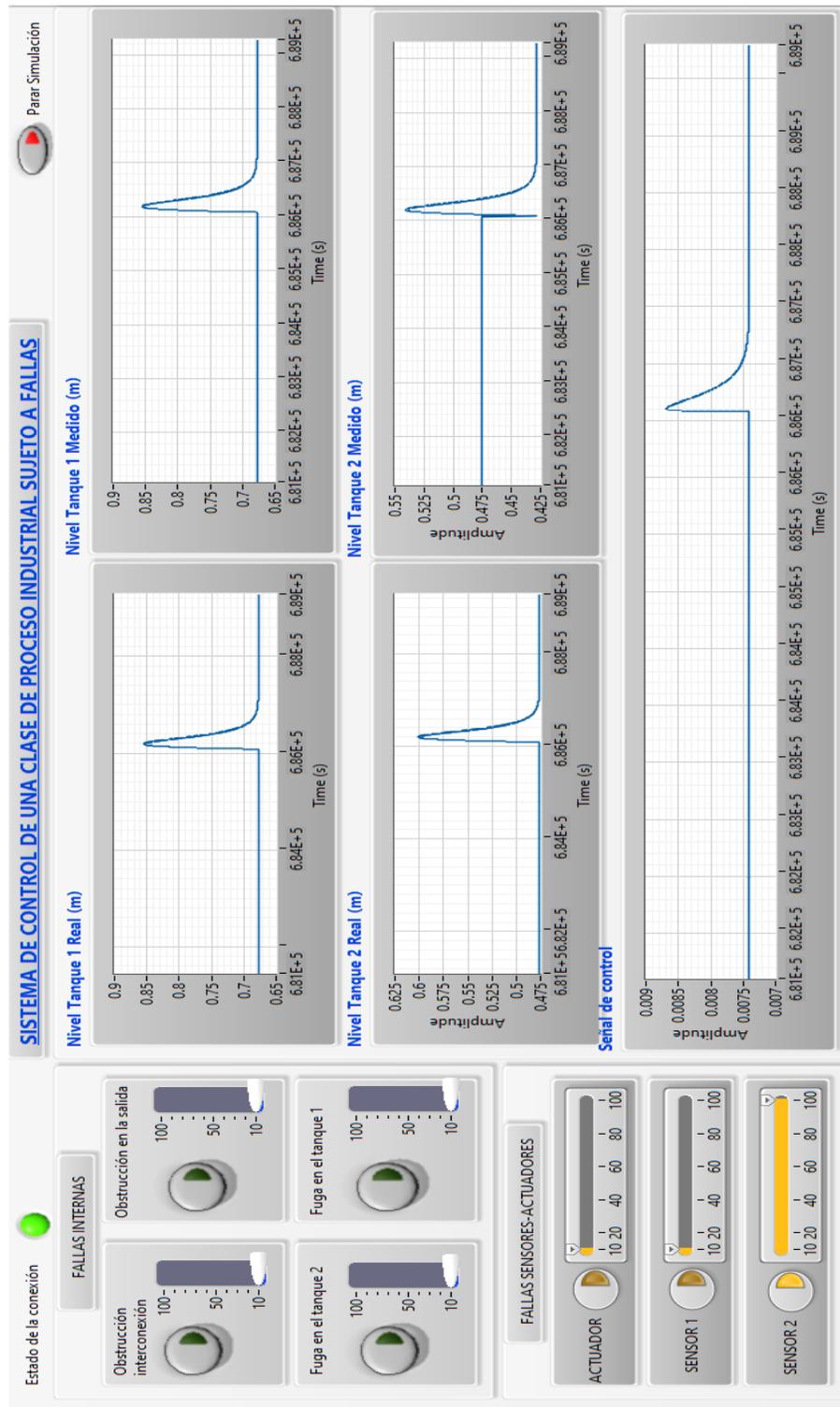


Figura 4.16: Comportamiento del sistema de control, niveles reales y estimados ante la presencia de la falla en el sensor 2.

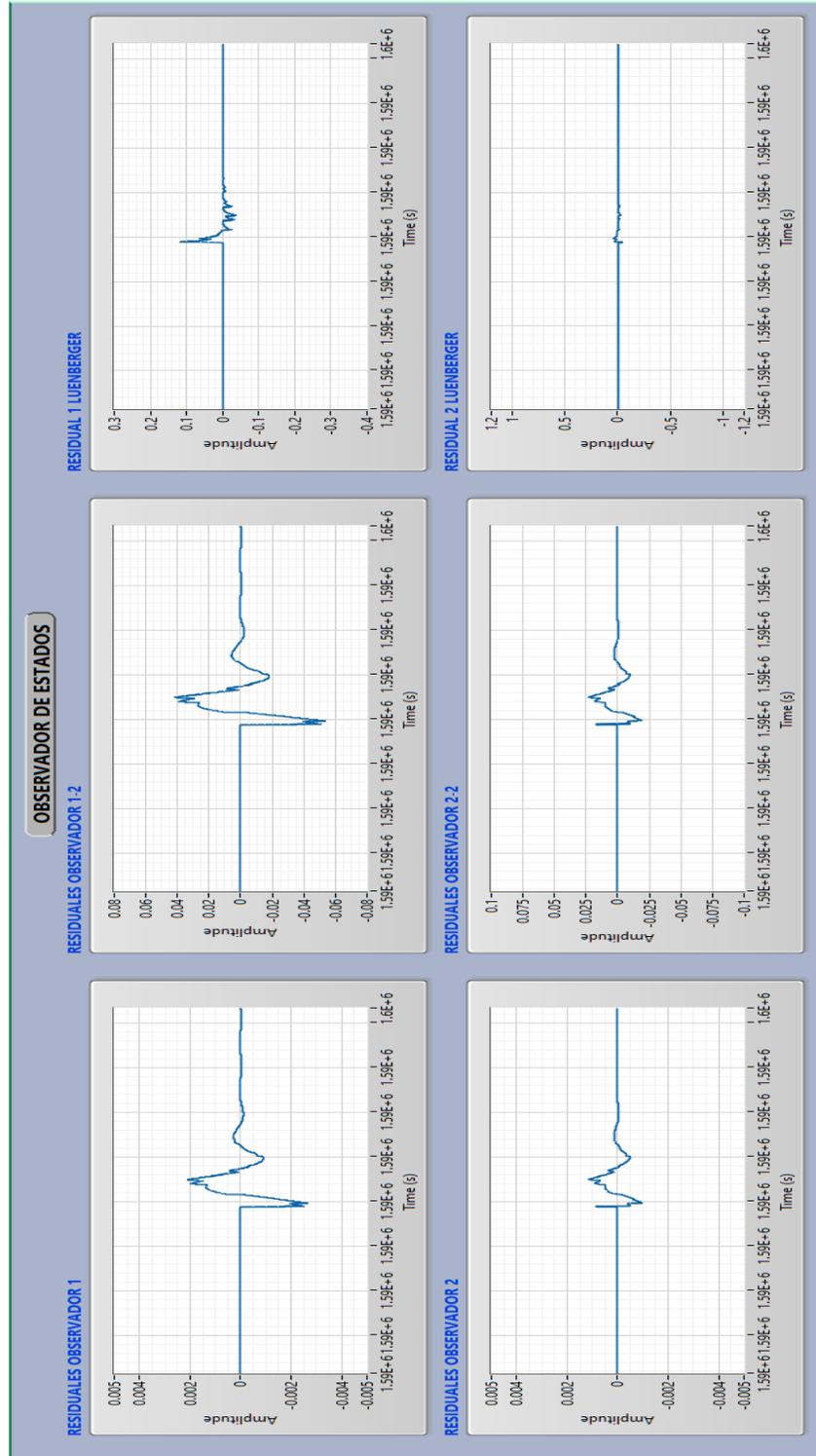


Figura 4.17: Comportamiento de los residuales ante la presencia de la falla en el sensor 2.

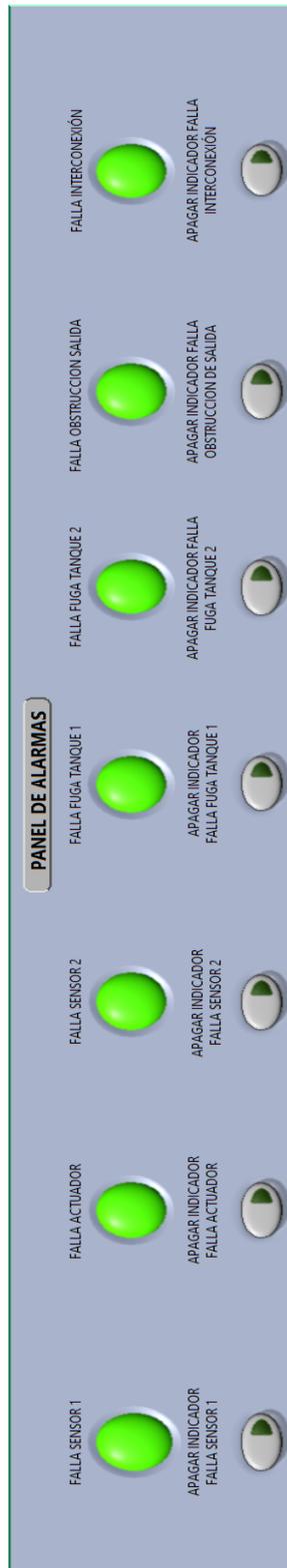


Figura 4.18: Panel de alarmas luego de activar las 7 fallas.

4.3. Sistema de alarmas para la detección y diagnóstico de fallas en el sistema

Del sistema en Labview, donde tenemos como punto de partida los resultados proporcionados por el conjunto de residuales dados por los observadores de Luenberger y de diagnóstico presentados en la Sección 4.2 concluimos que los valores a los que se estabilizan los residuales varían para cada una de las fallas, por ende para poder identificarlas es necesario realizar una serie de combinaciones lógicas comparando el resultado de restar el valor estable de los residuales luego de producirse una de las fallas del valor estable nominal que sería antes que se presente una falla, con rangos específicos que obtendrán en esta sección. Para ello procedimos a registrar cada uno de los valores estables nominales sin falla y variando la magnitud de la falla desde 10 % hasta 100 % para poder encontrar un rango en el cual varía el valor estable en cada residual, a su vez este procedimiento servirá para posteriormente ser analizado para el diagnóstico de fallas.

Con los resultados obtenidos de cada uno de los observadores, para el sistema de monitoreo nos concentraremos en el análisis de 4 residuales, los cuales nos brindan información relevante para poder diagnosticar las fallas, cabe recalcar que se llegó a esta elección tras observar el comportamiento de todos los residuales en las simulaciones obtenidas en Matlab y Labview previamente, los cuales corresponden a los 2 residuales del observador de orden completo de Luenberger, al segundo residual del OD_1 y al segundo residual del OD_2 . Primeramente, se registraron los valores nominales de cada uno de los residuales que se presentan en la Tabla 9. La magnitud de estos residuales se debe a que los mismos se generan a partir de las variables de perturbación lineales. Para obtener valores más significativos basta transformar a las coordenadas originales, sumando el punto de operación. Otra opción simple es incluir un amplificador a la salida de los generadores de residuales.

Residual de Luenberger 1 ($Rl1_{nominal}$)	Residual de Luenberger 2 ($Rl2_{nominal}$)	Residual de $OD1_2$ ($Rod1_{2nominal}$)	Residual de $OD2_2$ ($Rod2_{2nominal}$)
$-7,40945 \cdot 10^{-7}$	$-1,3515 \cdot 10^{-8}$	$3,25702 \cdot 10^{-9}$	$3,26632 \cdot 10^{-6}$

Tabla 9: Valores nominales de cada uno de los residuales sin la presencia de fallas.

En las Tablas 10, 11, 12 y 13 se registraron los valores de cada residual ante la presencia de fallas y la resta del valor obtenido menos el valor nominal.

Falla	Residual de Luenberger 1 ($RI1$)	$Rf_1 = RI1 - RI1_{nominal}$
Fuga en el tanque 1	10 % $\rightarrow 1,8169 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000172891$	10 % $\rightarrow 0,00019$ 100 % $\rightarrow 0,000174$
Obstrucción en la válvula de interconexión	10 % $\rightarrow 3,14352 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 3,19234 \cdot 10^{-5}$	10 % $\rightarrow 0,000032$ 100 % $\rightarrow 0,000033$
Fuga en el tanque 2	10 % $\rightarrow -6,90152 \cdot 10^{-7}$ 100 % $\rightarrow 3,58506 \cdot 10^{-6}$	10 % $\rightarrow 5,0793 \cdot 10^{-8}$ 100 % $\rightarrow 0,000004$
Obstrucción en la válvula de salida	10 % $\rightarrow -7,38015 \cdot 10^{-7}$ 100 % $\rightarrow -4,29752 \cdot 10^{-7}$	10 % $\rightarrow 2,93 \cdot 10^{-9}$ 100 % $\rightarrow 3,11193 \cdot 10^{-7}$
Falla en el actuador	10 % $\rightarrow -2,00334 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,000212958$	10 % $\rightarrow -0,0000192925$ 100 % $\rightarrow -0,000212217$
Falla en el sensor 1	10 % $\rightarrow -6,62733 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,00079143$	10 % $\rightarrow -0,000066$ 100 % $\rightarrow -0,000791$
Falla en el sensor 2	10 % $\rightarrow 2,18691 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,000225359$	10 % $\rightarrow 0,000023$ 100 % $\rightarrow 0,000226$

Tabla 10: Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $RI1$ de $RI1_{nominal}$.

Falla	Residual de Luenberger 2 ($Rl2$)	$Rf_2 = Rl2 - Rl2_{nominal}$
Fuga en el tanque 1	10 % $\rightarrow -1,351 \cdot 10^{-8}$ 100 % $\rightarrow -1,351 \cdot 10^{-8}$	10 % $\rightarrow 0$ 100 % $\rightarrow 0$
Obstrucción en la válvula de interconexión	10 % $\rightarrow -3,22889 \cdot 10^{-6}$ 100 % $\rightarrow -3,26469 \cdot 10^{-5}$	10 % $\rightarrow 0,000003$ 100 % $\rightarrow 0,000033$
Fuga en el tanque 2	10 % $\rightarrow -1,90423 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,000188262$	10 % $\rightarrow -0,000019$ 100 % $\rightarrow -0,000188$
Obstrucción en la válvula de salida	10 % $\rightarrow 4,93115 \cdot 10^{-6}$ 100 % $\rightarrow 4,95479 \cdot 10^{-5}$	10 % $\rightarrow 0,000005$ 100 % $\rightarrow 0,00005$
Falla en el actuador	10 % $\rightarrow -1,351 \cdot 10^{-8}$ 100 % $\rightarrow -1,351 \cdot 10^{-8}$	10 % $\rightarrow 0$ 100 % $\rightarrow 0$
Falla en el sensor 1	10 % $\rightarrow 6,56046 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000803831$	10 % $\rightarrow 0,000066$ 100 % $\rightarrow 0,000804$
Falla en el sensor 2	10 % $\rightarrow -3,21673 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,000321552$	10 % $\rightarrow -0,000032$ 100 % $\rightarrow -0,0000322$

Tabla 11: Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rl2$ de $Rl2_{nominal}$.

Falla	Residual del OD 1 ($Rod1_2$)	$Rf_3 = Rod1_2 - Rod1_{2nominal}$
Fuga en el tanque 1	10 % $\rightarrow 8,59193 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,00082988$	10 % $\rightarrow 0,000083$ 100 % $\rightarrow 0,000827$
Obstrucción en la válvula de interconexión	10 % $\rightarrow -1,18463 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,00014935$	10 % $\rightarrow -0,000015$ 100 % $\rightarrow -0,000153$
Fuga en el tanque 2	10 % $\rightarrow 6,11106 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000558996$	10 % $\rightarrow 0,000058$ 100 % $\rightarrow 0,000556$
Obstrucción en la válvula de salida	10 % $\rightarrow -1,18463 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,00014935$	10 % $\rightarrow -0,000015$ 100 % $\rightarrow -0,000153$
Falla en el actuador	10 % $\rightarrow 8,69 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000924302$	10 % $\rightarrow 0,0000869852$ 100 % $\rightarrow 0,000921046$
Falla en el sensor 1	10 % $\rightarrow 8,74156 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000981689$	10 % $\rightarrow 0,000084$ 100 % $\rightarrow 0,000978$
Falla en el sensor 2	10 % $\rightarrow 3,25702 \cdot 10^{-6}$ 100 % $\rightarrow 3,25702 \cdot 10^{-6}$	10 % $\rightarrow 0$ 100 % $\rightarrow 0$

Tabla 12: Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rod1_2$ de $Rod1_{2nominal}$.

Falla	Residual del OD 2-2 ($Rod2_2$)	$Rf_4 = Rod2_2 - Rod2_{2nominal}$
Fuga en el tanque 1	10 % $\rightarrow 8,59286 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000829889$	10 % $\rightarrow 0,000083$ 100 % $\rightarrow 0,000827$
Obstrucción en la válvula de interconexión	10 % $\rightarrow -0,000124354$ 100 % $\rightarrow -1,64282 \cdot 10^{-5}$	10 % $\rightarrow -0,000128$ 100 % $\rightarrow -0,00002$
Fuga en el tanque 2	10 % $\rightarrow 7,42274 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000688675$	10 % $\rightarrow 0,000071$ 100 % $\rightarrow 0,000685$
Obstrucción en la válvula de salida	10 % $\rightarrow -1,5243 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow -0,00018348$	10 % $\rightarrow -0,000019$ 100 % $\rightarrow -0,000187$
Falla en el actuador	10 % $\rightarrow 8,69978 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000924312$	10 % $\rightarrow 0,0000837285$ 100 % $\rightarrow 0,000921046$
Falla en el sensor 1	10 % $\rightarrow 4,22257 \cdot 10^{-6}$ 100 % $\rightarrow 0,000427991$	10 % $\rightarrow 0,000039$ 100 % $\rightarrow 0,000425$
Falla en el sensor 2	10 % $\rightarrow 2,54146 \cdot 10^{-5}$ 100 % $\rightarrow 0,000224749$	10 % $\rightarrow 0,000022$ 100 % $\rightarrow 0,000221$

Tabla 13: Valores del residual en estado estable ante la presencia de falla, el resultado de restar el valor $Rod2_2$ de $Rod2_{2nominal}$.

Con los valores obtenidos de los residuales ante cada una de las fallas el sistema de monitoreo fue diseñado con una serie de condiciones lógicas que van a determinar la falla que se ha producido en el sistema, estas condiciones se presentan en la Tabla 14, y fueron implementadas en LabVIEW, específicamente en el “SISTEMA DE MONITOREO DE FALLAS EN UNA CLASE DE PROCESO INDUSTRIAL”. Para cada falla existen diferentes condiciones, y estas determinan si ha existido o no una falla en el sistema, la interfaz implementado el sistema de monitoreo de nuestro sistema se puede observar en la Figura 4.3, donde cada botón indicador se enciende al verificarse alguna de las condiciones listadas.

Falla	Condición 1 Rf_1	Condición 2 Rf_2	Condición 3 Rf_3	Condición 4 Rf_4
Fuga en el tanque 1	$0,000174 \leq Rf_1 \leq 0,00019$	$Rf_2 = 0$	No necesario	No necesario
Obstrucción en la válvula de interconexión	$0,000032 \leq Rf_1 \leq 0,000033$	No necesario	$-0,000153 \leq Rf_3 \leq -0,000015$	$-0,000128 \leq Rf_4 \leq -0,00002$
Fuga en el tanque 2	$5,0793 \cdot 10^{-9} \leq Rf_1 \leq 0,000004$	No necesario	$0,000058 \leq Rf_3 \leq 0,000556$	$0,000071 \leq Rf_4 \leq 0,000685$
Obstrucción en la válvula de salida	$3,11193 \cdot 10^{-7} \leq Rf_1 \leq 2,93 \cdot 10^{-9}$	$0,000005 \leq Rf_2 \leq 0,00005$	$-0,000153 \leq Rf_3 \leq -0,000015$	$-0,000187 \leq Rf_4 \leq -0,000019$
Falla en el actuador	$-0,000212217 \leq Rf_1 \leq -0,0000192925$	$Rf_2 = 0$	No necesario	No necesario

Falla	Condición 1 Rf_1	Condición 2 Rf_2	Condición 3 Rf_3	Condición 4 Rf_4
Falla en el sensor 1	$-0,000791 \cdot 10^{-7} \leq Rf_1 \leq 0,000066$	No necesario	$0,000084 \leq Rf_3 \leq 0,000978$	No necesario
Falla en el sensor 2	No necesario	$0,000032 \cdot 10^{-7} \leq Rf_2 \leq 0,0000322$	No necesario	$0,000022 \leq Rf_4 \leq 0,000221$

Tabla 14: Conjunto de condiciones lógicas para cada falla del sistema

5. Conclusiones y recomendaciones

El problema de detección y diagnóstico de fallos en un proceso que requiere de un arduo análisis matemático, que permita obtener la mejor robustez ante la presencia de un cierto modo de falla. En este trabajo se presentó la aplicación de técnicas de detección de fallas provenientes de la Teoría de Control, como el Observador de Luenberger y Observador de Diagnóstico, en un contexto simulado de una clase de proceso industrial, en el que se consideró siete fallas: cuatro fallas internas del proceso y tres fallas en los sensores y actuadores. Este contexto a pesar de no ser en un ambiente real, tiene su complejidad y requiere de partir de un buen modelado del sistema el cual permitirá obtener los mejores resultados y de esa forma resolver el problema de estudio de manera satisfactoria, lo mas cercano a lo que ocurre en la realidad.

En el proceso se analizaron varias formas y métodos para poder resolver y obtener el sistema de detección de fallos correcto, sin duda la aplicación de tres observadores posibilitó y aumentó la robustez del sistema que al enfrentarse a 7 fallas requería de un análisis mucho mas minucioso para obtener un sistema de detección eficaz, aunque inicialmente se consideró simplemente al observador de Luenberger, con el posterior análisis incluyendo al Observador de Diagnóstico se pudo complementar la robustez y mejorar la detección de cada una de las fallas del sistema.

El desarrollo de modelo que puede considerar apropiadamente los modos de falla, el cual considera los parámetros adecuados para la aplicación, junto con un buen algoritmo para detectar las fallas, permitió desarrollar una interfaz de detección de fallos que se puede comunicar mediante el protocolo MQTT desde 2 ordenadores. Cabe mencionar que luego de analizar varias opciones para poder realizar el envío y recepción de datos, se optó por este protocolo que permite comunicación Machine to Machine y de esta forma poder transmitir datos conectandonos a un servidor central. Este protocolo esta siendo utilizado mucho en la tecnologia IoT, y en nuestra aplicación que simula un sistema de control y un detección de fallos, funciona de manera eficaz y correcta.

En este trabajo se verificó que las fallas en los sensores y actuadores hace que se pierda el objetivo de control, aún cuando las variables sensadas estan erroneamente mostrando que las variables de interés estan controladas. De allí que para trabajos posteriores se recomienda desarrollar un sistema de detección y diagnóstico de fallas conjuntamente con estrategias de control tolerante a fallas, para poder mantener la variable controlada aún ante presencia de fallas en los sensores.

También se sugiere evaluar otros modelos de diagnóstico basado en observadores reducidos,

o realizar un análisis basado en aprendizaje automático para el procesamiento de las señales residuales, para evitar el sistema basado en reglas lógicas propuesta en este trabajo, el cual puede ser sensible a variaciones de los parámetros nominales de operación.

ANEXOS

A. Códigos de MatLab utilizados para el diseño y las simulaciones

```

close all
clear all

%VARIABLES UTILIZADAS PARA EL MODELADO
deltak=1/3600;           %Cambio en la resistencia de la válvula \
de interconexión en m^3/s
deltak2=1/3600;        %Cambio en la resistencia de la válvula de salida en m^3/s
%Constantes Tanque #1
C1=0.1938;             %Área transversal tanque 1 en m^2
K1=0.016508;          %Constante válvula de interconexión en m^3/s
K3=0.00107;           %Constante de la válvula que simula la fuga del tanque 1 en m^3/s al 1% de apertura de fuga
%Constantes Tanque #2
C2=0.1938;             %Área transversal tanque 2 en m^2
K2=0.01073;           %Constante válvula de salida en m^3/s
K4=0.00107;           %Constante de la válvula que simula la fuga del tanque 2 en m^3/s al 1% de apertura de fuga
%Flujo de entrada
Qi=((0.0001346)*55);    %G(s)=Kv*%CO en m^3/s
%Punto de operacion
H1=((1/K1)^2+(1/K2)^2)*Qi^2 %Altura del tanque 1
H2=((1/K2)^2)*Qi^2;     %Altura del tanque 2
H=[H1;H2];

%MATRICES LINEALES DEL SISTEMA PARA EL OBSERVADOR DE DIAGNOSTICO
A=[(-K1/(2*C1*sqrt(H1-H2))) (K1/(2*C1*sqrt(H1-H2)));(K1/(2*C2*sqrt(H1-H2))) (-K1/(2*C2*sqrt(H1-H2))-(K2/(2*C2*sqrt(H2))))];
B=[(1/C1);0];
C=[1 0;0 1];
D=0;

%OBSERVADOR DE DIAGNOSTICO
s=2;
ban=1;
CO1=[1 0];
CO2=[0 1];
CO3=[1 1];
% Paso 1: EstableCO1er las matriCOies X y G.
if s==2
    X=[0.08;0.03];
    G=[0 -0.4;1 -0.4];
    CO=[0;0]
elseif s==3
    X=[5;2;2];
    G=[0 0 -0.1;1 0 -2;0 1 -10];
    CO=[0;0;0]
elseif s==4
    X=[0.08;0.03;0.01;0.04];
    G=[0 0 0 -0.6;1 0 0 -2;0 1 0 -6;0 0 1 -9];
    CO=[0;0;0;0]
end
% Paso 2: CO1alCO1ule CO1(s)=det?(sI-A) para a_0,a_1,... ,a_n.
a0=0.003809;
a1=0.2301;
a2=1;
% Paso 3: CO1alCO1ule las matriCOies L, T según la eCO1uaCO1iión 5.75 del teorema 5.8 del texto de Steven Ding.
if s==2
    Y = [X G*X];
    J1 = [CO1*A+a1*CO1;a2*CO1];
    T1 = Y*J1;
    J2 = [CO2*A+a1*CO2;a2*CO2];
    T2 = Y*J2;
    J3 = [CO3*A+a1*CO3;a2*CO3];
    T3 = Y*J3
    CG=a2*G^2+a1*G+a0*[1 0;0 1];
    L=-CG*X
elseif s==3

```

```

Y = [X G*X];
J1 = [C01*A+a1*C01;a2*C01];
T1 = Y*J1;
J2 = [C02*A+a1*C02;a2*C02];
T2 = Y*J2;
CG=a2*G^2+a1*G+a0*[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
L=-CG*X;
elseif s==4
Y = [X G*X];
J1 = [C01*A+a1*C01;a2*C01];
T1 = Y*J1;
J2 = [C02*A+a1*C02;a2*C02];
T2 = Y*J2;
C01G=a2*G^2+a1*G+a0*[1 0 0 0;0 1 0 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
L = -C01G*X;
end
% Paso 4: Resolver WTC01_N^T=0 para W.
C01N=[0 1];
C02N=[1 0];
C03N=[1 -1];
syms e1 e2 e3 e4 e5 e6 e7 e8 e9 e10 e11 e12 e13 e14

if s==2
W=[0.1 e2;2 e4];
sol=W*T2*transpose(C02N);
for i=1:s
e(i)=double(solve(sol(i))==0)
end
u= vpa(e,3);
W=[0.1 e(1);2 e(2)]
elseif s==3
W=[0.1 e2 0.3;0.4 0.5 e6;e7 0.6 0.7]
sol=W*T1*transpose(C01N);
for i=1:s
e(i)=solve(sol(i))==0)
end
u= vpa(e,3)
if ban==0
W=[2 -0.55 0.3;0.4 0.5 -1.5;-0.52 0.6 0.7]
else
W=[2 0 0;0 0.5 0;0 0 0.7]
end
elseif s==4
W=[0.1 0.2 -1.23 e1;e2 0.3 0.4 -0.327;0.5 e3 0.6 -1.11818;0.7 0.8 e4 -1.91818]
sol=W*T1*transpose(C01N);
for i=1:s
e(i)=solve(sol(i))==0)
end
u= vpa(e,3)
if ban==0
W=[0.1 0.2 -1.23 -0.0425;0.001 0.3 0.4 -0.327;0.5 -0.0424 0.6 -1.11818;0.7 0.8 -0.327 -1.91818]
else
W=[0.1 0 0 0;0 0.3 0 0;0 0 0.6 0;0 0 0 -1.91818]
end
end
end

% Paso 5: EstablezCO1a V de aCO1uerdo a la eCO1uaCO1i3n 5.76 del teorema 5.8 del texto de Steve Ding.
V = W*T2*transpose(C02)*(C02*transpose(C02))^-1

% Paso 6: CO1alCO1ulo de H y Q
Hod1=T1*B
Hod2=T2*B
Hod3=T3*B
Q=0;

%OBSERVADOR DE DIAGNOSTICO DISCRETIZADO

Tm = 0.01; %tiempo de muestreo

determinante = inv(eye(s)-G*Tm);

```

```

G_dis = determinante           %Matriz G discretizada
H_dis1 = determinante*Hod1*Tm %Matriz H_dis1 discretizada
H_dis2 = determinante*Hod2*Tm %Matriz H_dis2 discretizada
H_dis = determinante*Hod3*Tm %Matriz H_dis3 discretizada
L_dis = determinante*L*Tm     %Matriz L discretizada

%FALLAS EN EL MODELO LACTI
%Fallas en planta
fallas=[0 0 0 0];
%fallas = [falla1 falla2 falla3 falla4]
%falla1 = fuga en el tanque 1
%falla2 = obstrucción válvula de interconexión entre el tanque 1 y tanque 2
%falla3 = fuga en el tanque 2
%falla4 = obstruccion en la salida del tanque 2
t_fallas=[2000 3000 4000 5000];

%Fallas en sensores y actuadores
fallas_sensor_actuador=[1 0 0];
%Fallas_sensor_actuador = [falla_actuador falla_sensor1 falla_sensor2]
t_fallas_sensor_actuador=[6000 7000 8000];

%Constantes de falla para el sensor 1 y sensor 2
Ks1=0.2;           %En metros(m)
Ks2=0.1;           %En metros(m)
Ff=[Ks1;Ks2]      %Matriz de falla sensores

%Constantes de falla para del actuador
delta_actuador=0.1 %Porcentaje de flujo que se resta o adiciona al flujo de entrada del modelo

%CONSTANTES CONTROL INTEGRAL
%Cálculo de constantes del control integral
A_STAR=[A zeros(2,1);-[1 0] 0];B_STAR=[B;0]
KKi=place(A_STAR,B_STAR,[-0.023271 -0.003395 -0.135097]);

K=[KKi(1,1) KKi(1,2)] %Matriz de ganancia control integral
Ke=-KKi(1,3)          %Constante de ganancia del control integral

%sys=ss(A,B,C,D);
%opt = stepDataOptions('InputOffset',0,'StepAmplitude',1);
%step(sys,opt)

```

B. Diagramas de Simulink para la generación de residuales

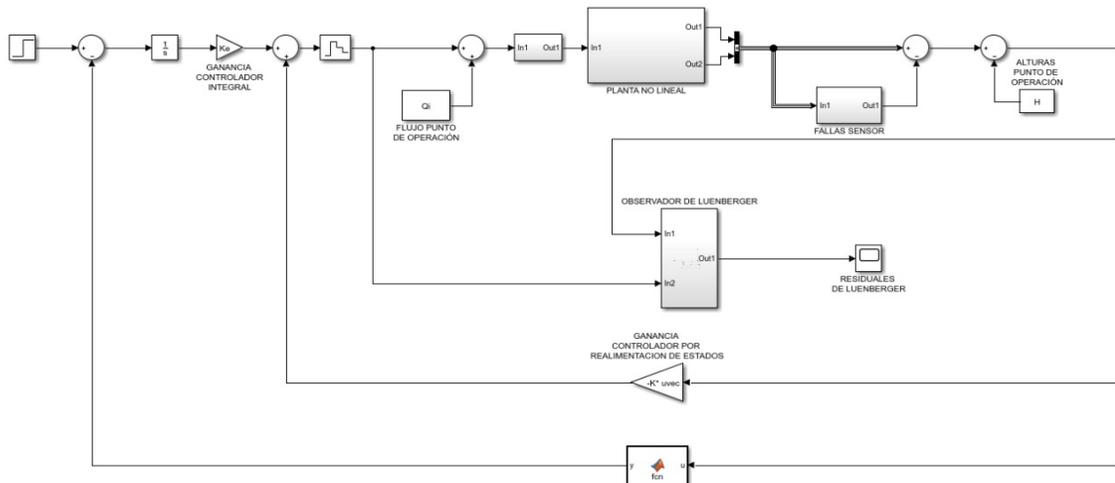


Figura B.1: Simulación del observador de Luenberger

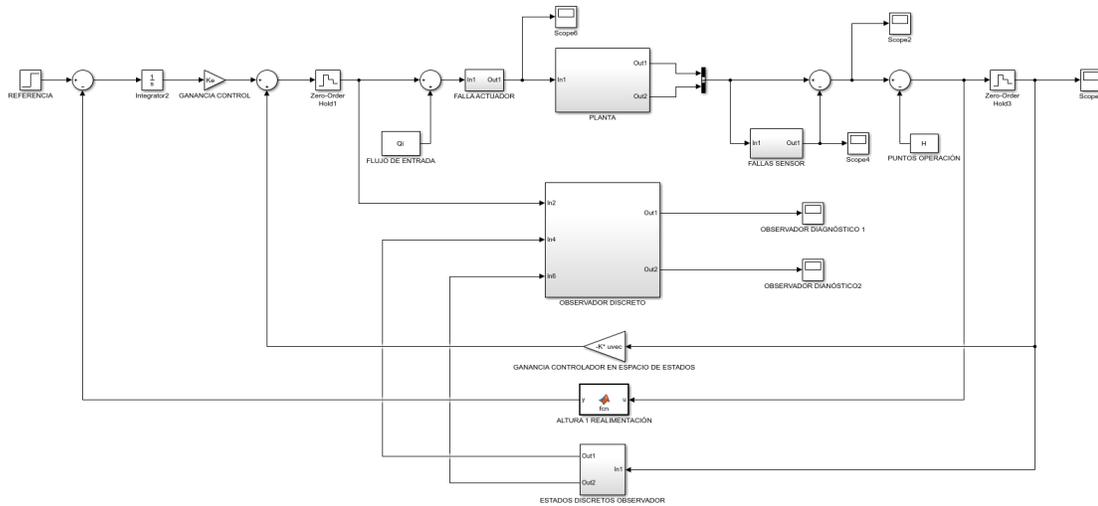


Figura B.2: Simulación del banco de observadores de diagnóstico

Referencias

- Acuña, W. (2013). *Implementando Técnicas de Control Acotado: Un enfoque basado en tolerancia a fallos* (M.S. Thesis). Universidad de los Andes. Mérida, Venezuela.
- Al Qahtani, T., Yaakob, M. S., Yidris, N., Sulaiman, S. & Ahmad, K. A. (2020). A Review on Water Leakage Detection Method in the Water Distribution Network. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 68(2), 152-163.
- Besançon, G., Georges, D., Begovich, O., Verde, C. & Aldana, C. (2007). Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines. *2007 European Control Conference (ECC)*, 5666-5670.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., Staroswiecki, M. & Schröder, J. (2016). *Diagnosis and fault-tolerant control* (Vol. 2). Springer.
- Carrera, R., Verde, C. & Cayetano, R. (2015). A SCADA expansion for leak detection in a pipeline. *Sensors*, 2300(2320), 2340.
- Cerrada, M., Cardillo, J. & Prada, A. (2011). Diagnóstico de fallas basado en modelos: Una solución factible para el desarrollo de aplicaciones SCADA en tiempo real. *Ciencia e Ingeniería*, 32(3), 163-172.
- Ding, S. X. (2013). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media.
- Eliades, D. G. & Polycarpou, M. M. (2009). A fault diagnosis and security framework for water systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 18(6), 1254-1265.
- Fernández Vela, M. A. (2017). *Simulación Hardware-in-the-loop de una micro red de corriente alterna con cargador de baterías* (B.S. thesis). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. España.
- Han, J., Liu, X., Wei, X., Hu, X. & Zhang, H. (2019). Reduced-order observer based fault estimation and fault-tolerant control for switched stochastic systems with actuator and sensor faults. *ISA Transactions*, 88, 91-101.
- He, J., Yang, L., Ma, Y., Yang, D., Li, A., Huang, L. & Zhan, Y. (2020). Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. *Process Safety and Environmental Protection*, 141, 390-401.
- Karajagikar, J. S. & Sonawane, B. (2021). Reliability-Centered Maintenance (RCM) Approach for a Process Industry: Case Study. *Optimization Methods in Engineering*. Springer.
- Ling, C., Revil, A., Abdulsamad, F., Qi, Y., Soueid Ahmed, A., Shi, P., Nicaise, S. & Peyras, L. (2019). Leakage detection of water reservoirs using a Mise-à-la-Masse approach. *Journal of Hydrology*, 572, 51-65.

- Miciolino, E. E., Setola, R., Bernieri, G., Panzieri, S., Pascucci, F. & Polycarpou, M. M. (2017). Fault diagnosis and network anomaly detection in water infrastructures. *IEEE Design & Test*, 34(4), 44-51.
- Molina-Nacipucha, F. P. (2013). *Diseño mecánico y construcción de una planta didáctica de control de procesos continuos industriales en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca* (B.S. Thesis). Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
- Muñoz, O. (2019). *Internet de las Cosas (IoT)*. Ibukku, LLC. <https://books.google.com.ec/books?id=vnnEDwAAQBAJ>
- Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. Prentice Hall.
- Paluszek, M. & Thomas, S. (2015). *MATLAB Recipes: A Problem-Solution Approach*. Apress.
- Perez, R., Sanz, G., Puig, V., Quevedo, J., Cuguelero Escofet, M. A., Nejari, F., Meseguer, J., Cembrano, G., Mirats Tur, J. M. & Sarrate, R. (2014). Leak Localization in Water Networks: A Model-Based Methodology Using Pressure Sensors Applied to a Real Network in Barcelona [Applications of Control]. *IEEE Control Systems Magazine*, 34(4), 24-36.
- Pieper, T. & Obermaisser, R. (2018). Distributed co-simulation for software-in-the-loop testing of networked railway systems. *2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*.
- Santana Cruz, E. E. (2017). *Propuesta de sistema multi-UAV para aplicaciones de cobertura de área*. Universitat Autònoma de Barcelona.
- Sotomayor, O. A. & Odloak, D. (2005). Observer-based fault diagnosis in chemical plants. *Chemical Engineering Journal*, 112(1), 93-108.
- Torres, L., Verde, C. & Rojas, J. (2019). Minimal-order observers for locating leaks in a pipeline with a branch [1st IFAC Workshop on Control Methods for Water Resource Systems CMWRS 2019]. *IFAC PapersOnLine*, 52(23), 67-72.
- Verde, C. & Torres, L. (2015). Referenced model-based observers for locating leaks in a branched pipeline. *Ifac-Papersonline*, 48(21), 1066-1071.
- Villegas Berbesi, T. (2012). *Aplicación de técnicas robustas para detección y diagnóstico de fallos* (PhD Thesis). Universidad de Valladolid. España.
- Wang, H. & Daley, S. (1996). Actuator fault diagnosis: an adaptive observer-based technique. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 41(7), 1073-1078.
- Welch, T. B. & Shearman, S. (2012). Teaching software defined radio using the USRP and LabVIEW. *2012 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP)*.