



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO



TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC
DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

*Diseño y simulación de un control tolerante a fallas en sensores de nivel en
tanques por acomodación*

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTA

I.Q. ALEXIS MARCO ANTONIO ROMERO PÉREZ

COMITÉ TUTORIAL

Dr. Miguel Ángel Vaca Hernández, Director
Dr. Francisco Vidal Caballero Domínguez, Codirector (FES-Z)
Dra. María Bárcenas Castañeda, Asesor/revisor
Dra. María de los Ángeles Vargas Hernández, Asesor/revisor

Ecatepec de Morelos, México, Octubre de 2023

 <p>GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO</p>	<p>DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO DE TESIS</p> <p>FO-TESE-DA-90</p> <p>TIT05-ANEXO PM</p>	
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA QUÍMICA Y BIOQUÍMICA
PROGRAMA DE POSGRADO: MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA

Fecha: 27 DE ABRIL DE 2023

LIC. MARICELA REYES ALONSO
Jefa de la Unidad de Registro y Certificación
Presente

Datos generales

Nombre del alumno: ROMERO PÉREZ ALEXIS MARCO ANTONIO
 Apellido paterno Apellido materno Nombres (s)

Matrícula: 202111083

PROYECTO: DESEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROL TOLERANTE A FALLAS EN SENSORES DE NIVEL EN TANQUES POR ACOMODACIÓN

DIRECTOR: DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ
 CO-DIRECTOR: DR. FRANCISCO VIDAL CABALLERO DOMÍNGUEZ

Dictamen:

Con base en el registro No. 2 correspondiente al periodo escolar 2021-1 asignado al proyecto de tesis **Diseño y simulación de un control tolerante a fallas en sensores de nivel en tanques por acomodación** presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

Comité Tutorial

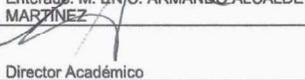

 DRA. MARIANA BÁRCENAS CASTAÑEDA
 Asesora


 DRA. MARÍA DE LOS ÁNGELES VARGAS
 HERNÁNDEZ
 Asesor




 DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ
 Director

c.c.p. Director de Tesis
 Alumno
 Expediente

Elaboró: DR. MIGUEL ÁNGEL VACA HERNÁNDEZ  Coordinador de Posgrado	Revisó y Visto Bueno: M. EN I. Q. JUDITH CERVANTES RUIZ  Jefe de División	Enterado: M. EN C. ARMANDO ALCALDE MARTÍNEZ  Director Académico
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

El autor de este trabajo agradece las becas para estudios de posgrado otorgadas por:

El Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) con Folios 2021BPC1-M0272 y 2022BPC1-M0548, durante tres semestres

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), CVU 1195741, durante un semestre.

Y por el apoyo para la participación en Congresos Nacionales y publicación de Artículos de Investigación al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación (PAPIME) “Integración de tópicos para control tolerante a fallas en la actualización del programa de dinámica y control de procesos de Ingeniería Química” con clave PE112423, de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Tabla de contenido

Resumen.....	7
Abstract.....	8
Capítulo 1. Introducción.....	9
1.1. Problemática.....	11
1.2. Justificación.....	11
1.3. Antecedentes.....	12
1.4. Objetivos.....	13
1.4.1. Objetivo general.....	13
1.4.2. Objetivos particulares.....	13
Capítulo 2. Marco teórico.....	14
2.1. Clasificación de fallas.....	14
2.2. Sistema de diagnóstico de fallas.....	15
2.2.1. Sistema de diagnóstico de fallas basado en modelos.....	16
2.2.2. Espacio de estados.....	17
2.2.2.1. Observabilidad.....	18
2.2.2.2. Controlabilidad.....	18
2.2.2.3. Estabilidad.....	19
2.2.3. Observador de estados.....	20
2.2.3.1. Observador Luenberger.....	22
2.2.3.2. Observador Kalman.....	22
2.2.3.3. Observador de Entradas Desconocidas con enfoque descriptor.....	23
2.2.4. Banco de observadores.....	26
2.2.4.1. Matriz de incidencias por residuos.....	27
2.3. Control tolerante a fallas.....	28
2.3.1. Enmascaramiento de fallas en sensores.....	30
Capítulo 3. Metodología.....	31
3.1. Propuesta y análisis del sistema de tanques.....	31
3.2. Modelamiento del sistema.....	31
3.3. Linealización del sistema.....	32
3.4. Diseño del sistema diagnóstico de fallas GOS y DOS.....	33
3.3.1. Diseño de un observador Luenberger para el sistema de tanques.....	34

3.4. Diseño de un UIO para el sistema de tanques.	35
3.5. Estabilidad del sistema de control.	38
3.6. Simulación del control tolerante a fallas.	40
Capítulo 4. Resultados y análisis.	41
4.1. Puntos de equilibrio y linealización.	41
4.2. Verificación de observabilidad en caso de pérdida de sensor.	42
4.3. Sistema diagnóstico mediante un UIO con enfoque descriptor.	42
4.4. Control tolerante con enmascaramiento de falla.	46
5. Conclusiones y trabajo futuro.	64
6. Bibliografía referenciada.	66
7. Bibliografía consultada.	69
Anexo 1. Código MATLAB para el UIO con enfoque descriptor.	70
Anexo 2. Productos de la tesis.	72

Resumen.

La automatización tiene como objetivo, cumplir con los parámetros deseados de operación para salvaguardar a los equipos, trabajadores y ambiente; así como la calidad de los productos procesados. Un valor no deseado del nivel de líquido puede provocar diversos accidentes, por lo que es ideal tener instrumentos de control en óptimas condiciones. Sin embargo, estos dispositivos son susceptibles a fallas, provocando que el proceso se encamine a la inestabilidad. Por esta razón, contar con un sistema de detección de fallas que permita a su vez, estabilizar y/o controlar el proceso a pesar de la presencia de fallas sin tener que modificar los parámetros de control, es el objetivo del control tolerante a fallas. El presente trabajo propone un sistema de tres tanques en serie para el diseño y simulación de un sistema diagnóstico que detecte, aíse y estime la magnitud de falla en sensores de nivel, cuya información se integra a un control tolerante activo para compensar la medición dada por el instrumento con falla y continuar con los parámetros de control sintonizados a partir de una operación libre de falla.

Palabras clave: *Falla, Sensor, Diagnóstico, Control Tolerante Activo, Tanque.*

Abstract.

Automation aims to meet the desired operating parameters to safeguard equipment, workers, and the environment, as well as the quality of the processed products. An unwanted value of the liquid level can cause various accidents, so it's ideal to have control instruments in optimal conditions. However, these devices are always susceptible to failure, causing the process to head towards instability. For this reason, having a fault detection system that allows, in turn, to stabilize and control the process despite the presence of faults without having to modify the control parameters, is the objective of fault-tolerant control. The present work proposes a system of three tanks in series for the design and simulation of a diagnosis system that detects, isolates, and estimates the failure in level sensors, whose information is integrated into an active tolerant control to compensate the measurement given by the faulty instrument and continue with the tuned control parameters from fault-free operation.

Key words: *Fault, Sensor, Diagnosis, Active Tolerant-Control, Tank.*

Capítulo 1. Introducción.

Con el avance de los años, la automatización industrial ha ido incrementándose de manera progresiva debido a diversos desarrollos científicos y tecnológicos (Figura 1), con la finalidad de mejorar el rendimiento de los procesos y la calidad de productos; preservar recursos materiales y energéticos bajo un panorama sostenible; y proteger la integridad de equipos, instrumentos, operadores, y medio ambiente. Sin embargo, la automatización está sujeta a la aparición de fallas en sensores, actuadores u otros elementos del sistema, provocando cambios en los parámetros de operación y del sistema de control, aproximándose a la inestabilidad del proceso.

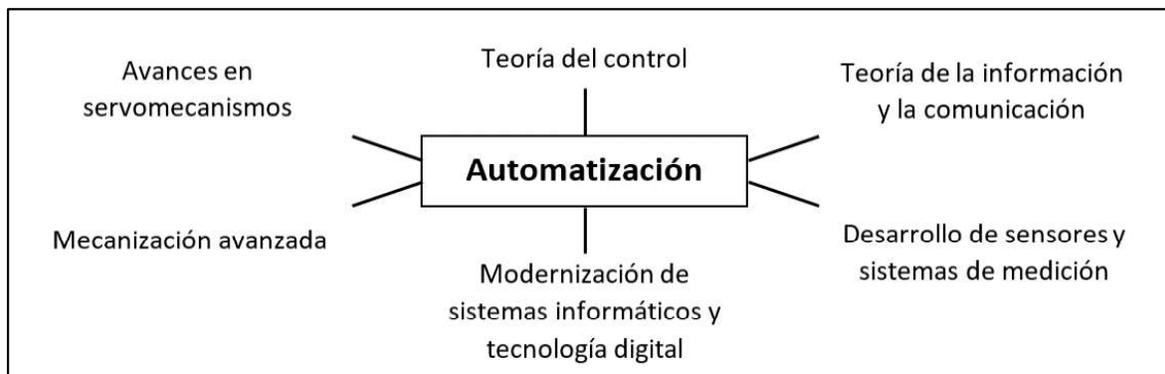


Figura 1. Desarrollos científicos y tecnológicos que contribuyen a la automatización industrial. Basado de *Integración de sistemas de automatización industrial* por Escaño et al. (2019, p. 02).

Una de las principales aplicaciones de la teoría de control moderno es la prevención del deterioro de los sistemas a causa de la presencia de fallas, por lo que se han diseñado diversas técnicas para el diagnóstico y control tolerante a fallas.

Un sistema de diagnóstico de fallas (SDF) es el paso inicial para detectar la aparición de anomalías en algún instrumento involucrado en el sistema de control del proceso que se esté llevando a cabo. Zhang et al. (2016) clasifica las metodologías para la construcción de un SDF en tres tipos basados en: conocimientos, señales, o modelos.

El control tolerante a fallas (CTF) tiene como objetivo estabilizar el sistema a pesar de la presencia de un determinado número de fallas, para continuar el proceso en

condiciones seguras y tener suficiente tiempo para el mantenimiento, o en su defecto, reemplazo del instrumento o elemento. Dentro del diseño del CTF se consideran dos tipos de enfoques: el control tolerante a fallas pasivo (CTFP) y el control tolerante a fallas activo (CTFA).

A continuación, se presenta la estructura del trabajo:

En el primer capítulo se aborda la problemática y la justificación para el diseño del CTF, especificando los objetivos necesarios para ello; así como antecedentes en esta rama de la ingeniería en control.

En el segundo capítulo se desarrolla un marco teórico referente a la descripción de fallas, espacio de estados y características del sistema, sistema de diagnóstico de fallas basado en modelos, observadores de estados, control tolerante a fallas, así como las ecuaciones fundamentales para el diseño de cada uno de los tópicos anteriores.

En el tercer capítulo se describe toda la metodología que se emplea para modelar un sistema de tanques en serie, linealizar, y seleccionar el SDF conveniente para la estimación de fallas. Seleccionando el SDF adecuado, se desarrollan las ecuaciones y desigualdades que se deben resolver para satisfacer la estabilidad del observador empleado. Concluyendo con el procedimiento para el diseño del CTF que compense las fallas involucradas en cada uno de los sensores de nivel empleados en los tanques, y sea insensible a éstas.

El cuarto capítulo establece la configuración de tres tanques en serie que se analizará, modelando matemáticamente el sistema. A partir del *solver* SeDuMi integrado a MATLAB, se resuelven las ecuaciones y desigualdades necesarias para el diseño del SDF, y posteriormente mediante Simulink se simula el comportamiento de los sensores de nivel para cada uno de los tanques adicionándoles fallas con comportamientos abruptos, de amplia y pequeña magnitud, así como intermitentes. Con lo anterior, se demuestra el trabajo del SDF para diseñar el CTF propicio, el cual se estudia mediante la incorporación de las fallas antes mencionadas, y cambios en las señales de entrada: *Set Point* y flujo de alimentación.

Finalmente, en el quinto capítulo se resumen los análisis y se concluye el funcionamiento del CTF diseñado, mencionando las observaciones y recomendaciones para futuros trabajos.

1.1. Problemática.

Los instrumentos como actuadores y sensores son vitales para los sistemas de control en los procesos industriales, en donde el paso del tiempo de los instrumentos, o su incorrecta instalación generan la aparición de fallas.

Uno de los estados de mayor importancia en los procesos es el nivel del líquido dentro de tanques, ya que la presencia de alguna falla en estos puede provocar derrames, disminución de calidad de productos, mezclas indeseadas, o un mal funcionamiento en los servicios auxiliares necesarios.

En diversas instituciones como en el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, o en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, entre otras, no se cuenta con un sistema de operación que facilite a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química abordar el tópico de control tolerante, el cual les permitiría visualizar y comprender las herramientas necesarias para poder controlar los procesos de manera activa sin o con presencia de fallas en los instrumentos fundamentales de control.

1.2. Justificación.

Uno de los sistemas de mayor interés académico y profesional para el diseño del CTF son los hidráulicos debido al transporte, almacenamiento, y mezclado de sustancias que son el núcleo de los procesos químicos. El CTF en estos procesos busca reducir el riesgo de derrame de sustancias peligrosas, mezcla indeseada de líquidos, disminución de la calidad de productos, deficiente distribución de servicios auxiliares, uso eficiente de energía, etcétera.

En el presente trabajo se diseña un CTF en sensores de nivel para un sistema hidráulico de tanques en serie bajo un enfoque activo por acomodación, empleando un SDF basado en modelos matemáticos linealizados, y mediante MATLAB/Simulink, se simula, analiza y describe el comportamiento del control. Por acomodación se entiende que los parámetros del controlador se ajustan, conservando las señales de entrada y

salida, con o sin falla, para mantener el proceso en las condiciones deseadas o ligeramente degradadas. La investigación es parte del proyecto PAPIME con clave PE112423, que se desarrolla en la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza y que tiene por objetivo montar e instrumentar sistemas de tanques para realizar diversos estudios sobre fallas en sensores, bombas, válvulas, y fugas.

1.3. Antecedentes.

El estudio y desarrollo del CTF ha sido enfocado en los últimos años en sistemas de generación de energía, transporte, o procesos fisicoquímicos; mediante diferentes metodologías que van desde el modelamiento matemático, hasta el manejo de bases de datos incorporado a la lógica difusa o inteligencia artificial.

En cuestión de generación de energía, existen diversos trabajos de diseño de CTF, como los reportados por Borja (2022) en sistemas de energía eólica empleando un control con enfoque pasivo, o por Ramírez (2022) en Micro-Redes mediante un control con enfoque pasivo, observadores H_∞ y redes neuronales.

Kharrat et al. (2018) desarrollan un CTFP para un tractocamión, empleando modelos difusos Takagi-Sugeno para linealizar el sistema, así como observadores H_∞ para la detección, aislamiento y estimación de fallas en sensores y actuadores. Este mismo enfoque Takagi-Sugeno es empleado por De los Santos (2020) para el CTFP de una grúa para fallas aditivas en actuadores. Wang (2020) diseña un CTFA a partir de la reconfiguración del control, empleando como SDF un banco de observadores Luenberger para la detección y aislamiento de fallas en los sensores de un vehículo submarino no tripulado.

Para estudios de sistemas de tanques se cuentan con diversas investigaciones. Anzures y Pitalúa (2009) diseñan un SDF para la detección y aislamiento de fallas en sensores de nivel, empleando un observador de entradas desconocidas y residuos estructurados, para un sistema de dos tanques. Córdova (2017) elabora un SDF y CTF en actuadores para un sistema de cuatro tanques acoplados, estimando las magnitudes de falla mediante un observador de entradas desconocidas y la descomposición en valores singulares (enfoque descriptor) y un control activo a partir de la compensación

de las fallas. Patel y Shah (2018) desarrollan un CTFP para un sistema de dos tanques cónicos a partir de redes neuronales, considerando fugas en los tanques. Mosaja (2021) diseña un CTFP a partir de lógica difusa de Takagi-Sugeno para un tanque de nivel, considerando fugas y obstrucciones en el sistema.

Como se aprecia, muchas de las investigaciones abordan sistemas de CTFP enfocados a lógica difusa y redes neuronales, lo que implica un control más enfocado a la experiencia del proceso que al conocimiento completo del éste. El presente trabajo aborda el estudio de un sistema de tres tanques en serie con y sin interacción para el diseño de un SDF a partir de un observador de entradas desconocidas con enfoque descriptor para detectar, aislar y estimar las magnitudes de fallas en sensores, y a partir de la compensación de estas fallas, contar con un CTFA capaz de controlar el proceso considerando desviaciones en el flujo de alimentación y en los valores deseados para los niveles dentro de los tanques.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

Diseñar un control tolerante a fallas activo en sensores de nivel aplicado a un sistema de tanques.

1.4.2. Objetivos particulares.

- Establecer el modelo dinámico de un sistema de tanques en serie en su forma general y en espacio de estados.
- Determinar la observabilidad del sistema para los casos de una sola falla y múltiples fallas.
- Diseñar un observador que permita la detección, aislamiento y estimación de fallas.
- Simular y analizar el sistema diagnóstico a partir de fallas en los sensores de nivel de tipo abruptas y graduales.
- Enmascarar la falla en sensores para el sistema de control tolerante.
- Simular y analizar el sistema de control tolerante a partir de desviaciones en el flujo de alimentación y el valor deseado de nivel.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. Clasificación de fallas.

Una falla provoca un cambio en el comportamiento de las entradas y/o salidas en sensores, actuadores o componentes del sistema; este cambio puede ser tan pequeño tal que se considere la ausencia del fallo, o tan grande que se ubique dentro de una región de condiciones no deseadas (Figura 2).

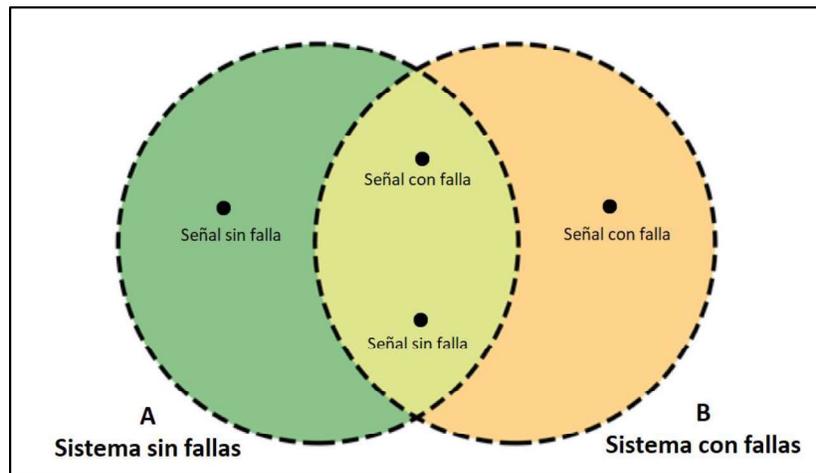


Figura 2. Representación de regiones de un sistema con y sin fallas.

Una forma de clasificar a la falla es a partir de la dinámica de su comportamiento, ya sea abrupto, gradual, o intermitente. La falla abrupta (Figura 3a) es la más complicada de corregir debido a que el cambio de la señal es inmediato; generalmente aparece por la desconexión, daño, o reubicación del componente. La falla gradual (Figura 3b) presenta una dinámica lenta provocada por el desgaste paulatino. La falla intermitente (Figura 3c) es aquella que aparece y desaparece reiterativamente, generada por una inadecuada conexión.

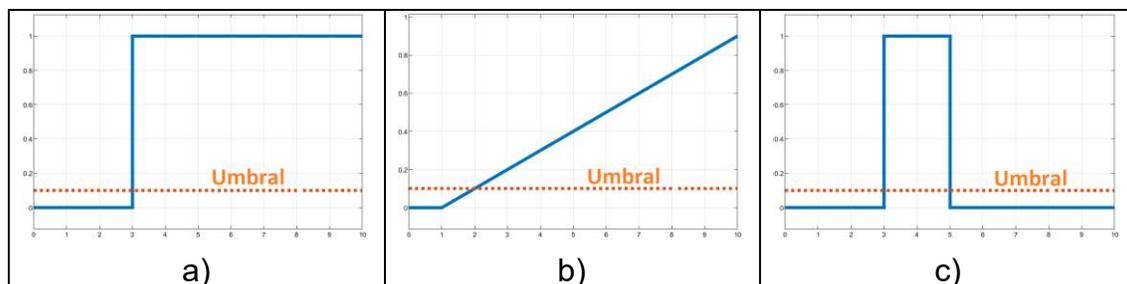


Figura 3. Comportamiento de una a) falla abrupta, b) falla gradual, y c) falla intermitente.

La teoría de control moderno plantea el diseño de un CTF en búsqueda de estabilizar el proceso en las condiciones deseadas o degradadas por la aparición de alguna falla, evitando así la generación de accidentes que afecten a los equipos, personal, y medio ambiente.

Blanke (2016) plantea que el CTF aborda dos pasos: el diagnóstico de fallas y el rediseño del lazo de control. Por lo tanto, se debe identificar las herramientas con las que se dispone en el proceso, para seleccionar el camino pertinente en el diseño del CTF.

2.2. Sistema de diagnóstico de fallas.

A mediados del siglo XX se inicia con el desarrollo de los SDF los cuales se encargan de detectar e identificar la existencia de fallas dentro de los lazos de control, incorporados en los diversos procesos productivos. Para lograr lo anterior, se supervisan las señales de entrada y salida del sistema, proporcionadas por los sensores, para comprobar la consistencia de la información medida, y esta comparación se apoya en la redundancia existente la cual puede física o analítica.

La redundancia física o de *hardware* se identifica como la existencia de más de un medidor con las mismas características, sin embargo, dependiendo de la arquitectura y funcionalidad de este instrumento, se genera una inversión económica muy grande, lo que hace frecuentemente inviable la selección de esta opción.

Por otro lado, la redundancia analítica o de *software* emplea modelos matemáticos para estimar el valor que proporcionaría un sensor físico, a partir de mediciones de diferentes variables del proceso a la que se desea determinar, por lo que se sitúa como la mejor opción si se carece de la solvencia económica para adquirir el medidor deseado.

El SDF se clasifica mediante tres métodos basados en: conocimientos, señales, o modelos. Zhang et al. (2016) explica con detalle las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos, que dependen tanto del tipo y cantidad de información que envía o recibe el *hardware* con el que se cuenta en el proceso, como de la forma de programación requerido.

El desarrollo de mejores instrumentos de medición y control ha encarecido a los mismos, por lo que pequeñas y medianas industrias optan por mantener dispositivos de

baja gama y sin establecer redundancia física, aumentando la probabilidad de aparición de falla e inestabilidad del sistema. Por tal motivo, el método del SDF que mejor cubre los inconvenientes anteriormente mencionados es el basado en modelos matemáticos.

2.2.1. Sistema de diagnóstico de fallas basado en modelos.

El método basado en modelos emplea la información dada por los sensores, para estimar computacionalmente la magnitud de las diversas variables de operación involucradas mediante modelos matemáticos, y comparar estos valores analíticos con las mediciones proporcionadas por los sensores. Esta comparación se realiza mediante una diferencia matemática que se le conoce como residuo (Figura 4). Si se considera que las mediciones de los sensores no presentan ruido, un residuo igual a cero indica la inexistencia de fallas, mientras que un residuo diferente de cero identifica la presencia de fallas en el sistema. Sin embargo, en la realidad los sensores arrojan ruido en sus lecturas, por lo que es necesario establecer un umbral para que el SDF no considere como falla un residuo diferente de cero propiciado por la presencia del ruido anteriormente mencionado.

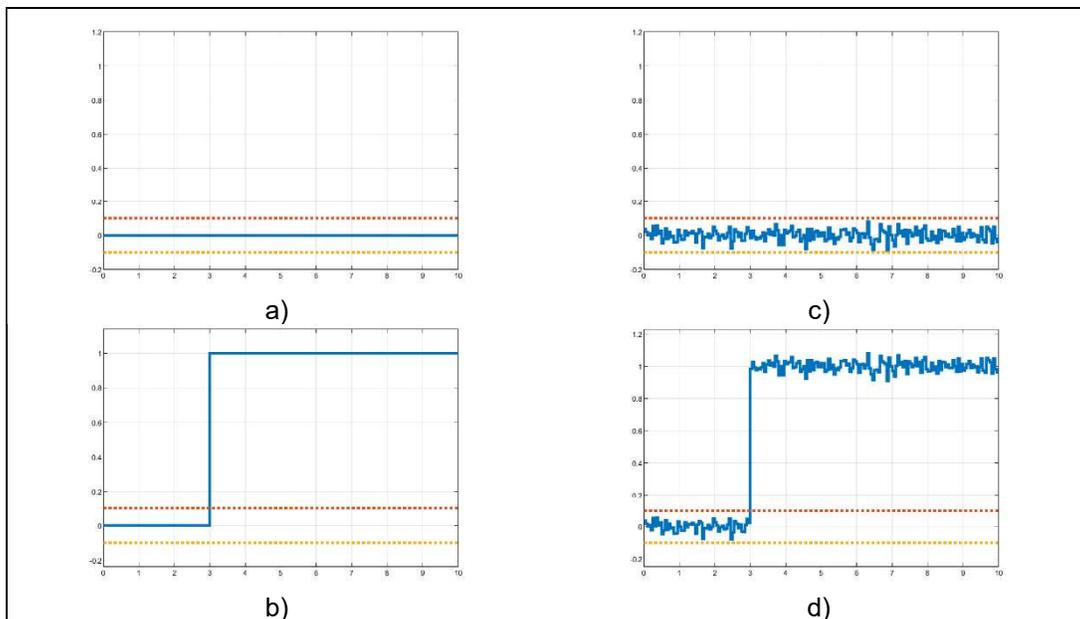


Figura 4. a) Sistema sin falla reflejado por un residuo igual a cero. b) Sistema con falla reflejado por un residuo diferente de cero que sobrepasa a un umbral establecido. c) Sistema sin falla reflejado por un residuo cercano a cero que no sobrepasa un umbral establecido, considerando ruido en la medición. d) Sistema con falla reflejado por un residuo diferente de cero que sobrepasa un umbral establecido, considerando ruido en la medición.

Existen diversas técnicas para la generación de residuos, las cuáles la literatura ha clasificado en tres grupos: ecuaciones de paridad, estimación de parámetros, y observadores; siendo esta última la más empleada por ser un sistema auxiliar el cual provee resultados que son independientes (asintómicos) del valor estimado inicial (Blanke et al., 2016). Se basa en la estimación de los valores de entrada o salida mediante las lecturas de los sensores involucrados en la operación, provocando redundancia analítica.

2.2.2. Espacio de estados.

El espacio de estados es una forma matricial de representar un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales que modelan el comportamiento del sistema (Figura 5). Matemáticamente el modelo de tiempo continuo se representa como:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Y para un sistema de tiempo discreto:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde $\dot{x}(t)$ es el vector de la dinámica de los estados, $x(t)$ el vector de estados, $y(t)$ el vector de variables de salida, $u(t)$ el vector de variables de entrada, A la matriz del proceso, B la matriz de entrada y C la matriz de salida.

Debido a que son pocos los procesos en donde se presenta una alimentación directamente en la salida, la matriz D usualmente se considera con un valor de cero.

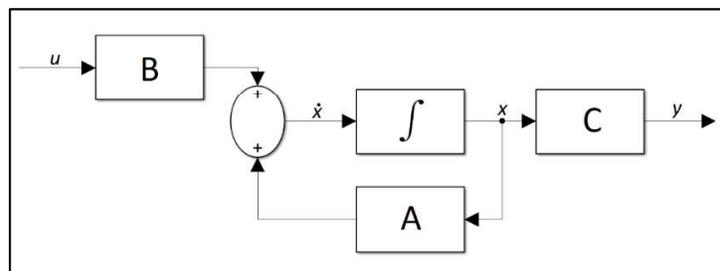


Figura 5. Esquema por bloques del espacio de estados.

Para modelar adecuadamente mediante espacio de estados se considera que las matrices A , B y C tienen dimensiones $n \times n$, $n \times m$ y $l \times n$ respectivamente, donde n representa el número de variables de estado, m el número de variables de entrada y l el número de variables de salida.

Las cuatro ecuaciones anteriores representan un sistema invariante en el tiempo lineal (LTI), debido a que las matrices A , B y C son constantes, sin embargo, si los parámetros dentro de estas matrices cambian con respecto al tiempo el sistema es lineal de parámetros variables (LPV) cuyas ecuaciones de modelo son:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$y(t) = C(t)x(t) \quad (\text{Ecuación 6})$$

2.2.2.1. Observabilidad.

Un sistema es completamente observable si cada estado inicial $x(t_0)$ puede ser determinado mediante el conocimiento de las señales de entrada $u(t)$ y las señales de salida $y(t)$ a través de un intervalo finito de tiempo.

$$L_O = [C^T \quad A^T C^T \quad (A^T)^2 C^T \quad \dots \quad (A^T)^{n-1} C^T] \quad (\text{Ecuación 7})$$

Si y sólo si la matriz de observabilidad L_O de dimensiones $n \times nl$ tiene un rango igual a n , entonces el sistema es completamente observable.

2.2.2.2. Controlabilidad.

Un sistema es completamente controlable si para cada estado inicial $x(t_0)$ puede ser conducido a otro estado $x(t)$ a través de un intervalo finito de tiempo.

$$L_C = [B \quad AB \quad A^2 B \quad \dots \quad A^{n-1} B] \quad (\text{Ecuación 8})$$

Si y sólo si la matriz de controlabilidad L_C de dimensiones $n \times nm$ es de rango igual a n , entonces el sistema es completamente controlable.

Sin embargo, si la influencia de las variables de entrada de control $u(t)$ influyen en las variables de salida $y(t)$ se estudia la controlabilidad en estas últimas. Esto quiere

decir que las salidas $y(t)$ son completamente controlables si y sólo si la matriz de controlabilidad L_C^0 de dimensiones $l \times nm$ tiene un rango igual a l , donde:

$$L_C^0 = [CB \quad CAB \quad \dots \quad CA^{n-1}B] \quad (\text{Ecuación 9})$$

2.2.2.3. Estabilidad.

Todos los sistemas controlables también son estables, sin embargo, no todos los sistemas estables son completamente controlables, es decir, que dado un estado inicial $x(t_0)$ no se puede conducir a otro estado 1 deseado $x(t_1)$, pero sí se puede llegar a un estado 2 $x(t_2)$ cercano al estado 1.

Si el control empleado es un *feedback* Proporcional (P), el vector de entrada $u(t)$ en variables de estado toma la forma:

$$u(t) = -Kx(t) \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde K de dimensiones $m \times n$ es la matriz de ganancias del controlador. Sustituyendo la ecuación 10 en la ecuación 1 se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) - BKx(t) \\ \dot{x} &= (A - BK)x(t) \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Si y sólo si la parte real de todos los valores propios de la matriz $(A - BK)$ son negativos, entonces el sistema es estable.

Si el control proporcional es en las variables de salida (Figura 6), entonces el vector de entrada $u(t)$ en variables de estado es:

$$u(t) = -Ky(t) \quad (\text{Ecuación 12})$$

Sustituyendo la ecuación 2 y 12 en la ecuación 1:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) - BKCx(t) \\ \dot{x} &= (A - BKC)x(t) \end{aligned} \quad (\text{Ecuación 13})$$

En este caso, la estabilidad se consigue si y sólo si la parte real de todos los valores propios de la matriz $(A - BKC)$ son negativos.

En un control *feedback* ideal se desea que el valor de la variable de salida $y(t)$ se estabilice en un valor de referencia $y_{SP}(t)$ o *set point* previamente establecido, por tal motivo se calcula la señal de error $e(t)$ mediante la diferencia:

$$e(t) = y_{SP}(t) - y(t) \quad (\text{Ecuación 14})$$

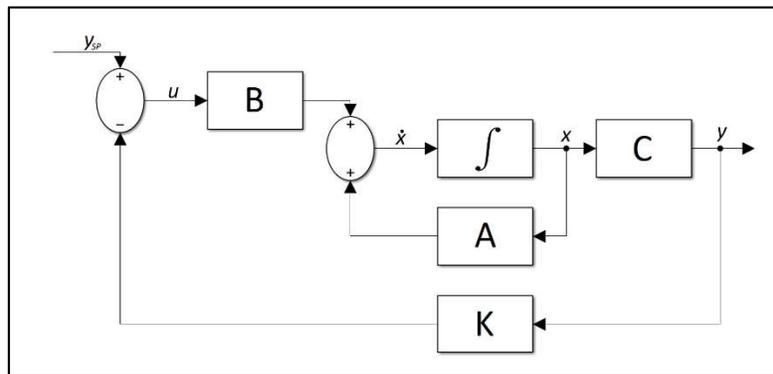


Figura 6. Lazo de control P en espacio de estados.

El sistema es completamente controlable si la señal de error $e(t)$ tiende a cero cuando el tiempo tiende a infinito, llegando al estado estacionario.

2.2.3. Observador de estados.

Un observador permite la estimación de estados, la detección de la presencia de alguna falla y, dependiendo del tipo de observador desarrollado, estimar la magnitud de la falla.

El observador de estados se diseña a partir de los valores de las variables de entrada y salida del sistema, empleando un factor de ganancia que permite compensar la diferencia que existe entre el valor leído por el sensor y el valor estimado por el observador. Un observador de estados de manera general (Figura 7) se expresa de la siguiente forma:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_0 r(t) \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \quad (\text{Ecuación 16})$$

Cuyo error de estimación se obtiene mediante:

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t) \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde el valor residual es obtenido mediante la diferencia de la salida actual del sistema y la salida estimada del observador, de manera que:

$$r(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde $\hat{\dot{x}}(t)$ es el vector de la dinámica de los estados estimados, $\hat{x}(t)$ el vector de estados estimados, $\hat{y}(t)$ el vector de variables de salida estimadas y K_o la ganancia del observador.

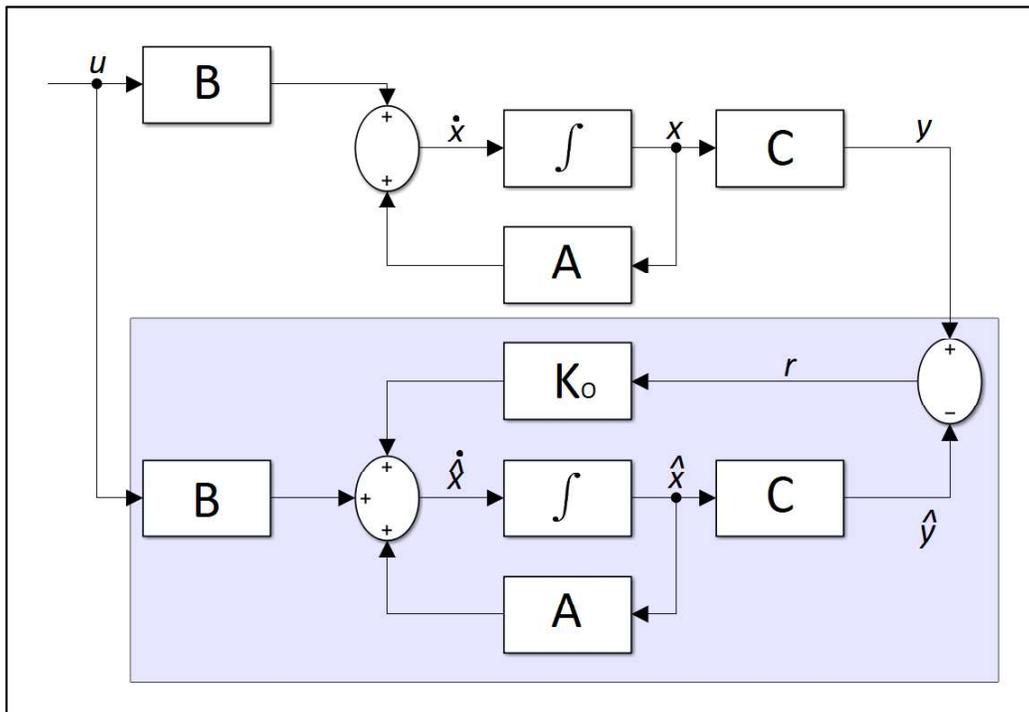


Figura 7. Esquema del espacio de estados del sistema y de un observador de estados.

Sustituyendo la ecuación 18 en 15 se tiene:

$$\hat{\dot{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_o[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (\text{Ecuación 19})$$

Luenberger y Kalman introdujeron los primeros observadores en 1960's, cuyas mejoras en su diseño, ha incrementado su precisión y desempeño en problemas como

disturbios, desajustes y fallas en procesos. Muchos de los observadores son modificaciones del observador Luenberger y el filtro Kalman (Gómez, 2016).

2.2.3.1. Observador Luenberger.

Uno de los observadores más empleados y sencillos de diseño es el tipo Luenberger que se expresa matemáticamente como:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_L[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (\text{Ecuación 20})$$

El observador es eficiente cuando el error sea mínimo, por esta razón la ecuación 17 se deriva para este fin:

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) \quad (\text{Ecuación 21})$$

En la ecuación 21 se sustituyen las ecuaciones 1,2,16 y 20:

$$\dot{e}(t) = Ax(t) + Bu(t) - \{A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_L[Cx(t) - C\hat{x}(t)]\} \quad (\text{Ecuación 22})$$

Al reducir términos y sustituir la ecuación 17 en la ecuación 22 se llega a la expresión:

$$\dot{e}(t) = (A - K_L C)e(t) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Cabe recalcar que el objetivo en el diseño del observador, en este caso Luenberger, es encontrar los valores de la matriz K_L que produzca que el error de estimación tienda asintóticamente a cero, es decir, sea estable.

El observador Luenberger puede ser empleado para sistemas de tiempo continuo o tiempo discreto. Las desventajas de este observador se encuentran en que se basa en la estructura perfectamente conocida del modelo (Botero, 2009) y puede presentarse error en la estimación debido al ruido en las mediciones (Gómez, 2016).

2.2.3.2. Observador Kalman.

En muchas ocasiones los estados, las mediciones de los estados, o ambos; presentan ruido, lo que provoca que los sensores empleados envíen información con un rango de error. Para este tipo de comportamiento se puede diseñar un filtro Kalman que predice y corrige. Este algoritmo pronostica el nuevo estado del sistema a partir de su

estimación previa, añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente (Florián, 2018). La estructura del filtro Kalman es el siguiente:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k) \quad (\text{Ecuación 24})$$

$$y(k) = Cx(k) + v(k) \quad (\text{Ecuación 25})$$

El término $w(k)$ describe el ruido estocástico del proceso y $v(k)$ el ruido estocástico en la medición. Para el diseño del observador Kalman el estimador resulta:

$$\hat{x}(k + 1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) + K_K[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (\text{Ecuación 26})$$

De manera similar al observador Luenberger, el objetivo de minimizar el error del valor estimado con el valor real del sistema se desarrollan las ecuaciones:

$$e(k) = x(k) - \hat{x}(k) \quad (\text{Ecuación 27})$$

$$e(k + 1) = x(k + 1) - \hat{x}(k + 1) \quad (\text{Ecuación 28})$$

$$e(k + 1) = Ax(k) + B(k) + w(k) - A\hat{x}(k) - Bu(k) - K_K[y(k) - \hat{y}(k)] \quad (\text{Ecuación 29})$$

Simplificando la ecuación 29 finalmente se obtiene:

$$e(k + 1) = (A - K_K C)e(k) + w(k) - K_K v(k) \quad (\text{Ecuación 30})$$

El valor de ganancia K_K debe ser tal que el error de estimación tienda asintóticamente a cero, o sea estable, por lo que la parte real los valores propios de la operación $(A - K_K C)$ sean todos negativos.

2.2.3.3. Observador de Entradas Desconocidas con enfoque descriptor.

Si bien existen diversas estrategias para el SDF empleando los observadores Luenberger o Kalman para la identificación y aislamiento de falla, como son la implementación de un banco de observadores generalizados o dedicados, dependiendo del tipo de control tolerante a fallas que se desee diseñar, se puede requerir además la estimación de la falla. El observador de entradas desconocidas (UIO) mejora la robustez y la estimación de estados frente entradas con incertidumbre que afectan al sistema.

Para el caso anterior, el modelo de espacio de estados en su forma estándar no logra describir el comportamiento completo del sistema, por lo que para generalizarlo se emplea un enfoque descriptor.

Recordando la forma estándar del espacio de estados para un sistema con falla en sensores:

$$E\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$y = Cx(t) + Df_s(t) \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde f_s es el vector de fallas en sensores, la generalización del sistema para obtener el enfoque descriptor se expresa como:

$$\bar{E}\dot{\bar{x}}(t) = \bar{A}\bar{x}(t) + \bar{B}u(t) + \bar{D}d_s(t) \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$\bar{y}(t) = \bar{C}\bar{x}(t) \quad (\text{Ecuación 34})$$

En tabla 1 se reportan los elementos de las matrices involucradas en las ecuaciones 33 y 34. Es así como el término $d_s(t)$ tiene relación directa con $f_s(t)$:

$$d_s(t) = Df_s(t) \quad (\text{Ecuación 35})$$

Tabla 1. Matrices del modelo con enfoque descriptor.

$\bar{x}(t)$	\bar{E}	\bar{A}	\bar{B}	\bar{C}	\bar{D}
$\begin{bmatrix} x(t) \\ d_s(t) \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & -I_p \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} C & I_p \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ I_p \end{bmatrix}$

Si el sistema es observable, el UIO se establece como:

$$\dot{z}(t) = Nz(t) + H_1\bar{B}u(t) + K_U y(t) \quad (\text{Ecuación 36})$$

$$\hat{\bar{x}}(t) = z(t) + H_2 y(t) \quad (\text{Ecuación 37})$$

Despejando la variable z de la ecuación 37:

$$z(t) = \hat{\bar{x}}(t) - H_2 y(t) \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde las matrices N, H_1, H_2 y K_U son las ganancias del observador a calcular para que el error de estimación tienda a cero. De la ecuación 17, se sustituyen las ecuaciones 34 y 37, factorizando la variable de estados:

$$\bar{e}(t) = (I - H_2\bar{C})\bar{x}(t) - z(t) \quad (\text{Ecuación 39})$$

Si se considera que:

$$I - H_2\bar{C} = H_1\bar{E} \quad (\text{Ecuación 40})$$

Entonces la ecuación 39 se puede reescribir como:

$$\bar{e}(t) = H_1\bar{E}\bar{x}(t) - z(t) \quad (\text{Ecuación 41})$$

Derivando la ecuación 41:

$$\dot{\bar{e}}(t) = H_1\bar{E}\dot{\bar{x}}(t) - \dot{z}(t) \quad (\text{Ecuación 42})$$

Sustituyendo en la ecuación anterior las ecuaciones 17, 33, 34, 36, 38, y reduciendo la ecuación resultante:

$$\dot{\bar{e}}(t) = [H_1\bar{A} - (K_U - NH_2)\bar{C} - N]\bar{x}(t) + H_1\bar{D}d_s(t) + N\bar{e}(t) \quad (\text{Ecuación 43})$$

Donde:

$$K = K_U - NH_2 \quad (\text{Ecuación 44})$$

$$N = H_1\bar{A} - K\bar{C} \quad (\text{Ecuación 45})$$

Incorporando la ecuación 44 y 45 en 43 se simplifica a:

$$\dot{\bar{e}}(t) = H_1\bar{D}d_s(t) + N\bar{e}(t) \quad (\text{Ecuación 46})$$

En donde la matriz N involucra a la ganancia del observador K cuyos elementos deben propiciar que los valores propios de N sean todos negativos para que el error de estimación tienda a cero.

Cabe aclarar que para resolver la ecuación 40 (Bougatef et al., 2020), se asume que:

$$\text{Rango} \begin{bmatrix} E \\ C \end{bmatrix} = n \quad (\text{Ecuación 47})$$

2.2.4. Banco de observadores.

El objetivo del procedimiento del diagnóstico es desempeñar dos tareas principales: detección de falla, que consiste en asegurarse de la presencia o no de una falla; y aislamiento de falla, que decide cuáles elementos del sistema han fallado. Si bien un solo residuo puede ser suficiente para detectar una falla, se requiere un conjunto de residuos estructurados para el aislamiento de fallas (Noura, 2009).

Mediante el diseño de un banco de observadores, el SDF tiene la solvencia para obtener un conjunto de residuos estructurados. De acuerdo con la configuración del banco de observadores, estos pueden ser sensibles a una o múltiples fallas. Las estructuras del banco de observadores más empleadas son los dedicados (DOS) y los generalizados (GOS).

Una configuración DOS (Figura 8a) se diseña un solo observador para cada uno de los sensores presentes en el sistema. Si en el sensor n -ésimo se produce la falla, el observador n -ésimo genera un residuo diferente de cero, mientras que en el resto de los observadores los residuos son igual a cero.

Por otro lado, una estructura GOS (Figura 8b) considera para un observador todas las mediciones de los sensores excepto la del sensor a ser diagnosticado. Si el sensor n -ésimo del sistema presenta la falla, los residuos calculados por los observadores exceptos el observador n serán diferentes a cero, el cual no emplea la lectura del sensor n . La ventaja que ofrece este tipo de configuración es el incremento de la robustez ante la presencia de entradas desconocidas.

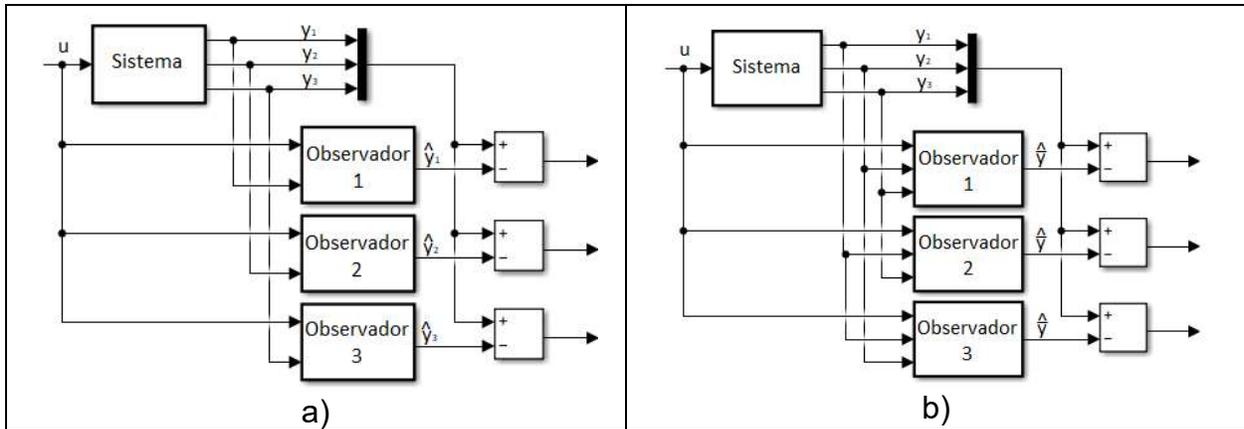


Figura 8. a) Banco de observadores DOS y b) banco de observadores GOS.

2.2.4.1. Matriz de incidencias por residuos.

Al diseñar un banco de observadores para la detección y aislamiento de fallas, la generación de residuos y análisis de estos determina si la estructura permite la identificación del instrumento con falla. Los residuos emplean la señal real que se mide y la señal estimada por el observador, calculándose como:

$$r(t) = |y(t) - \hat{y}(t)| \quad (\text{Ecuación 48})$$

De acuerdo con el tipo de estructura del banco de observadores, se genera una matriz de incidencias a partir de cada uno de los residuos calculados. Para un banco GOS, el instrumento con falla n se detecta y aísla cuando los residuos de todos los observadores son diferentes a cero, o sobrepasan el umbral establecido para la detección de falla; en esta estructura, el observador n es insensible a la falla en el sensor n , por lo que el residuo permanecerá igualado a cero, o debajo del umbral de detección. La matriz que representa este comportamiento se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de incidencias por residuos para un banco GOS.

	Incidencia en Obs. 1	Incidencia en Obs. 2	Incidencia en Obs. 3	Incidencia en Obs. ...	Incidencia en Obs. n
Falla en 1	0	1	1	...	1
Falla en 2	1	0	1	...	1
Falla en 3	1	1	0	...	1
Falla en ...	1	1	1	0	1
Falla en n	1	1	1	1	0

Para un banco DOS, el observador n es únicamente sensible a la falla n , por lo que para su detección y aislamiento se genera la matriz de incidencias de la tabla 3.

Tabla 3. Matriz de incidencias por residuos para un banco DOS.

	Incidencia en Obs. 1	Incidencia en Obs. 2	Incidencia en Obs. 3	Incidencia en Obs. ...	Incidencia en Obs. n
Falla en 1	1	0	0	...	0
Falla en 2	0	1	0	...	0
Falla en 3	0	0	1	...	0
Falla en ...	0	0	0	1	0
Falla en n	0	0	0	0	1

2.3. Control tolerante a fallas.

En un sistema de control tolerante a fallas (Figura 9) se requieren dos elementos principales: el sistema de diagnóstico y el rediseño del controlador. Como se ha mencionado en las secciones anteriores, el primer elemento permite caracterizar la falla presente en el proceso mediante las lecturas en línea de los sensores y actuadores; y el segundo elemento, a partir de la información del sistema de diagnóstico, se ajustan los parámetros del controlador empleado.

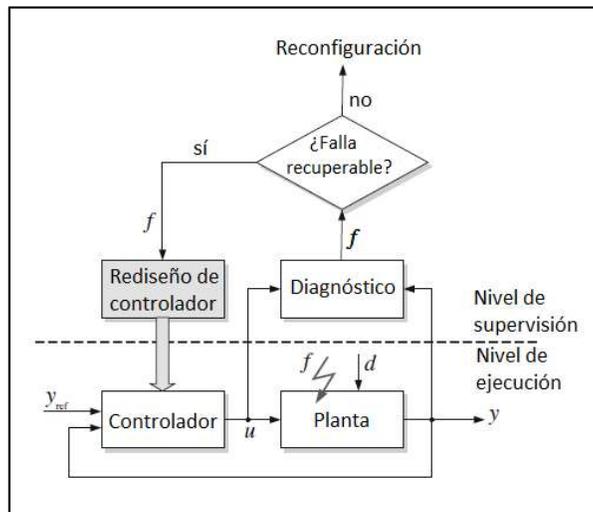


Figura 9. (Blanke, 2016) Arquitectura del control tolerante a fallas.

Rediseñar el controlador se lleva a cabo siempre y cuando el problema tenga una solución, con lo que se garantiza que el sistema es recuperable, es decir, ante la presencia de una falla el controlador es capaz de regresar el sistema a las condiciones requeridas o degradadas (Blanke, 2016). Se dice que el sistema es irreparable cuando éste es incontrolable y no observable debido a la falla.

Diseñar un CTF puede llevarse a cabo mediante dos tipos de enfoques: el control tolerante a fallas pasivo (CTFP), y el control tolerante a fallas activo (CTFA).

El CTFP se asocia con un control robusto, en el cual la ley de control no se modifica para una operación con o sin fallas, esto se debe a que el control se diseña considerando previamente desviaciones del sistema debidas a perturbaciones y considerando un conjunto de fallas, por lo que el problema de control engloba ambas situaciones y, la solución de éste establece la ley que lo satisface. Sin embargo, la teoría de control robusto muestra que sólo existen controladores robustos para una clase reducida de cambios en la dinámica del sistema provocados por los fallos (Puig et al., 2004).

El CTFA a diferencia del enfoque pasivo, modifica la ley de control a partir de la presencia de una falla. Esta ley se adapta de acuerdo con el tipo de falla que afecte al sistema lo que permite, por ende, el rediseño del controlador optando por dos vías principales: acomodación del fallo y reconfiguración de control.

Mediante la acomodación del fallo, los parámetros del controlador se ajustan conservando las señales de entrada y salida, con o sin falla, para mantener el proceso en las condiciones deseadas o ligeramente degradadas (Figura 10a), mientras se garantice que el sistema sigue siendo observable y controlable. Para la técnica de acomodación, el SDF además de identificar la falla debe ser capaz de estimar la magnitud de la falla.

Si en el sistema los sensores o actuadores fallan, éste tiende a ser inobservable e incontrolable respectivamente al instrumento de fallo; si algún otro componente falla, el comportamiento dinámico de la operación cambia, provocando que la ley de control no satisfaga al sistema. Por tales motivos el sistema de control debe ser reconfigurado (Figura 10b) mediante nuevas señales de entrada y salida, provenientes de sensores y actuadores sin fallo, rediseñando la ley de control adecuada para el nuevo comportamiento dinámico.

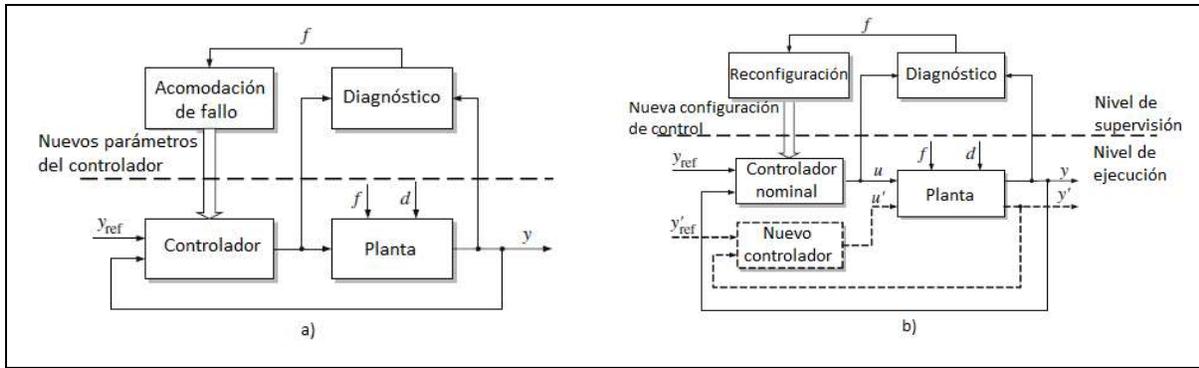


Figura 10. (Blanke, 2016) a) Acomodación de fallo. b) Reconfiguración de control.

El presente trabajo diseña un CTFA mediante acomodación de fallos debido a la limitada disponibilidad de adquisición de sensores y actuadores lo que permitiría contemplar un CTFA por reconfiguración.

2.3.1. Enmascaramiento de fallas en sensores.

De acuerdo con Noura et al. (2009), las mediciones con falla influyen en el comportamiento del lazo cerrado de control y afecta a la estimación de estados. Desde el punto de vista del control, el CTF en sensores no requiere modificación de una ley de control y es llamada “enmascaramiento”. Solamente se requiere un estimador que provea una estimación precisa de las salidas del sistema después de la ocurrencia del sensor con falla.

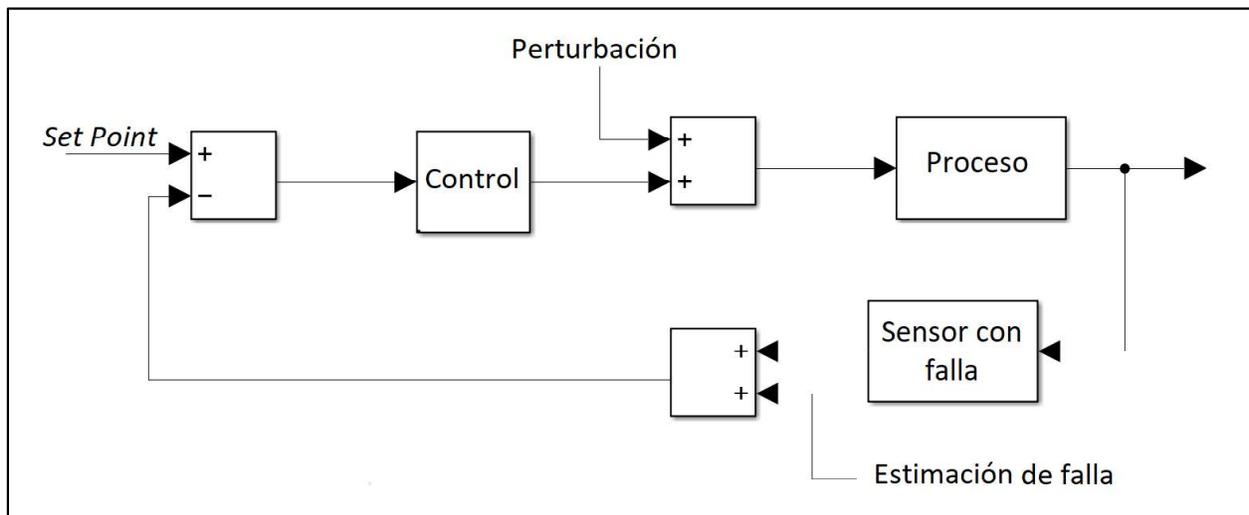


Figura 11. Lazo de control mediante enmascaramiento de falla en sensor.

Capítulo 3. Metodología.

3.1. Propuesta y análisis del sistema de tanques.

En búsqueda de diseñar un sistema de tres tanques en serie para la implementación y estudio del CTF, se propone una estructura con interacción y sin interacción entre equipos, la cual se modela matemáticamente para el posterior diseño del SDF.

La estructura es un sistema de dos tanques con interacción y un tercer tanque sin interacción (Figura 12) con una bomba de alimentación que funge como actuador hacia el tanque uno. El flujo de salida del tanque tres y el flujo de entrada hacia la bomba, se encaminan y provienen respectivamente de un depósito. Los tanques cuentan con geometría cilíndrica idéntica, sensores de nivel y válvulas de descarga.

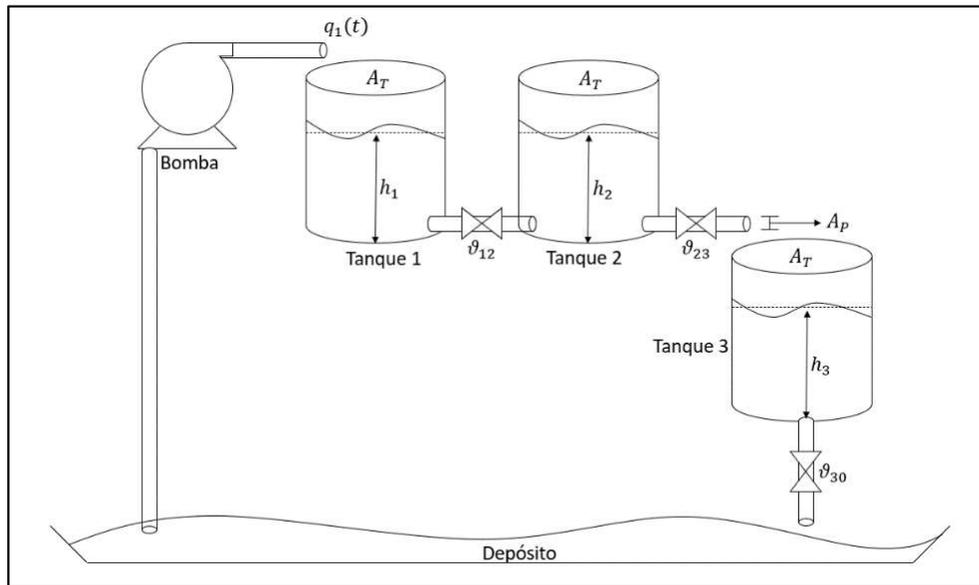


Figura 12. Primera estructura de tanques en serie propuesto.

3.2. Modelamiento del sistema.

Para estudiar la dinámica del sistema de tanques seleccionado, se realiza un balance de materia considerando que no hay cambio de temperatura a lo largo del proceso, y se manipulan las variables para establecer el modelo en términos de altura h :

$$A_T \frac{dh_1}{dt} = q_1(t) - q_{12}(t) \quad (\text{Ecuación 49})$$

$$A_T \frac{dh_2}{dt} = q_{12}(t) - q_{23}(t) \quad (\text{Ecuación 50})$$

$$A_T \frac{dh_3}{dt} = q_{23}(t) - q_{30}(t) \quad (\text{Ecuación 51})$$

Donde $q_{mn}(t)$ representan los flujos volumétricos del tanque m al tanque n , y A_T el área de sección transversal de los tanques. Mediante la ley de Torricelli estos flujos son iguales a:

$$q_{mn}(t) = \vartheta_{mn} A_P \text{sign}[h_m(t) - h_n(t)] \sqrt{2g|h_m(t) - h_n(t)|} \quad (\text{Ecuación 52})$$

Considerando que ϑ_{mn} es el coeficiente de descarga a través de las válvulas y A_P el área de sección transversal de la tubería. Obsérvese que la función sign únicamente proporciona el signo de la diferencia de las alturas de los tanques m y n . Finalmente, los flujos volumétricos $q_{23}(t)$ y $q_{30}(t)$ se expresan como:

$$q_{mn}(t) = \vartheta_{mn} A_P \sqrt{2gh_m(t)} \quad (\text{Ecuación 53})$$

El flujo $q_1(t)$ es un valor constante que puede ser representado como una función tipo escalón.

3.3. Linealización del sistema.

Como se aprecia en las ecuaciones 52 y 53, los modelos dinámicos presentan un comportamiento no lineal, por lo que el método a emplear en el presente trabajo es la obtención de LTIs representativos al sistema. Por lo anterior, se calculan en primera instancia, los puntos de equilibrio de la dinámica de tanques propuesta mediante el método Newton-Raphson:

$$f(t) = f(t_s) + J[f(t_s)][f(t) - f(t_s)] \quad (\text{Ecuación 54})$$

En donde el subíndice s identifica al valor en el estado estacionario o punto de equilibrio, y $J[f(t_s)]$ es la matriz jacobiana evaluada en esos puntos.

Al manipular la ecuación 54 y expresarla en términos de las alturas se obtiene la ecuación:

$$\bar{h}_{s+1} = \bar{h}_s - J^{-1}(h_{1s}, h_{2s}, h_{3s})\bar{f}(h_{1s}, h_{2s}, h_{3s}) \quad (\text{Ecuación 55})$$

Mediante una condición inicial supuesta para h_{1s} , h_{2s} y h_{3s} se iteran los valores h_{1s+1} , h_{2s+1} y h_{3s+1} hasta que el valor absoluto de la diferencia entre el valor supuesto h_{ns} y el nuevo valor de iteración h_{ns+1} sea menor a 1×10^{-6} [m].

Una vez se tengan los puntos de equilibrio, se sustituyen en la ecuación 54 para representar al sistema lineal en su forma de espacio de estados, donde la matriz jacobiana es igual a la matriz A de la ecuación 1. El Jacobiano obtenido para el sistema de tanques de la Figura 12 es:

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{A_p \vartheta_{12} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{|h_1 - h_2|}} & \frac{A_p \vartheta_{12} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{|h_1 - h_2|}} & 0 \\ \frac{A_p \vartheta_{12} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{|h_1 - h_2|}} & -\frac{A_p \vartheta_{12} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{|h_1 - h_2|}} - \frac{A_p \vartheta_{23} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{h_2}} & 0 \\ 0 & \frac{A_p \vartheta_{23} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{h_2}} & -\frac{A_p \vartheta_{30} \sqrt{2g}}{2A_T \sqrt{h_3}} \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 56})$$

3.4. Diseño del sistema diagnóstico de fallas GOS y DOS.

El SDF con enfoque GOS es el primero a diseñar debido a la facilidad de cumplir con el criterio de observabilidad al considerar fallas individuales en los sensores de nivel del sistema de tanques expresando a la matriz C de la ecuación 2 para cada observador como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Valores para las matrices C para el SDF con enfoque GOS.

Observador 1	Observador 2	Observador 3
$c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

Recordando que el rango de la matriz de la ecuación 7 para este caso de estudio debe ser igual a 3 para cada uno de los observadores. En el caso de que uno solo de los observadores de la tabla 4 no cumpla con el criterio de observabilidad, entonces el diseño de un banco GOS no es posible.

De manera similar se puede estudiar un SDF con enfoque DOS evaluando las matrices C como se aprecia en la tabla 5.

Tabla 5. Valores para las matrices C para el SDF con enfoque DOS.

Observador 1	Observador 2	Observador 3
$C = [1 \ 0 \ 0]$	$C = [0 \ 1 \ 0]$	$C = [0 \ 0 \ 1]$

Si uno solo de los observadores de la tabla 5 no es observable, entonces no se puede establecer un banco DOS.

Para el caso de que ambos SDF sean viables, se prefiere diseñar el CTF basado en el enfoque DOS, debido a que este último es capaz de detectar y aislar los sensores con falla cuando se presentan simultáneamente.

Para la configuración de los observadores se desarrollarán los cálculos empleando variables de desviación, es decir:

$$\mathcal{H}_n = h_n - h_{ns} \quad (\text{Ecuación 57})$$

3.3.1. Diseño de un observador Luenberger para el sistema de tanques.

Una vez que se establezca el modelo lineal en su forma de espacio de estados se procede a diseñar un observador Luenberger como forma de verificación de los elementos de la matriz A , comparando los valores estimados del modelo lineal con los estados del sistema no lineal.

Dado que el error de estimación debe ser estable en cero, se emplea el método de Lyapunov para calcular la matriz de ganancias K_L . Se propone la función candidata de Lyapunov la cual debe ser definida positiva:

$$V(e) = e^T P e > 0 \quad (\text{Desigualdad 1})$$

En donde la matriz P debe ser simétrica y definida positiva para que la desigualdad 1 cumpla con el criterio.

$$P = P^T > 0 \quad (\text{Desigualdad 2})$$

Y la derivada de la desigualdad 1 debe cumplir también que sea definida negativa:

$$\dot{V}(e) = \dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} < 0 \quad (\text{Desigualdad 3})$$

Dentro de la desigualdad 3 se sustituye la ecuación 23 de tal forma que:

$$\dot{V}(e) = [(A - K_L C)e]^T P e + e^T P (A - K_L C)e < 0$$

$$\dot{V}(e) = e^T (A - K_L C)^T P e + e^T P A e - e^T P K_L C e < 0$$

$$\dot{V}(e) = e^T (A^T P - C^T K_L^T P) e + e^T P A e - e^T P K_L C e < 0$$

$$\dot{V}(e) = e^T (A^T P - C^T K_L^T P + P A - P K_L C) e < 0 \quad (\text{Desigualdad 4})$$

Como se aprecia en la desigualdad 4, el factor central es el único capaz de provocar la negatividad de $\dot{V}(e)$, por lo que solamente basta con calcular:

$$A^T P - C^T K_L^T P + P A - P K_L C < 0 \quad (\text{Desigualdad 5})$$

Sin embargo, cabe recordar que el trabajo se desarrolla bajo modelos lineales, y la desigualdad 5 no cumple esta condición ya que las matrices K_L y P son incógnitas, la multiplicación de ambas genera una desigualdad no lineal. Por este motivo, se debe proponer un cambio de variable como:

$$Q = P K_L \quad (\text{Ecuación 58})$$

Al sustituir la ecuación 58 en la desigualdad 5 se tiene finalmente la desigualdad matricial lineal (LMI):

$$A^T P - C^T Q^T + P A - Q C < 0 \quad (\text{Desigualdad 6})$$

Por lo que al resolver las desigualdades 2 y 6 se obtienen los elementos de la matriz K_L del observador Luenberger.

3.4. Diseño de un UIO para el sistema de tanques.

Dado que uno de los objetivos del presente trabajo es diseñar un CTF por acomodación de fallas, el SDF debe ser capaz de detectar, aislar y estimar la magnitud de la falla, por lo que un UIO es adecuado para dicho fin. Por el método de acomodación

se entiende que las magnitudes de las fallas son medibles, no hay desconexión y el observador es de orden completo, por lo que se puede emplear la configuración de la Figura 12 sin la problemática que implica la observabilidad.

De manera similar al diseño del observador Luenberger, se plantea la función candidata de Lyapunov y su derivada como se expresan en las desigualdades 1, 2 y 3:

$$V(\bar{e}) = \bar{e}^T P \bar{e} > 0 \quad (\text{Desigualdad 7})$$

$$P = P^T > 0 \quad (\text{Desigualdad 8})$$

$$\dot{V}(\bar{e}) = \dot{\bar{e}}^T P \bar{e} + \bar{e}^T P \dot{\bar{e}} < 0 \quad (\text{Desigualdad 9})$$

Al incorporar la ecuación 46 en la desigualdad 9:

$$\dot{V}(\bar{e}) = (H_1 \bar{D} d_s + N \bar{e})^T P \bar{e} + \bar{e}^T P (H_1 \bar{D} d_s + N \bar{e}) < 0$$

$$\dot{V}(\bar{e}) = (d_s^T \bar{D}^T H_1^T + \bar{e}^T N^T) P \bar{e} + \bar{e}^T P (H_1 \bar{D} d_s + N \bar{e}) < 0$$

$$\dot{V}(\bar{e}) = d_s^T \bar{D}^T H_1^T P \bar{e} + \bar{e}^T N^T P \bar{e} + \bar{e}^T P H_1 \bar{D} d_s + \bar{e}^T P N \bar{e} < 0 \quad (\text{Desigualdad 10})$$

Por facilidad de cálculo cabe recordar que una matriz cuadrada es hermitiana cuando:

$$He(M) = M + M^T \quad (\text{Ecuación 59})$$

Empleando la ecuación anterior, la desigualdad 10 se puede reescribir como:

$$\dot{V}(\bar{e}) = \bar{e}^T He(PN) \bar{e} + d_s^T \bar{D}^T H_1^T P \bar{e} + \bar{e}^T P H_1 \bar{D} d_s \quad (\text{Desigualdad 11})$$

En donde el criterio de estabilidad para este tipo de sistemas se obtiene mediante:

$$\dot{V}(\bar{e}) + r^T r < \beta^2 d_s^T d_s \quad (\text{Desigualdad 12})$$

La desigualdad 11 se sustituye en la desigualdad 12, donde $r = C \bar{e}$, se desarrolla:

$$\bar{e}^T He(PN) \bar{e} + d_s^T \bar{D}^T H_1^T P \bar{e} + \bar{e}^T P H_1 \bar{D} d_s + (\bar{e}^T C^T)(C \bar{e}) < \beta^2 d_s^T d_s$$

$$\bar{e}^T He(PN)\bar{e} + d_s^T \bar{D}^T H_1^T P \bar{e} + \bar{e}^T P H_1 \bar{D} d_s + \bar{e}^T \bar{C}^T \bar{C} \bar{e} - \beta^2 d_s^T d_s < 0$$

$$[\bar{e}^T \quad d_s^T] \left\{ \begin{bmatrix} He(PN) & P H_1 \bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ 0 & -\beta^2 I \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{e} \\ d_s \end{bmatrix} < 0$$

$$[\bar{e}^T \quad d_s^T] \left\{ \begin{bmatrix} He(P H_1 \bar{A} - P K \bar{C}) & P H_1 \bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\beta^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{e} \\ d_s \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{Desigualdad 13})$$

Dado que el producto PK provoca la no linealidad en la desigualdad, nuevamente se realiza un cambio de variable resultando:

$$[\bar{e}^T \quad d_s^T] \left\{ \begin{bmatrix} He(P H_1 \bar{A} - Q \bar{C}) & P H_1 \bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\beta^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \bar{e} \\ d_s \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{Desigualdad 14})$$

Y retomando la ecuación la ecuación 40:

$$I - H_2 \bar{C} = H_1 \bar{E}$$

$$H_1 \bar{E} + H_2 \bar{C} = I$$

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix} = I \quad (\text{Ecuación 60})$$

Se conocen las matrices \bar{E} y \bar{C} y se deben calcular las matrices H_1 y H_2 mediante la pseudoinversa, dado que es una matriz singular:

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix}^+$$

$$\begin{bmatrix} H_1 & H_2 \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix}^T \quad (\text{Ecuación 61})$$

Por tal motivo H_1 y H_2 se consideran conocidas. Para que la desigualdad 14 sea definida negativa, basta con que el segundo factor cumpla este criterio:

$$\begin{bmatrix} He(P H_1 \bar{A} - Q \bar{C}) & P H_1 \bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\beta^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{C}^T \bar{C} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} He(PH_1\bar{A} - Q\bar{C}) & PH_1\bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\beta^2 I \end{bmatrix} + [\bar{C}^T \quad 0] I \begin{bmatrix} \bar{C} \\ 0 \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} He(PH_1\bar{A} - Q\bar{C}) & PH_1\bar{D} \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\beta^2 I \end{bmatrix} - [\bar{C}^T \quad 0] [-I] \begin{bmatrix} \bar{C} \\ 0 \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{Desigualdad 13})$$

La desigualdad 13 cumple la forma del complemento de Schur:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & D \end{bmatrix} = A - BD^{-1}B^T \quad (\text{Ecuación 62})$$

Es así como la desigualdad 13 queda de la forma:

$$\begin{bmatrix} He(PH_1\bar{A} - Q\bar{C}) & PH_1\bar{D} & C^T \\ \bar{D}^T H_1^T P & -\bar{\beta} I & 0 \\ C & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (\text{Desigualdad 14})$$

Donde:

$$\bar{\beta} = \beta^2 \quad (\text{Ecuación 63})$$

Que por claras razones:

$$\bar{\beta} \geq 0 \quad (\text{Desigualdad 15})$$

Por lo que nuevamente, para encontrar la ganancia del UIO con enfoque descriptor se debe satisfacer el sistema de las desigualdades 8, 14 y 15.

3.5. Estabilidad del sistema de control.

Para garantizar la estabilidad del sistema de control se puede emplear el método de Routh-Hürwitz mediante la ecuación característica.

La prueba está limitada a sistemas que tienen ecuación característica y no puede ser empleada para sistemas con algún retraso. El objetivo es determinar cuántas raíces de la ecuación característica tienen partes reales positivas, ya que éstas provocan que el sistema sea inestable.

El procedimiento inicia con la ecuación en su forma estándar:

$$a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0 \quad (\text{Ecuación 64})$$

Donde a_0 debe ser positivo. De esta forma, es estrictamente necesario que todos los coeficientes sean positivos. Si hay coeficientes negativos, el sistema es definitivamente inestable, y la prueba no se necesita para resolver la pregunta de estabilidad.

Si todos los coeficientes son positivos, el sistema puede ser estable o no.

Por ello, primero se colocan los coeficientes de la ecuación característica dentro de las dos primeras filas del arreglo como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Arreglo Routh-Hürwitz.

Fila				
1	a_0	a_2	a_4	a_6
2	a_1	a_3	a_5	a_7
3	b_1	b_2	b_3	
4	c_1	c_2	c_3	
5	d_1	d_2		
6	e_1	e_2		
$n + 1$	f_1			

El arreglo anterior considera un polinomio de grado $n = 6$, donde se tiene $n + 1$ filas dentro de éste.

Los elementos b, c y d se calculan mediante las ecuaciones:

$$b_1 = \frac{a_1 a_2 - a_0 a_3}{a_1} \quad (\text{Ecuación 65})$$

$$b_2 = \frac{a_1 a_4 - a_0 a_5}{a_1} \quad (\text{Ecuación 66})$$

$$b_3 = \frac{a_1 a_6 - a_0 a_7}{a_1} \quad (\text{Ecuación 67})$$

$$c_1 = \frac{b_1 a_3 - a_1 b_2}{b_1} \quad (\text{Ecuación 68})$$

$$c_2 = \frac{b_1 a_5 - a_1 b_3}{b_1} \quad (\text{Ecuación 69})$$

$$c_3 = \frac{b_1 a_7 - a_1 b_4}{b_1} \quad (\text{Ecuación 70})$$

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - b_1 c_2}{c_1} \quad (\text{Ecuación 71})$$

$$d_2 = \frac{c_1 b_3 - b_1 c_3}{c_1} \quad (\text{Ecuación 72})$$

$$d_3 = \frac{c_1 b_4 - b_1 c_4}{c_1} \quad (\text{Ecuación 73})$$

Durante la construcción del arreglo, cualquier fila puede ser dividida por una constante positiva sin cambiar los resultados de la prueba.

La condición necesaria y suficiente para que todas las raíces de la ecuación característica tengan parte real negativa (sistema estable) es que todos los elementos de la primera columna de la tabla 6 sean todos positivos y no sean cero.

Si algún elemento de la primera columna es negativo, el número de raíces con parte real positiva (en la parte derecha del plano complejo) es igual al número de cambios de signo en la primera columna.

3.6. Simulación del control tolerante a fallas.

Empleando el software de MATLAB/Simulink junto con el *solver* SeDuMi (Self-Dual-Minimization) se calculan los términos de ganancia, iniciando con observadores Luenberger con enfoque GOS y DOS para el entendimiento de los sistemas diagnósticos en la detección y aislamiento de fallas, y posteriormente, el diseño de UIO con enfoque descriptor para robustecer el diagnóstico y estimar la magnitud de fallas de tipo abruptas de baja y amplia amplitud, así como de dinámica intermitente.

Una vez estimadas las magnitudes de falla, se compensa la información proporcionada por el o los sensores con falla, para mantener la ley de control nominal del sistema mediante el enmascaramiento de las señales.

Capítulo 4. Resultados y análisis.

4.1. Puntos de equilibrio y linealización.

Los valores que se emplean para modelar al sistema de tanques propuesto a partir de las ecuaciones 49 a la 51 se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Valores para la caracterización del sistema de tanques en serie.

	Magnitudes
$A_T [cm^2]$	314.1593
$A_P [cm^2]$	0.3848
$g [cm/min^2]$	3531600
$q_1 [cm^3/min]$	1500
$q_3 [cm^3/min]$	0
ϑ_{12}	0.55
$\vartheta_{23} = \vartheta_{32}$	0.58
ϑ_{30}	0.45

Sustituyendo los valores anteriores en el modelo dinámico del sistema de tanques, se calculan los puntos de equilibrio mediante la ecuación 55 con un procedimiento iterativo, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8. Cálculo del estado estacionario en los niveles de los tres tanques.

	Elementos
h_s	$\begin{bmatrix} h_{1s} \\ h_{2s} \\ h_{3s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.50 \\ 6.39 \\ 10.62 \end{bmatrix}$
J	$\begin{bmatrix} -0.3357 & 0.3357 & 0 \\ 0.3357 & -0.7090 & 0 \\ 0 & 0.3733 & -0.2247 \end{bmatrix}$

Donde h_s es el vector de alturas en estado estacionario del tanque 1 al tanque 3, los cuales se compararon con los obtenidos mediante la resolución de los sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales empleando Simulink (Figura 13), concluyendo que los valores de los puntos de equilibrio coinciden y, por ende, los jacobianos o matrices A del espacio de estados son correctos.

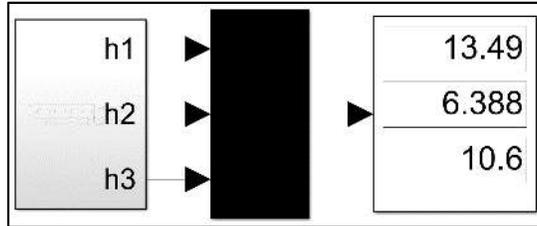


Figura 13. Simulación al estado estacionario.

La Figura 14 muestra la dinámica de las alturas del sistema de tanques (Figura 12), considerando el arranque de la operación de llenado y observando un comportamiento constante aproximadamente a los 50 [min].

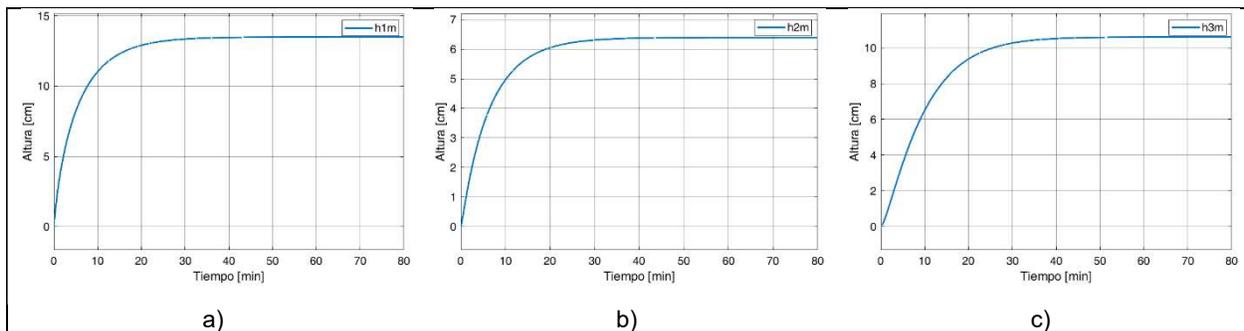


Figura 14. Comportamiento de los sensores de nivel libre de fallas para el a) tanque 1, b) tanque 2 y c) tanque 3.

4.2. Verificación de observabilidad en caso de pérdida de sensor.

Una vez obtenida la matriz A a partir de la evaluación del Jacobiano en los puntos de equilibrio (tabla 8), se procede a calcular el rango de la matriz de observabilidad (ecuación 7) considerando las matrices C de la tabla 4, obteniendo:

Tabla 9. Rango de las matrices de observabilidad en un SDF GOS.

	Observador 1	Observador 2	Observador 3
Observabilidad	Rango $L_O = 3$	Rango $L_O = 3$	Rango $L_O = 2$

A partir de la tabla 9 se aprecia que el criterio de observabilidad no cumple en caso de la pérdida del sensor de nivel correspondiente al tanque 3, por lo que no es posible un SDF para esta estructura de tanques (Figura 12) bajo estas condiciones, sin embargo, el presente trabajo se enfoca en un SDF de orden completo.

4.3. Sistema diagnóstico mediante un UIO con enfoque descriptor.

Considerando que todos los sensores del sistema siguen en operación con o sin falla, el objetivo es estimar la magnitud de estas fallas. Por tal motivo el observador a

emplear es de rango completo, por lo que se selecciona el UIO con enfoque descriptor para este fin.

En la simulación del sistema se plantea una falla de tipo abrupta e intermitente de magnitud $-2 [cm]$ en el sensor de nivel del tanque 1, una falla abrupta de magnitud $5 [cm]$ en el sensor de nivel del tanque 2, y una falla abrupta de baja magnitud de $0.1 [cm]$ en el sensor del tanque 3, todas ellas a partir de los $80 [min]$.

El cálculo de las de los valores $P, Q, \bar{\beta}$ y K involucrados en la desigualdad 15 para el sistema de tanques de estudio, se realiza mediante la herramienta SeDuMi integrado a MATLAB, y se reportan los resultados en la tabla 14.

Tabla 14. Valores de $P, Q, \bar{\beta}$ y K para el sistema de tanques.

P	$\begin{bmatrix} 3.6607 & 0.7039 & -0.0704 & -0.6660 & -0.7038 & 0.0704 \\ 0.7039 & 3.1583 & 0.3654 & -0.7038 & -0.1637 & -0.3654 \\ -0.7039 & 0.3654 & 3.2704 & 0.0704 & -0.3654 & -0.2759 \\ -0.6660 & -0.7038 & 0.0704 & 3.6605 & 0.7036 & -0.0704 \\ -0.7038 & -0.1637 & -0.3654 & 0.7036 & 3.1581 & 0.3654 \\ 0.0704 & -0.3654 & -0.2759 & -0.0704 & 0.3654 & 3.2704 \end{bmatrix}$
Q	$\begin{bmatrix} 0.7571 & 0.4019 & 0.0316 \\ 0.1203 & 0.4420 & -0.1642 \\ 0.1305 & 0.4613 & 0.8486 \\ 1.7369 & 0 & 0 \\ -0.5223 & 2.0520 & 0 \\ -0.1621 & -0.2971 & 1.6454 \end{bmatrix}$
$\bar{\beta}$	1.7305
K	$\begin{bmatrix} 0.2486 & 0.2350 & 0.0053 \\ 0.1007 & 0.0619 & -0.274 \\ -0.0053 & 0.2141 & 0.3041 \\ 0.5842 & -0.1007 & 0.0053 \\ -0.2349 & 0.7709 & -0.0274 \\ -0.0053 & -0.1592 & 0.5288 \end{bmatrix}$

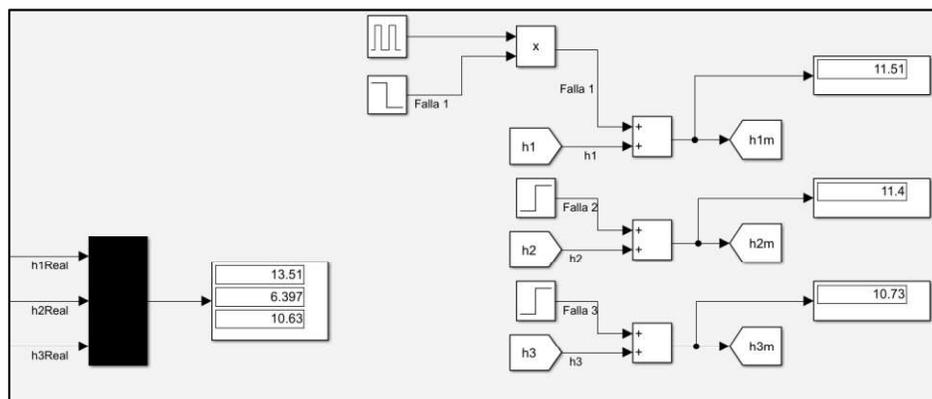


Figura 15. Adición de falla en los sensores de nivel para el sistema de tanques.

Simulando las fallas previamente descritas y visualizadas en los valores dentro de la Figura 15, el comportamiento del UIO con enfoque descriptor se refleja en la Figura 16.

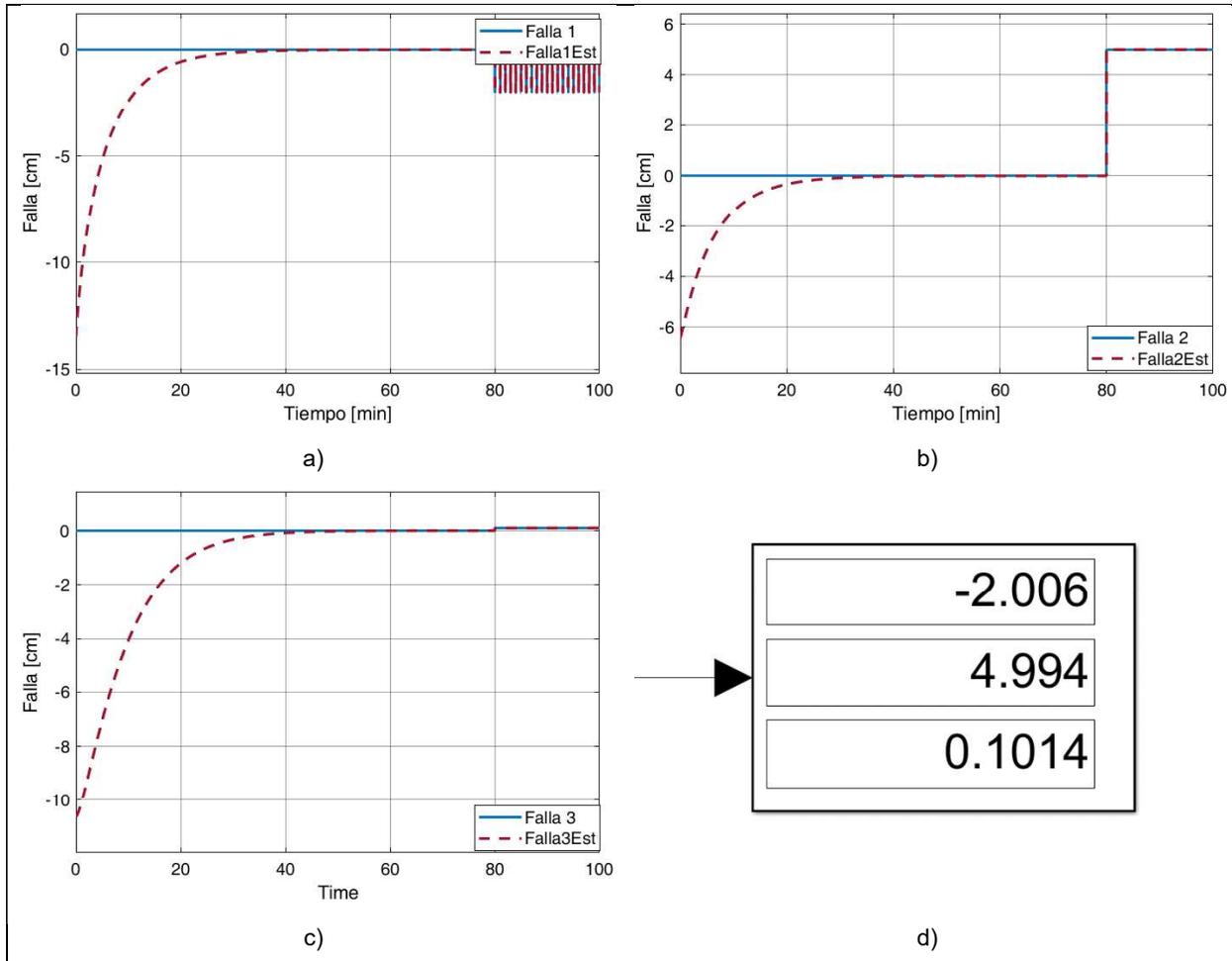


Figura 16. Dinámica de la falla abrupta a) de $-2 [cm]$ e intermitente, b) de $5 [cm]$ y c) de $1 [mm]$. El monitor en d) reporta los valores estimados de falla. Las líneas azules continuas representan las fallas simuladas para los sensores y las rojas discontinuas la estimación del SDF.

Como se aprecia en la Figura 16, el SDF es funcional después de los $50 [min]$ debido a que previo a este tiempo, el proceso aun no llega al estado estacionario. Así mismo, se observa una estimación satisfactoria ante los casos críticos que son las fallas de tipo abruptas, intermitentes y de baja magnitud.

De manera similar, se simula una falla de tipo gradual para el sensor correspondiente al tanque 1 con pendiente de $0.5 [cm/min]$ que ocurre a partir de los $80 [min]$. En la figura 17 se reporta el comportamiento del SDF con las características antes mencionadas.

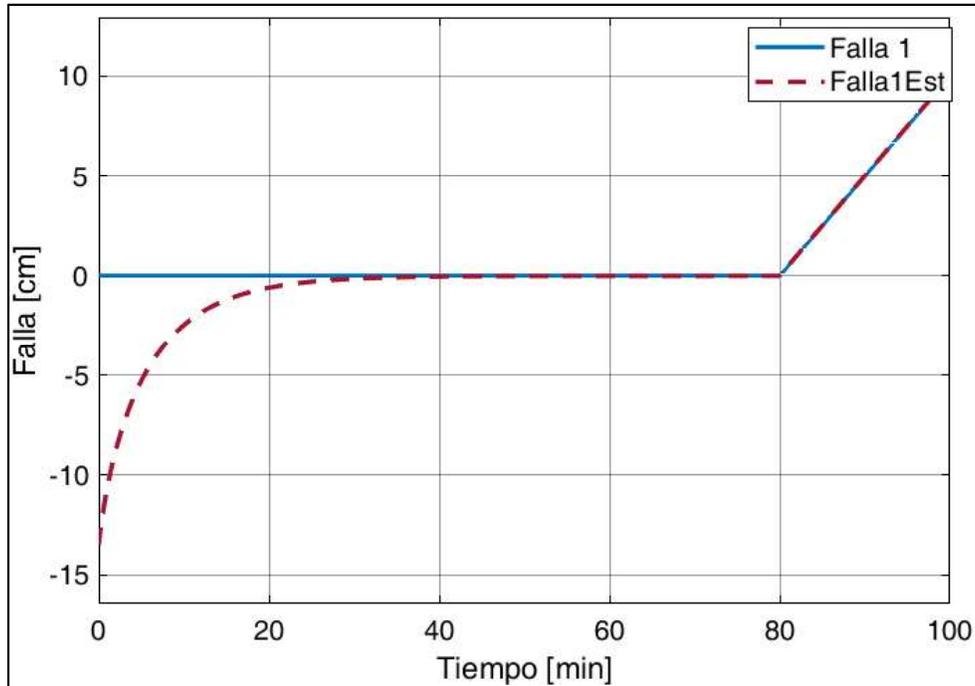


Figura 17. Dinámica de la falla gradual con pendiente de 0.5 [cm/min] . Las líneas azules continuas representan las fallas simuladas para los sensores y las rojas discontinuas la estimación del SDF.

Si se considera la presencia de ruido en las lecturas de la Figura 16, se deben establecer los umbrales para considerar la detección de falla debido al mal funcionamiento del sensor y no por el ruido involucrado en la medición. Este tipo de comportamiento es usual en la práctica y trae ciertas complicaciones para la detección y estimación de fallas, en especial para aquellas de magnitudes bajas como la simulada para el sensor del tanque 3.

En la Figura 18 se presenta el comportamiento de las fallas previamente simuladas en cada uno de los sensores, ahora considerando ruido. Dado lo anterior se establecen dos umbrales para que el SDF pueda detectar y aislar la falla. Para las fallas analizadas, cuatro de ellas son detectadas, aisladas y estimadas; sin embargo, el caso de la simulación vista en la Figura 18c, la magnitud de falla es tan pequeña que el SDF no es capaz de diferenciar la falla del ruido, por lo que, para fallas de este tipo, el sistema se considera libre de falla hasta que se rebase alguno de los umbrales. Dado que el UIO diseñado no discrimina entre ruido y falla, el SDF también se puede considerar como un filtro de señal.

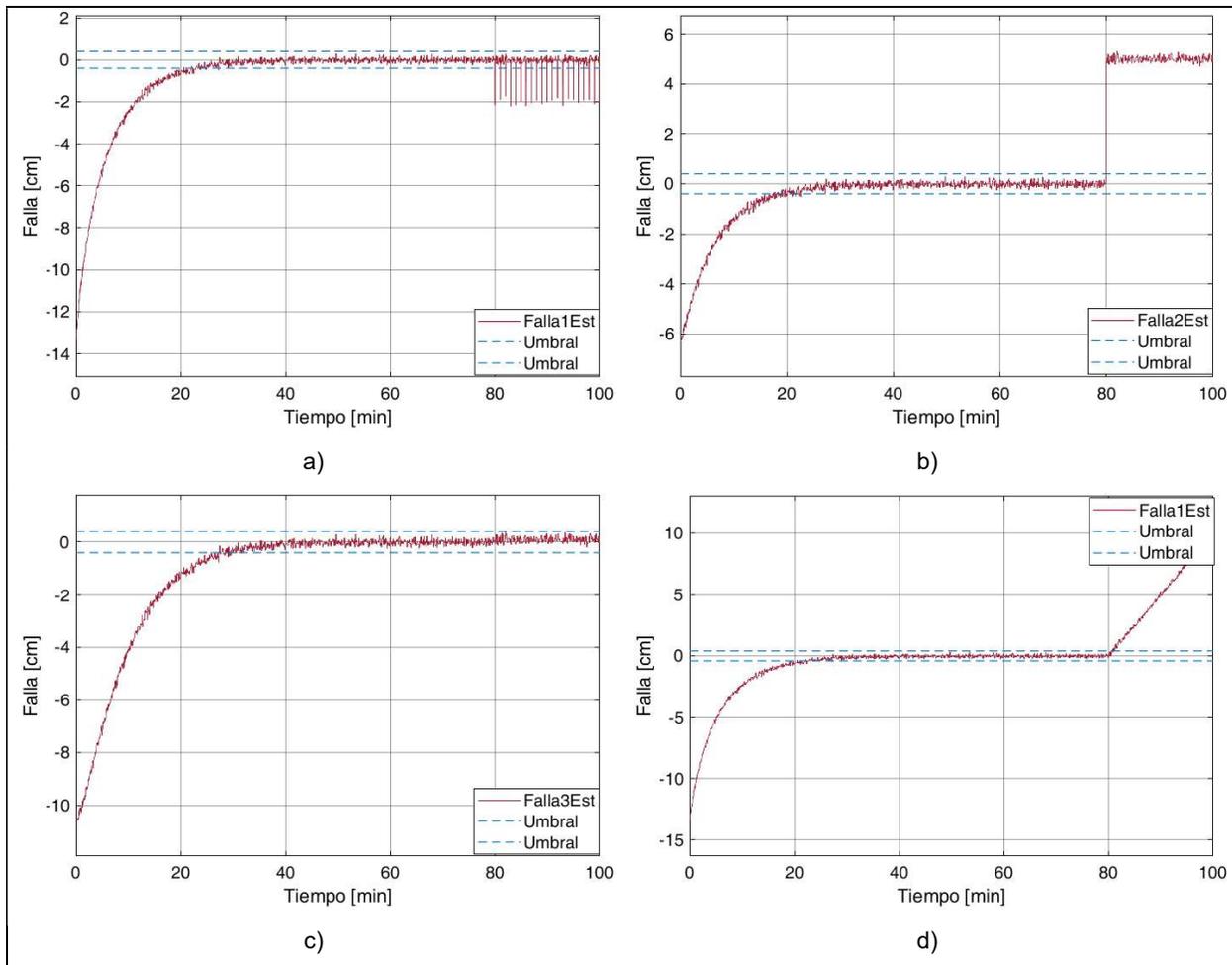


Figura 18. Dinámica de la falla abrupta a) de -2 [cm] e intermitente, b) de 5 [cm] y c) de 1 [mm]. Las líneas rojas continuas representan la estimación del SDF y las azules discontinuas los umbrales para la detección de falla considerando sensores con ruido.

4.4. Control tolerante con enmascaramiento de falla.

En el presente trabajo se ha considerado como único actuador a la bomba de alimentación al tanque 1 para el sistema propuesto, por esta razón, la ley de control únicamente se enfoca a la manipulación de este flujo.

La Figura 19 muestra la estructura del sistema de CTF, visualizando en la parte superior un recuadro gris con el modelo matemático del sistema incluyendo los medidores con falla; en la parte inferior central en un recuadro azul se ubica el SDF; y en la parte inferior izquierda en un recuadro color rojo el lazo de control por retroalimentación.

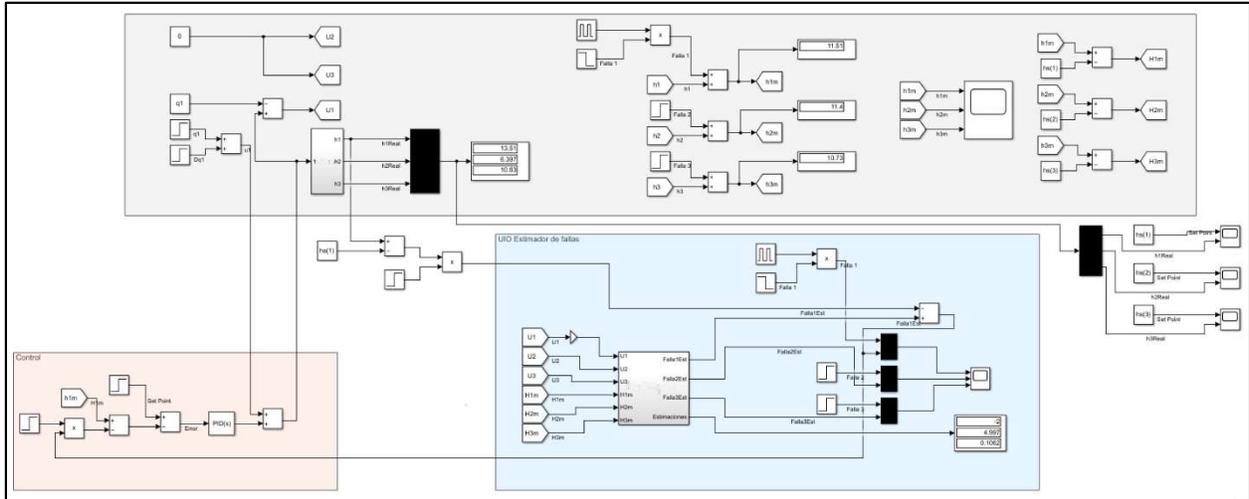


Figura 19. Estructura del Control Tolerante a Fallas de estudio.

Las funciones de transferencia que representan la relación de las alturas de los tanques con respecto al flujo de alimentación se representan en forma de bloques mostrado en la Figura 20, cuyas expresiones son:

$$\mathcal{H}_1(s) = \frac{0.3357}{s + 0.3357} \mathcal{H}_2(s) + \frac{1}{s + 0.3357} Q_1(s) \quad (\text{Ecuación 74})$$

$$\mathcal{H}_2(s) = \frac{0.3377}{s + 0.7090} \mathcal{H}_1(s) \quad (\text{Ecuación 75})$$

$$\mathcal{H}_3(s) = \frac{0.3733}{s + 0.2247} \mathcal{H}_2(s) \quad (\text{Ecuación 76})$$

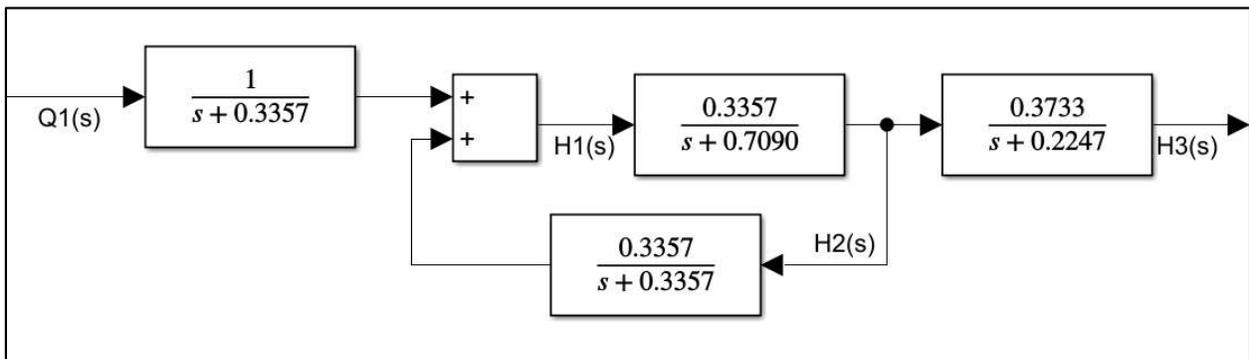


Figura 20. Funciones de transferencia para las desviaciones de alturas para los tres tanques de la estructura del caso 1.

Como se aprecia en las ecuaciones 74, 75 y 76, todas ellas dependen fuertemente del valor de la desviación de altura en el tanque uno ya que al sustituir la ecuación 75 en 74 y en 76:

$$\mathcal{H}_1(s) = \frac{0.1127}{s^2 + 1.0447s + 0.2380} \mathcal{H}_1(s) + \frac{1}{s + 0.3357} Q_1(s) \quad (\text{Ecuación 77})$$

$$\mathcal{H}_3(s) = \frac{0.1261}{s^2 + 0.9337s + 0.1593} \mathcal{H}_1(s) \quad (\text{Ecuación 78})$$

Por tal motivo \mathcal{H}_1 , \mathcal{H}_2 y \mathcal{H}_3 son respuesta directa al cambio en el flujo de alimentación Q_1 , dado que al sustituir la ecuación 77 en 75 y 78 se tienen las funciones de transferencia:

$$\frac{\mathcal{H}_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{s^2 + 1.0447s + 0.2380}{s^3 + 1.3804s^2 + 0.7014s + 0.1177} \quad (\text{Ecuación 79})$$

$$\frac{\mathcal{H}_2(s)}{Q_1(s)} = \frac{0.3377s^2 + 0.3528s + 0.0804}{s^4 + 2.0894s^3 + 1.6801s^2 + 0.6150s + 0.0834} \quad (\text{Ecuación 80})$$

$$\frac{\mathcal{H}_3(s)}{Q_1(s)} = \frac{0.1261s^2 + 0.1317s + 0.0300}{s^5 + 2.3141s^4 + 2.1496s^3 + 0.9925s^2 + 0.2216s + 0.0187} \quad (\text{Ecuación 81})$$

Si se analiza en conjunto las funciones de transferencia representadas en la Figura 20, es visible que el control de las alturas de los tanques 2 y 3 dependen del control que se le da al tanque 1.

Al reducir el lazo de control de retroalimentación correspondiente al que involucra a la bomba de alimentación hacia el tanque 1 y realizar el estudio de estabilidad a partir del criterio de Routh-Hürwitz, se obtiene que la ganancia de controlador debe ser:

$$k_c > 0 \quad (\text{Desigualdad 18})$$

Para el estudio del control se siguen considerando las fallas en cada uno de los sensores con ruido previamente simulados, y se modifica el flujo de alimentación proporcionado por la bomba de 1500 [cm^3/min] a 2000 [cm^3/min] a los 100 [min], y la ganancia del control seleccionado para un primer estudio es de $k_c = 1$.

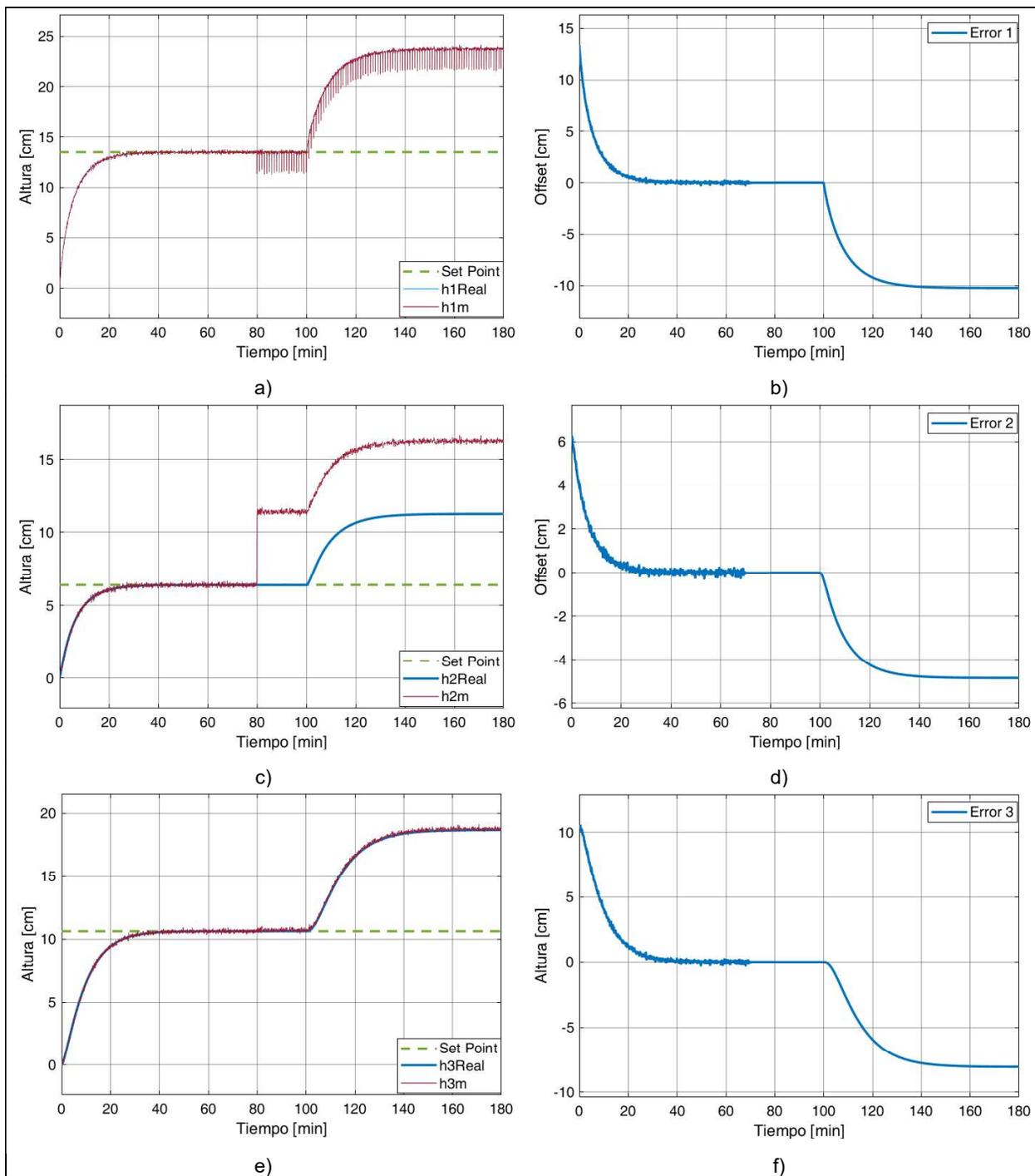


Figura 21. Simulación del CTF Proporcional $k_c = 1$. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el flujo de alimentación a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

En la Figura 21 se muestra el comportamiento del control Proporcional, enmascarando las fallas presentes en cada uno de los sensores de nivel, a partir de una desviación de $500 \text{ [cm}^3/\text{min}]$ en el flujo de alimentación al tanque 1 (Figura 12). Como

se puede apreciar en la Figura 21b, 21d y 21f, el error que surge a partir de la comparación del *Set Point* (valor deseado) y el valor medido, antes de los 50 [min] en los cuales se decidió previamente despreciar la información del SDF, la señal presenta ruido y converge al valor de cero; después de los 50 [min] en donde el SDF se activa, se filtra el ruido del error, por esta razón la señal es exactamente igual a cero. Se recuerda que a los 80 [min] las fallas aparecen, sin embargo, el CTF enmascara la información provocando que el error continúe en el valor de cero hasta que se desvíe el flujo de alimentación a los 100 [min].

El enmascaramiento de los sensores con fallas se observan en las Figuras 21a, 21c y 21e, es decir, el CTF compensa los valores medidos a partir de la estimación de las magnitudes de cada una de las fallas. Lo anterior se aprecia mejor en la Figura 21c, donde entre los minutos 80 [min] y 100 [min], el sensor 2 tiene una falla de 5 [cm], sin embargo, el control no tiene que corregir el comportamiento del proceso gracias al trabajo generado por el SDF.

Es importante puntualizar la existencia de un *Offset* (comparación del valor deseado con el valor real), reportado en la tabla 15, debido al empleo de un control Proporcional que, si bien son los más económicos del mercado, se prefieren con una parte Integral para eliminar el *Offset* presente.

Tabla 15. Valor del *Offset* presente en los sensores de nivel.

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3
Offset	10.25 [cm]	4.85 [cm]	8.07 [cm]

Así mismo, el *Offset* reportado en la tabla 15 para el sensor correspondiente al nivel del tanque 1 es considerable, por tal razón se propone un control Proporcional-Integral, simulando el comportamiento con una ganancia $k_c = 1$ y $\tau_I = 1$, y llegar exactamente al *Set Point* establecido. El estudio aun considera la aparición de fallas a los 80 [min] en los sensores con ruido y una desviación del flujo de alimentación de 500 [cm³/min] a partir de los 100 [min].

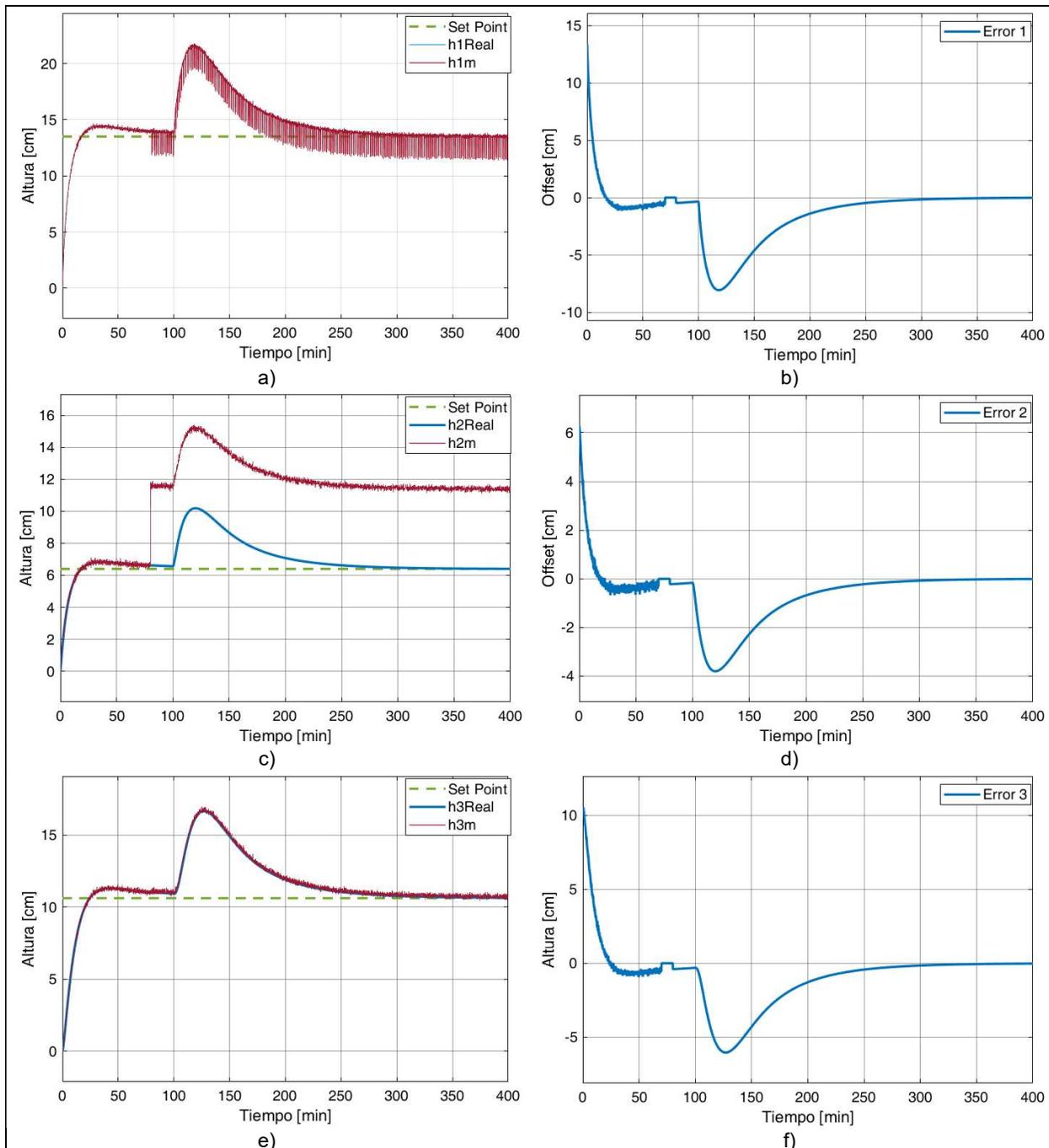


Figura 22. Simulación del CTF Proporcional-Integral $k_c = 1$ y $\tau_I = 1$. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el flujo de alimentación a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

En la Figura 22, el control Proporcional-Integral con valores de $k_c = 1$ y $\tau_I = 1$, provoca que el sistema tarde más tiempo en llegar al estado estacionario (Figura 13), sin embargo, se puede observar el correcto funcionamiento del CTF. Nuevamente el control del tanque 2 (Figura 22c) muestra claramente el enmascaramiento de la falla abrupta a

partir de los 80 [min], y la convergencia a cero de la señal de error (Figuras 22b, 22d y 22f).

Sin embargo, existen dos grandes problemáticas con los valores del control establecidos: existe derrame de líquido en el tanque 1 debido a que se rebasan los 20 [cm] físicos de altura, y aunado a ello, el lento funcional del control. Es por esta razón que se deben modificar los valores de la ley de control para encontrar un mejor comportamiento en los niveles del líquido en los tanques del sistema.

Para mejorar la velocidad del control, aumentar el valor la ganancia k_c permite lograr este comportamiento. Mediante un estudio de sensibilidad de parámetros, se propone un valor de $k_c = 5$, manteniendo el valor de la parte integral $\tau_I = 1$, para establecer un nivel de líquido dentro del tanque 1 menor a los 20 [cm].

La Figura 23 satisface el comportamiento buscado en el sistema, alcanzando el estado estacionario a los 70 [min], previo a la aparición de las fallas en los sensores de nivel y a la desviación del flujo de alimentación.

Si bien se ha alcanzado un nivel por debajo del límite máximo en el tanque 1 del sistema, éste sigue próximo al máximo permitido, lo que presentará dificultades en caso de nuevas desviaciones, ya sea en un aumento en el flujo de alimentación, o bien, en el *Set Point* en alguno de los tanques del proceso.

Por lo anterior, el diseñador debe elegir parámetros idóneos para obtener una rápida convergencia, así como amortiguar el comportamiento del control para evitar derrames, principalmente por el tanque 1 que gobierna el contenido de los demás tanques.

Otra situación que se debe considerar al elegir los nuevos parámetros de control k_c y τ_I , es la capacidad de manipulación del actuador, es decir, que éstos permitan maniobrar dentro del rango de operación de la bomba de alimentación.

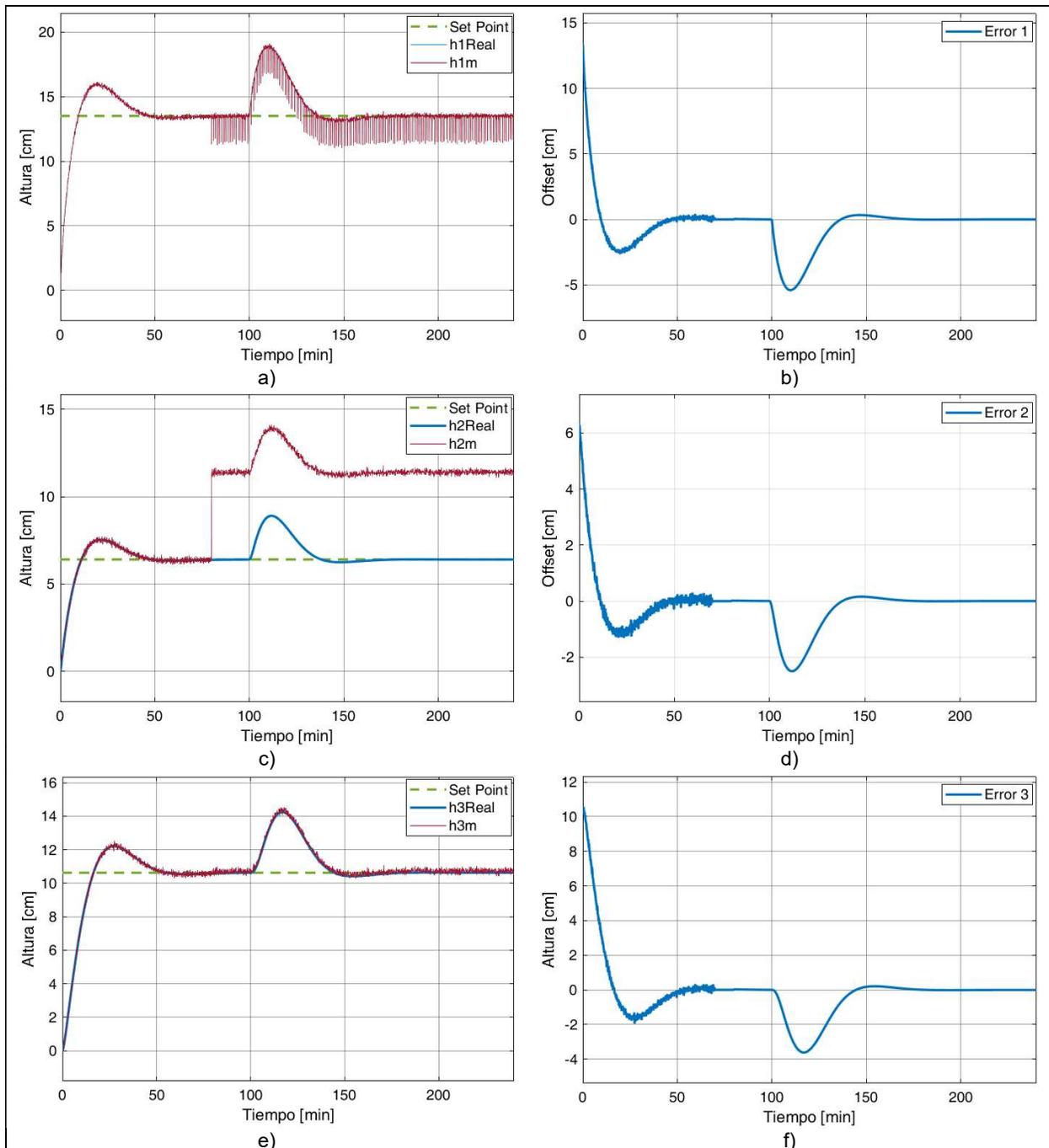


Figura 23. Simulación del CTF Proporcional-Integral $k_C = 5$ y $\tau_I = 1$. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el flujo de alimentación a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

Considerando las mismas fallas en 80 [min] y la desviación del flujo de alimentación en 100 [min], así como los parámetros $k_C = 100$ y $\tau_I = 4$, se simula el comportamiento del CTF.

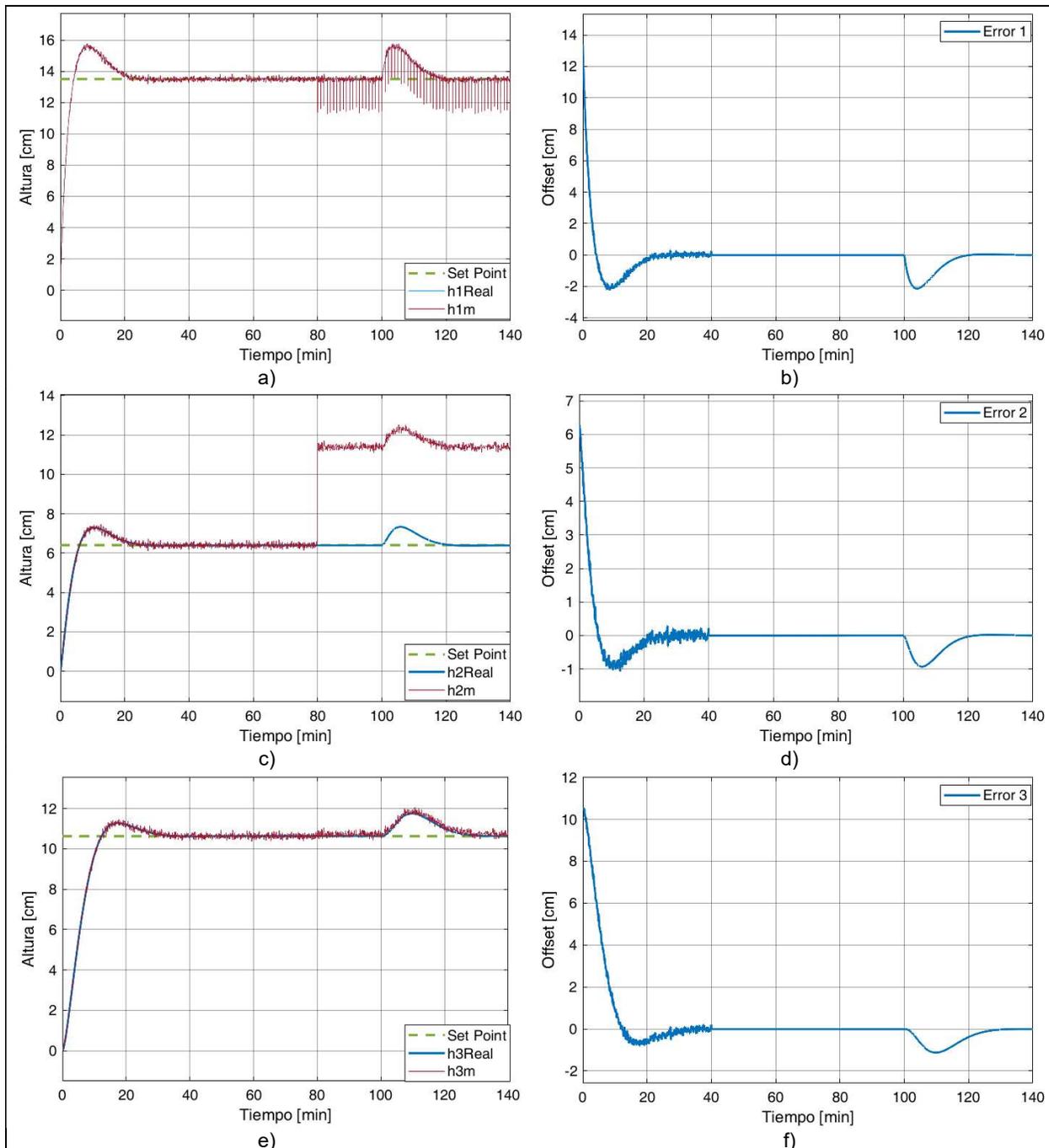


Figura 24. Simulación del CTF Proporcional-Integral $k_c = 100$ y $\tau_I = 4$. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el flujo de alimentación a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

Con estos nuevos parámetros de control, se aprecia en la Figura 24 que nuevamente el sistema alcanza el estado estacionario alrededor de los 40 [min], amortiguando aún más el comportamiento del control, en donde la altura del tanque 1 sufre una desviación máxima de 2 [cm] (visualizado en la Figura 24b).

También cabe destacar que en las Figuras 22e, 23e y 24e, se percibe como el CTF alcanza a compensar la falla de 1 [mm] del sensor de nivel del tanque 3, debido a que la curva azul, que representa el nivel real del líquido, se encuentra ligeramente por debajo de la curva roja de la información proporcionada por el sensor.

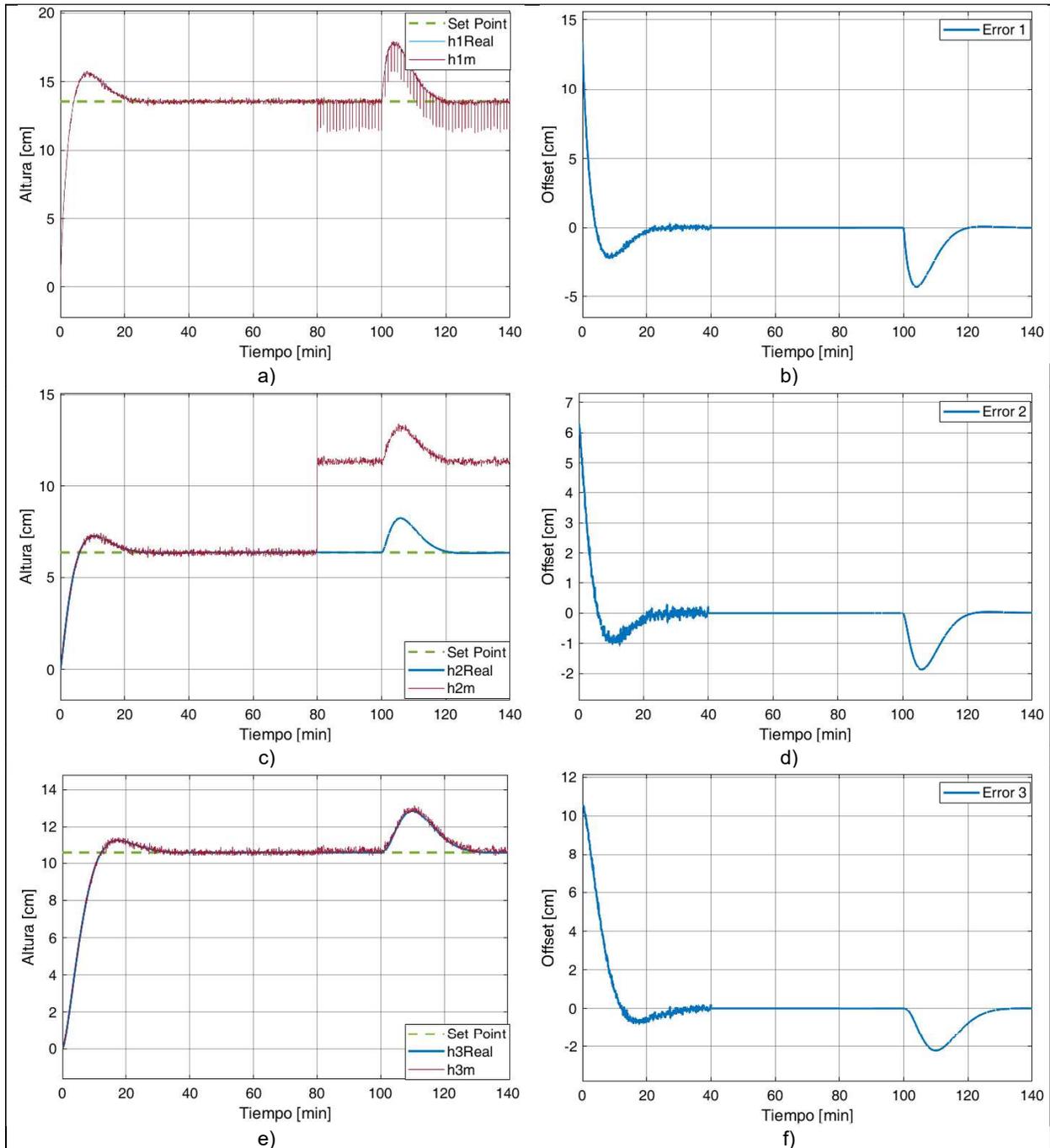


Figura 25. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el flujo de alimentación a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

Continuando con los valores de control $k_C = 100$ y $\tau_I = 4$, se duplica la desviación del flujo de alimentación a $1000 \text{ [cm}^3/\text{min}]$, reportando el comportamiento dentro de la Figura 25.

La nueva desviación provoca nuevamente un aumento en los niveles de los tanques, aunque los parámetros de control continúan proporcionando un comportamiento dentro de los límites físicos máximos, es decir, no existe derrame en ninguno de los tres tanques.

A continuación, se simula el trabajo del CTF considerando las fallas en los 80 [min] , donde la única desviación del sistema ahora es el *Set Point* del nivel para el tanque 1, el cual cambia de los 13.5 [cm] a 18 [cm] , es decir, una desviación de 4.5 [cm] , a partir de los 100 [min] .

Al modificar el *Set Point* del tanque 1 (S2), también se debe cambiar los correspondientes a los tanques 2 y 3 debido a los nuevos valores de estado estacionario que tendrá el sistema.

También se realizan otros dos casos de estudio de modificación del *Set Point* del nivel para el tanque 2 desviándolo -1.39 [cm] (S3), y posteriormente desviación del nivel en el tanque 3 de -4.62 [cm] (S4).

Para los tres casos anteriores, se aplica el teorema del valor final en las funciones de transferencia de las ecuaciones 75, 76 y 78, obteniendo los valores de la tabla 16.

Tabla 16. Valores del *Set Point* para el sistema de tanques.

	Tanque 1	Tanque 2	Tanque 3
S1	13.5 [cm]	6.39 [cm]	10.62 [cm]
S2	18 [cm]	8.53 [cm]	14.18 [cm]
S3	10.58 [cm]	5 [cm]	8.31 [cm]
S4	7.66 [cm]	3.61 [cm]	6 [cm]

Las Figuras 26, 27 y 28 reportan el comportamiento de los estudios S2, S3 y S4 respectivamente.

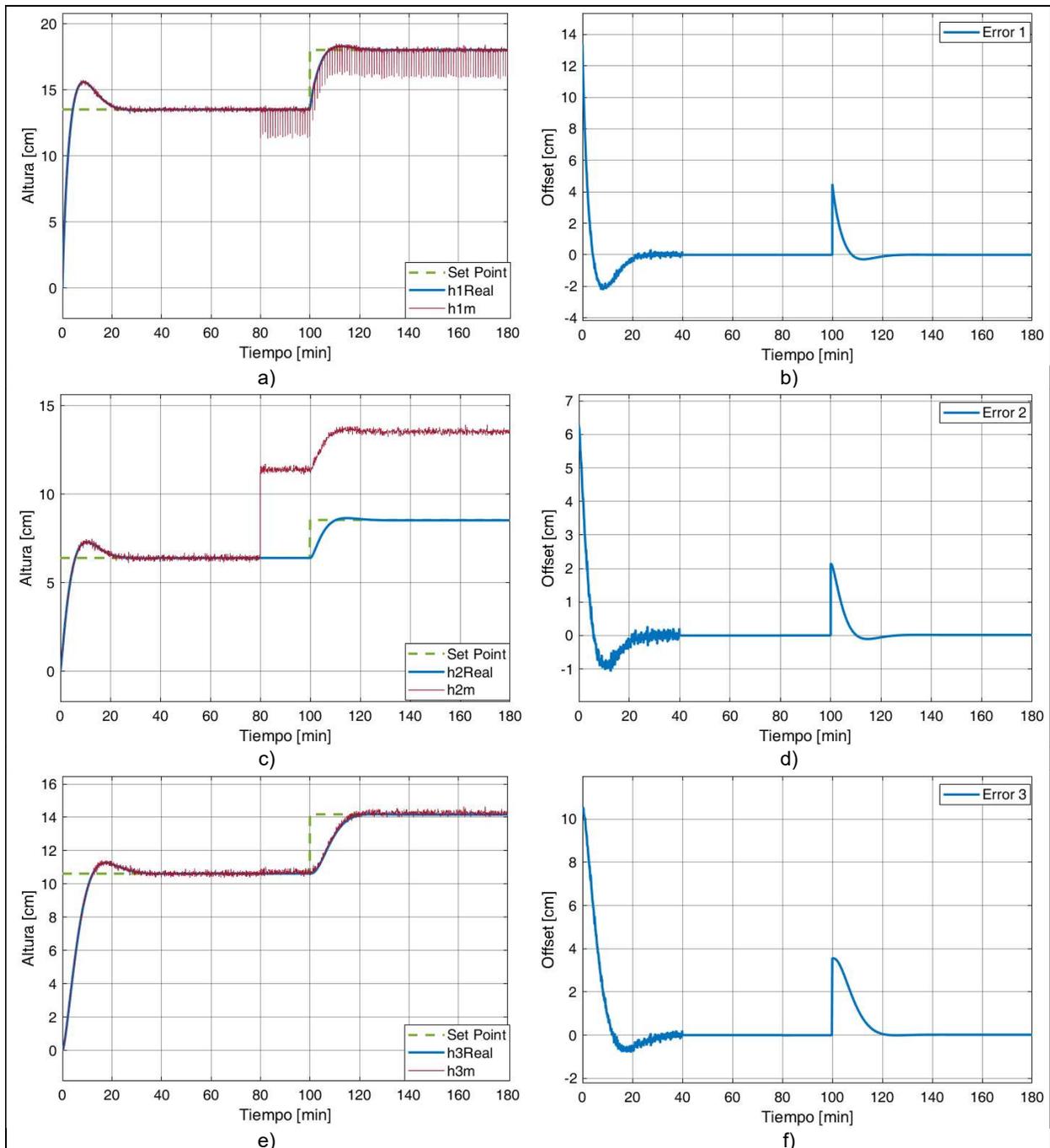


Figura 26. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el *Set Point* (S2) a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

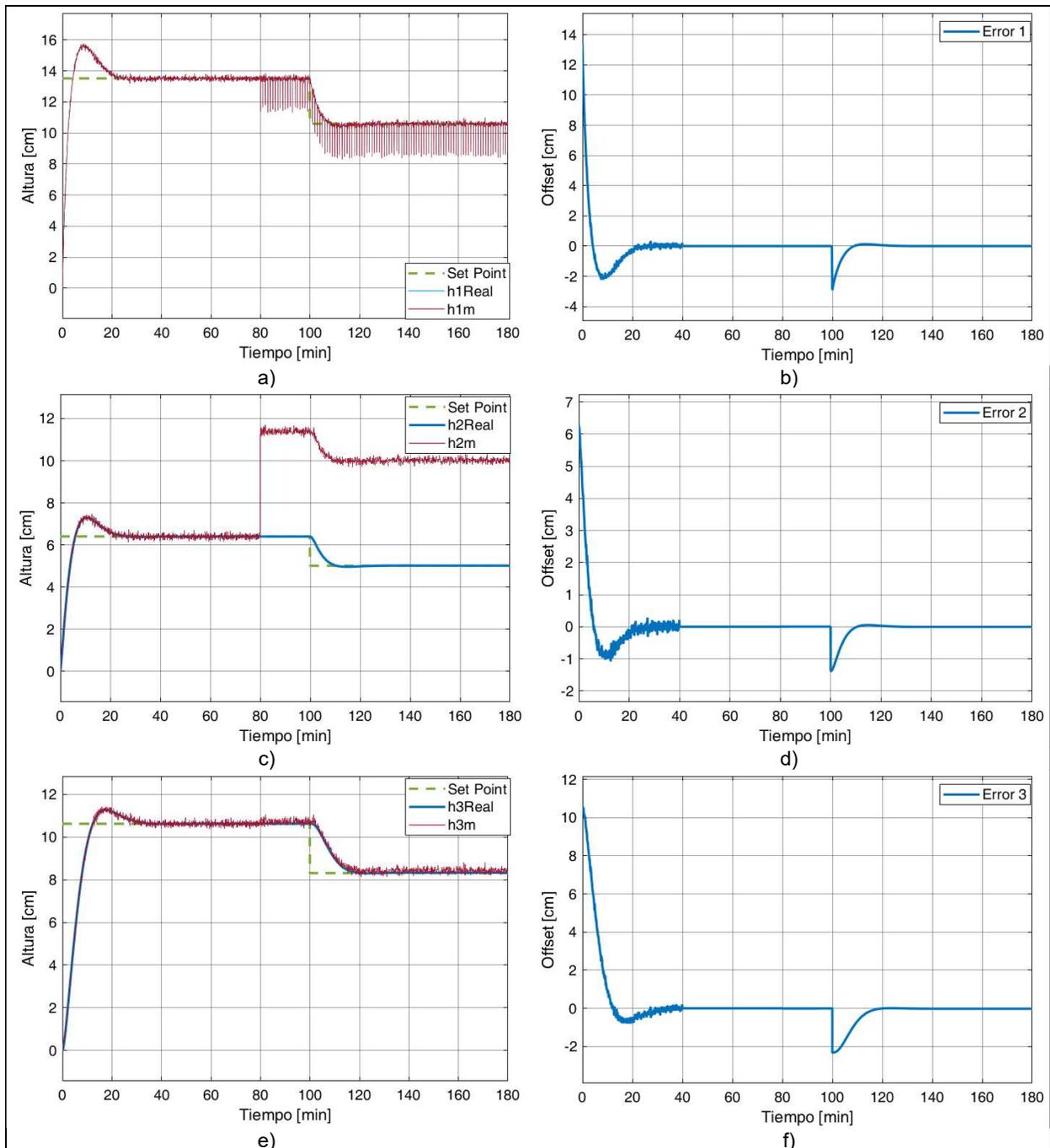


Figura 27. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el *Set Point* (S3) a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

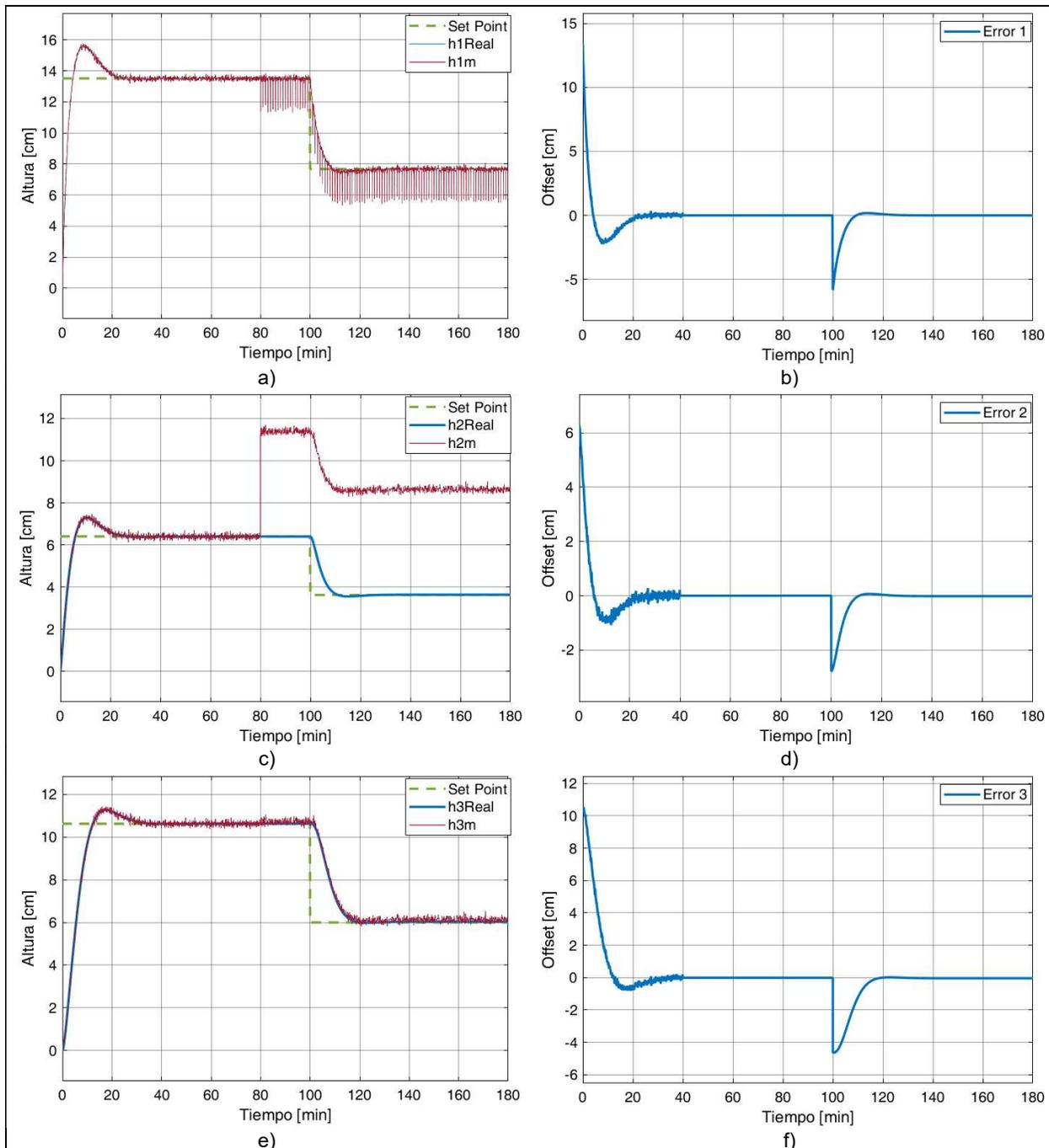


Figura 28. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el *Set Point* (S4) a los 100 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

Cabe recordar que los valores del *Set Point* de los tanques dependen directa y únicamente por el flujo de alimentación de la bomba hacia el tanque 1, por lo que si se desea establecer *Set Points* distintos (por ejemplo todos los niveles en 5 [cm]), se deben incorporar actuadores que modifiquen los flujos de las conexiones entre tanques.

En la Figura 29 se simula el CTF conservando las fallas a los 80 [min], las desviaciones del *Set Point* correspondiente al caso S4 de la Tabla 16 a los 100 [min], y una desviación del flujo de alimentación de 1000 [cm³/min] a los 120 [min].

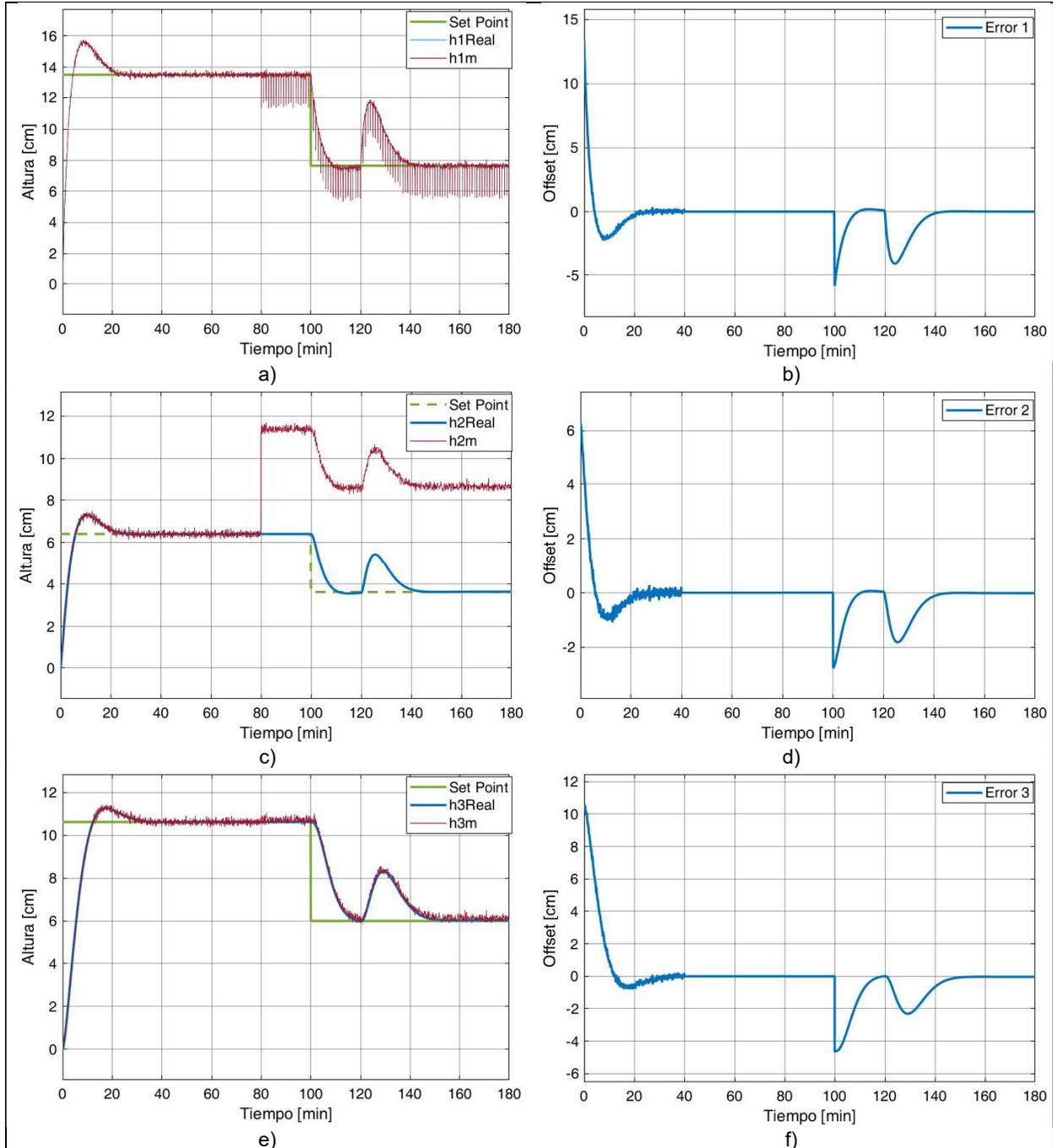


Figura 29. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 80 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el *Set Point* (S4) a los 100 [min] y en el flujo de alimentación a los 120 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

En las Figuras 30 y 31 se muestran casos atípicos de desviación en el flujo de alimentación: de tipo senoidal y rampa respectivamente. Se simulan fallas a partir de 60 [min], desviación del *Set Point* (S4) a 90 [min] y el flujo de alimentación a 120 [min].

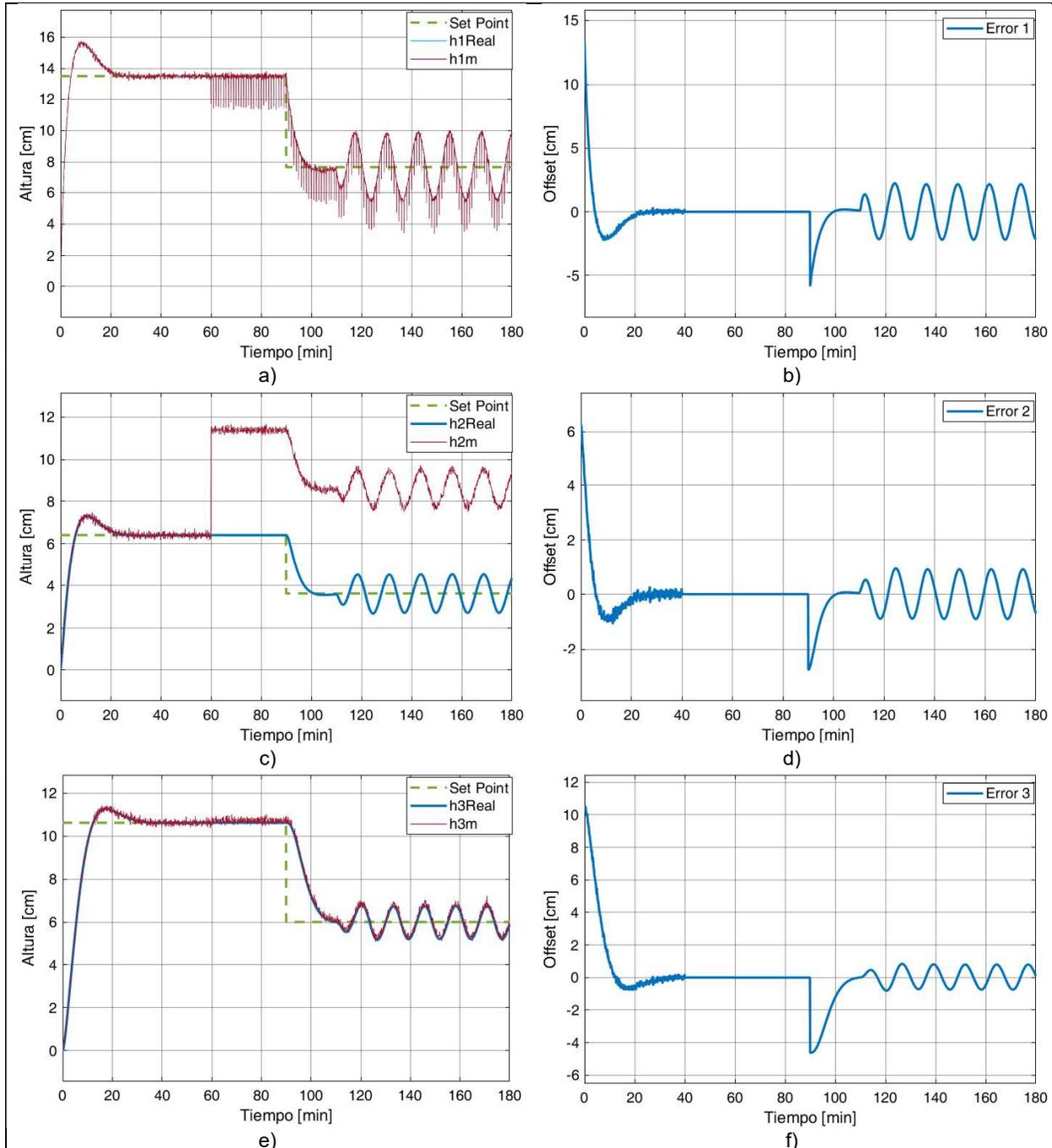


Figura 30. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 60 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el *Set Point* (S4) a los 90 [min] y en el flujo de alimentación tipo senoidal a los 110 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el *Offset* presente en el sistema de control.

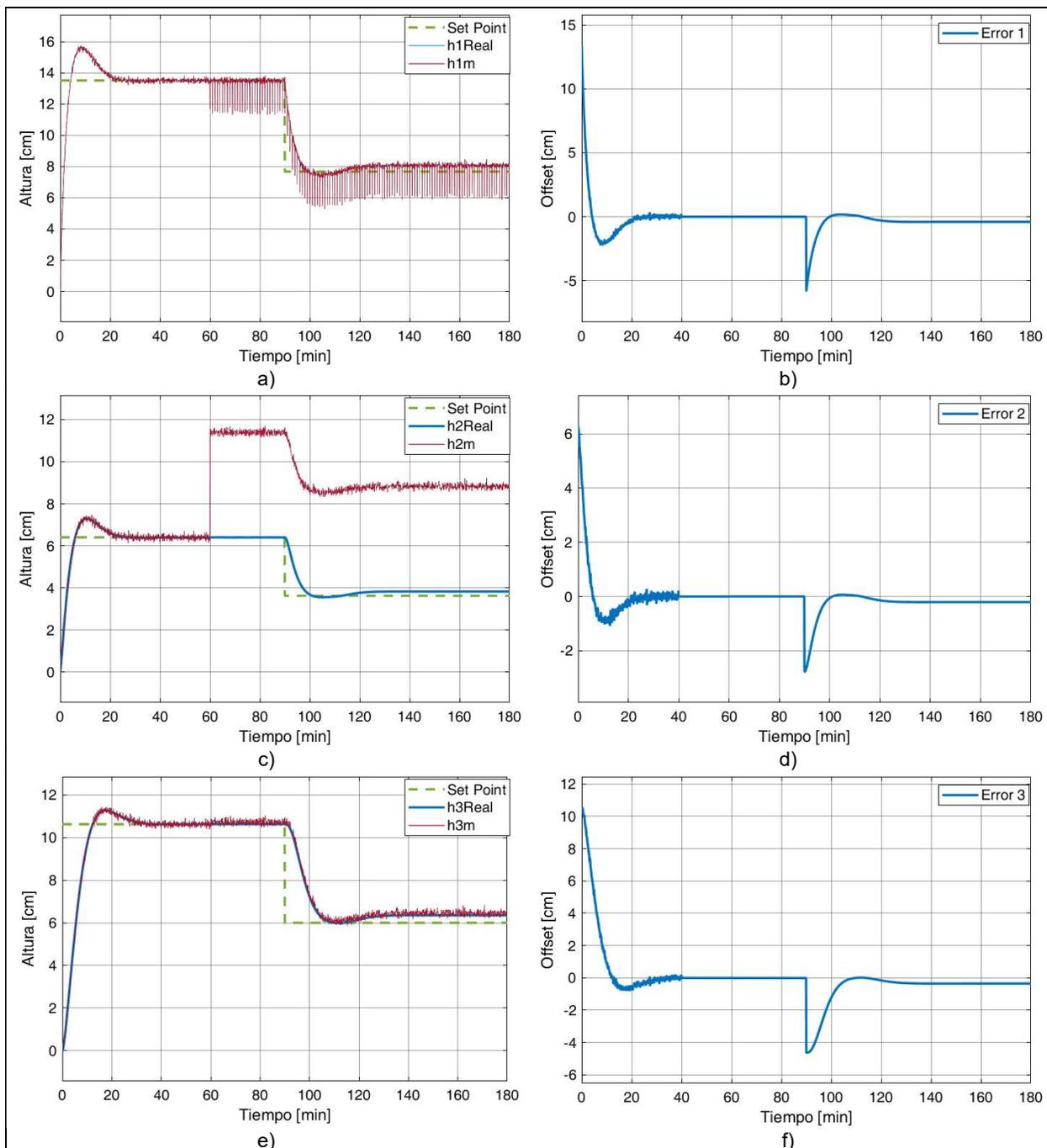


Figura 31. Simulación del CTF Proporcional-Integral. Las gráficas a), c) y e) son las dinámicas de los sensores con fallas generadas a los 60 [min] y el valor real de los niveles de los tanques, representados por las curvas continuas rojas y azules respectivamente, con una desviación en el Set Point (S4) a los 90 [min] y en el flujo de alimentación tipo rampa a los 110 [min]. Las gráficas b), d) y f) es el Offset presente en el sistema de control.

Cabe recordar que el control se enfoca principalmente a los sistemas BIBO (Bounded Input-Bounded Output), es decir, de entradas limitadas (que convergen a un

valor). Por esta razón el comportamiento de los controles mostrados en las figuras 30 y 31 no convergen a cero.

En la Figura 31 se observa un comportamiento senoidal en las alturas de los tanques en serie, debido a que la entrada no converge a un valor específico. Esta dinámica es muy similar y un control *On-Off*, por ello la comparación entre los *Set Points* y los valores medidos también presentan esta característica senoidal.

La Figura 32 muestra un mejor comportamiento del control, sin embargo, el diseñador no debe confundir la realidad física del sistema, es decir, la función rampa representa el aumento gradual del flujo de alimentación hasta tender al infinito, pero lo anterior no es posible debido al límite máximo de operación de la bomba. Con este tipo de señal (rampa), aunque se esté empleando un control Proporcional-Integral es visible la aparición de un *Offset* (Figuras 31b, 31d y 31e), nuevamente debido a la divergencia de la función de entrada.

5. Conclusiones y trabajo futuro.

El estudio realizado demostró que para el sistema propuesto de tanques en serie (Figura 12), no es posible diseñar un SDF a partir de observadores Luenberger y, por ende, bancos de observadores, debido a que el criterio de observabilidad no cumple para el caso de la pérdida del sensor de nivel en el tanque 3 (tabla 9). Por esta razón el desarrollo de un SDF se basó en un UIO con enfoque descriptor de orden completo, es decir, los tres sensores envían información en todo momento, aunque estos contengan alguna falla en cuestión de magnitud.

El UIO con enfoque descriptor no solamente es capaz de detectar, aislar y estimar las magnitudes de fallas que puedan estar presentes en los sensores, sino también de estimar el ruido que puede estar presente en las mediciones (Figura 18), aunque este término no haya sido incluido dentro de las ecuaciones fundamentales del observador.

Mediante el método de Lyapunov, se verificó convergencia del UIO con enfoque descriptor, a partir de satisfacer las desigualdades 8, 14 y 15, encontrando los valores de las matrices K , P y $\bar{\beta}$, cumpliendo los criterios de estabilidad (minimizar el error de estimación).

El SDF diseñado permite estimar las fallas con comportamiento más crítico como lo son las de tipo abruptas, abruptas con intermitencias, y abruptas de baja magnitud, sin embargo, para el caso de mediciones con ruido, al seleccionar un umbral de detección, la falla de baja magnitud puede ocultarse dentro del ruido y complicar el diagnóstico (Figura 18c).

A comparación del diagnóstico para fallas abruptas, las fallas graduales son mucho más sencillas para el SDF debido a que su dinámica es mucho más lenta (Figura 17), por lo que el caso de mayor interés fueron las de comportamiento tipo escalón.

Una vez estimadas las magnitudes de fallas en cada uno de los sensores, éstas se compensan dentro del lazo de control de retroalimentación, en donde se calculó que basta con una ganancia positiva ($k_c > 0$) de control para lograr la estabilidad del sistema.

Sin embargo, si el CTF únicamente cuenta con un parámetro Proporcional, el sistema no es capaz de controlar los niveles de los tanques los *Set Points* establecidos, es decir, el proceso presentó *Offset* (Figura 21), por tal razón fue necesario incorporar el parámetro Integral de control.

A partir de un estudio de sensibilidad de parámetros se identificaron los parámetros de control que logran un *Offset* igual a cero, en otras palabras, que los niveles dentro de los tanques llegaran a los *Set Points* establecidos, considerando desviaciones tipo escalón tanto en el flujo de alimentación, como en el *Set Point*, y a su vez, las alturas no alcanzaran valores cercanos a los 20 [cm] ($k_C = 100$ y $\tau_I = 4$), que representa la máxima capacidad de cada uno de los tanques (Figuras 24 a 29).

Para sistemas que no son BIBO, el CTF presenta nuevamente *Offset* debido a que, estos casos atípicos, las señales de entrada no convergen a un valor, no obstante, se simula el comportamiento del control (Figura 30).

Finalmente, cabe destacar que se espera que los resultados de las simulaciones de este trabajo de investigación puedan compararse con resultados experimentales que se obtendrán en el proyecto PAPIME con clave PE112423, de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, cuya meta es realizar diversos estudios acerca de las fallas en sensores, bombas, válvulas, y fugas en sistemas como el de la Figura 12.

6. Bibliografía referenciada.

Anzures, J. y Pitalúa, N. (2009). *Detección y aislamiento robusto de fallas mediante observadores con entradas desconocidas*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Recuperado a partir de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/24580>

Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. y Staroswiecki, M. (2016). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.

Borja, V. (2020). *Estrategias de Control Tolerante a Fallas de Sistemas de Generación de Energía Eólica e Integración a la Red* [Tesis de Doctorado, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico]. Recuperado a partir de [DE Vicente Borja Jaimes 2022.pdf](#)

Bougatef, Z., Abdelkrim, N., Aitouche, A. y Abdelkrim, M. N. (2020). *Sensor Fault Detection and Estimation Based on UIO for LPV Time Delay Systems Using Descriptor Approach*. En: Derbel, N., Ghommam, J., Zhu, Q. (Eds.) *Diagnosis, Fault Detection & Tolerant Control. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 269. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1746-4_3

Córdova, J. (2017). *Diseño de un Sistema de Diagnóstico y Control Tolerante de Fallas en Actuadores para el Proceso Hidráulico de Cuatro Tanques Acoplados* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9510>

De los Santos, O. R. (2020). *Control tolerante a fallas de una grúa de tres grados de libertad mediante técnicas Takagi-Sugeno* [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez]. Recuperado a partir de <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/2041>

Escaño, J. M., García, J. y Nuevo, A. (2019). *Integración de sistemas de automatización industrial* (p. 02). Ediciones Paraninfo.

Gómez, R. V. (2016). *Análisis, diseño e implementación de observadores no lineales en diferentes modelos biológicos* [Tesis de Doctorado, Centro de Investigación

y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional]. Recuperado a partir de <https://repositorio.cinvestav.mx/bitstream/handle/cinvestav/1355/SSIT0013926.pdf>

Kharrat, D., Gassara, H., Hajjaji, A. E. y Chaabane, M. (2018). Adaptive Observer and Fault Tolerant Control for Takagi-Sugeno Descriptor Nonlinear Systems with Sensor and Actuator Faults. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16, 972-982. <https://doi.org/10.1007/s12555-017-0546-8>

Mosaja, J. A. (2021). *Diseño e implementación de un sistema de diagnóstico y control adaptativo tolerante a fallos: aplicación a un proceso de nivel* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/12654>

Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J. C. y Chamseddine, A. (2009). *Fault-tolerant Control Systems: Design and Practical Applications*. Springer.

Patel, H. y Shah, V. (2018). A fault-tolerant control strategy for non-linear system: An application to the two tank conical noninteracting level control system. *2018 IEEE Distributed Computing, VLSI, Electrical Circuits and Robotics*, 64-70. <https://doi.org/10.1109/DISCOVER.2018.8674119>

Picó, M. (2015). *Diseño de Controladores Tolerante a Fallas Aplicados a Procesos de la Industria Química* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional del Litoral]. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/11185/764>

Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B. y Ocampo, C. (2004). Control Tolerante a Fallos (Parte I): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 1(1), 15-31. <https://doi.org/10.4995/riai.2004.8021>

Ramírez, J. P. (2020). *Sistema de control tolerante a fallos pasivo para dispositivos de compensación dinámicos instalados en Micro-Red híbrida inteligentes basado en H_∞ y redes neuronales artificiales* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. Recuperado a partir de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21742>

Wang, X. (2020). Active Fault Tolerant Control for Unmanned Underwater Vehicle With Sensor Fault. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(12), 9485-9495. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.3003108>

Zhang, J., Swain, A. K. y Nguang, S. K. (2016). *Robust Observer-Based Fault Diagnosis for Nonlinear Systems Using MATLAB*. Springer.

7. Bibliografía consultada.

Brizuela, J. A., Astorga, C. M., Zavala, A. y Canales, F. (2016). Control Tolerante a Fallas Activo: Estimación y acomodación de fallas en sensores aplicado al modelo LPV de una bicicleta sin conductor. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13, 174-185. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2016.01.001>

Gao, Z. y Ho, D. W. C. (2006). State/Noise Estimator for Descriptor Systems With Application to Sensor Fault Diagnosis. *IEEE transactions on signal processing*, 54(4), 1316-1326. <https://doi.org/10.1109/TSP.2006.870579>

Moradmand, A., Shafai, B. y Saif, M. (29 de junio al 2 de julio de 2020). *A Design Procedure for Robust Actuator and Sensor Fault Detection*. 2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT'20). Prague, Czech Republic. <https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263913>

Osorio, G. L, Darouach, M., Boutat, L. y Astorga, C. M. (2019). Chapter 1 – On Dynamic Observers Design for Descriptor Systems en Boubaker, O., Zhu, Q., Mahmoud, M. S., Ragot, J., Karimi, H. R., Dávila, J. (Ed.), *Emerging Methodologies and Applications in Modelling: New Trends in Observer-Based Control* (pp. 3-45). Elsevier, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817038-0.00001-9>

Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B. y Ocampo, C. (2004). Control Tolerante a Fallos (Parte II): Mecanismos de tolerancia y sistema supervisor. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 1(2), 5-21. <http://dx.doi.org/10.4995/riai.v1i2.10608>

Shafai, B. y Saif, M. (2015). Proportional-Integral Observer in Robust Control, Fault Detection, and Decentralized Control of Dynamic Systems. *El-Osery, A., Prevost, J. (eds) Control and Systems Engineering. Studies in Systems, Decision and Control*, 27, 13-42. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-14636-2_2

Anexo 1. Código MATLAB para el UIO con enfoque descriptor.

```
clear
clc

AT=pi*((20)^2)/4; %cm^2
q1=0.0015*(100^3); %cm^3/min
AP=pi*((0.7)^2)/4; %cm^2
Cd12=0.55;
Cd23=0.58;
Cd30=0.45;
g=9.81*(60^2)*(100); %cm/min^2
f1=-2;
f2=5;
f3=0.1;
tf=60; %Tiempo de aparición de falla
td=100; %Tiempo de aparición de desviación

hs = [13.51;6.40;10.62];

Ao=[-0.3357 0.3357 0;
     0.3357 -0.7090 0;
     0 0.3733 -0.2247];
Bo=[1 0 0;0 0 0;0 0 0];
Co=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
Do=zeros(3);

%% UIO de orden completo

Er=[eye(3) zeros(3);zeros(3,6)];
Ar=[Ao zeros(3);zeros(3) -eye(3)];
Br=[Bo;zeros(3)];
Cr=[Co eye(3)];
Dr=[zeros(3);eye(3)];

H=inv([Er;Cr]*[Er;Cr]*[Er;Cr]';
H1=H(:,1:6);
H2=H(:,7:end);

PU=sdpvar(6);
QU=sdpvar(6,3,'full');
KC=sdpvar(3);
```

sdpvar beta

```
LMI=blkvar;  
LMI(1,1)=PU*H1*Ar-QU*Cr+Ar'*H1'*PU-Cr'*QU';  
LMI(1,2)=PU*H1*Dr;  
LMI(1,3)=Cr';  
LMI(2,2)=-beta*eye(3);  
LMI(3,3)=-eye(3);  
LMI=sdpvar(LMI);  
LMIU=[PU>=0,LMI<=0,beta>=0];  
LMIC=[Ao-Bo*KC*Co<=0,KC>=0]; %Cálculo de ganancia de control  
optimize(LMIU) %Se puede minimizar también a beta  
optimize(LMIC,KC) %Cálculo de ganancia de control  
PU=value(PU);  
QU=value(QU);  
beta=sqrt(value(beta));  
KC=value(KC); %Cálculo de ganancia de control  
K=PU\QU;  
  
N=H1*Ar+K*Cr;  
KU=K-N*H2;
```

Anexo 2. Productos de la tesis

Diseño y simulación de un control tolerante a fallas en sensores de nivel para tanques en serie

A.M.A. Romero Pérez^{1*}, M.A. Vaca Hernández², F. Caballero¹, B. García Rojas¹, G. Ramírez Dámaso³,

¹División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico Nacional de México/Tecnológico de Estudios Superiores Ecatepec, Av. Tecnológico s/n, Valle de Anáhuac, Ecatepec, Estado de México, 55210, México.

²Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza C.II, Batalla 5 de mayo s/n, Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, Ciudad de México, 09320, México.

³Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura "Unidad Ticomán" del Instituto Politécnico Nacional, Av. Ticomán 600, San José Ticomán, Gustavo A. Madero, Ciudad de México, 07340, México.

*nrcamx@comunidad.unam.mx

Área de participación: Ingeniería Química

Resumen

Los instrumentos de control son propensos a la aparición de alguna falla debido a una incorrecta instalación, o bien, por el desgaste de éstos. Un sistema de control tolerante a fallas (CTF) permite continuar con un proceso estable, o incluso controlable, a pesar de la existencia de fallas en los instrumentos. El presente trabajo diseña y simula un CTF activo en sensores de nivel para un sistema de tanques a partir de un observador de entradas desconocidas (UIO) robusto con enfoque descriptor para la detección, aislamiento y estimación de las magnitudes de las fallas, para enmascarar las señales de los medidores, sin modificar la ley de control empleada en el proceso y controlarlo al valor de altura deseado, a pesar de las diferentes dinámicas de fallas abruptas estudiadas.

Palabras clave: Control, Tolerante, Falla, Sensor.

Abstract

The control instruments are prone to the appearance of some failure due to incorrect installation or to their wear. A Fault Tolerant Control (FTC) system allows a stable, or even controllable, process to continue despite the existence of instrument failures. This work designs and simulates an active CTF in level sensors for a tank system based on a robust unknown input observer (UIO) with a descriptor approach for the detection, isolation, and estimation of the fault magnitudes, to mask the faults, without modifying the control law used in the process and controlling it to the desired height value, despite the different abrupt failure dynamics studied.

Key words: Control, Tolerant, Fault, Sensor.

Introducción

En la teoría clásica de control, se asume que todos los componentes trabajan con propiedad. Sin embargo, la experiencia nos ha enseñado que esta suposición no se garantiza todo el tiempo, y en ocasiones, los componentes del sistema pueden enfrentar algunas fallas en sus tareas [1]. Por tal razón, implementar un sistema que capaz de mantener el proceso controlable, o degradado pero estabilizado es el objetivo de la teoría del CTF.

Los sistemas de CTF se clasifican en dos categorías: activo (CTFA) y pasivo (CTFP). El CTFA consiste en un sistema diagnóstico de fallas (SDF), un mecanismo de reconfiguración y un módulo de control. Dependiendo del diseño del SDF, a partir de observadores de estados o inteligencia artificial, éste puede detectar, aislar y estimar las fallas en sensores o actuadores; el modo activo del CTF permite que el SDF envíe la información de los instrumentos del proceso en tiempo real, por lo que la reconfiguración del control establecido también se realiza activamente. El CTFA tiene la capacidad de lidiar con muchos tipos de fallas y da como resultado un rendimiento óptimo, sin embargo, es sensible al resultado obtenido del SDF, el cual puede proporcionar una decisión equivocada debido al excesivo ruido presente en las señales. Así mismo, el diseño se vuelve más complicado para sistemas no lineales y con incertidumbres [2]. El presente trabajo aborda un CTF en sensores de nivel, debido a que es uno de los parámetros más frecuentes a controlar en las industrias químicas, y cuyas anomalías encaminan a provocar disminución en la calidad de los productos, derrames, y otro tipo de accidentes.

* Aceptado para su publicación en la revista Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, 2023

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DIAGNÓSTICO PARA LA ESTIMACIÓN DE FALLAS EN SENSORES DE NIVEL PARA UN SISTEMA DE TANQUES EN SERIE

A. M. A. Romero Pérez^a, F. Caballero^b, A. Varela Martínez^a, N. Jardón Romero^b, B. E. García Rojas^b, A. Díaz Medina^a, M. A. Vaca Hernández^a

^a División de Ingeniería Química y Bioquímica, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico s/n, Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos, Estado de México, 55210, MÉXICO. orcams@comunidad.unam.mx

^b Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza C. II, Batalla 5 de mayo s/n, Col. Ejército de Oriente, Iztapalapa, Ciudad de México, 09320, MÉXICO.

Resumen

La automatización industrial se mantiene en constante evolución para salvaguardar recursos materiales, energéticos y humanos. Para lograr su objetivo, debe contar con instrumentos capaces de monitorear, controlar o manipular variables de operación; sin embargo, todo dispositivo es propenso a fallas, y los objetivos de la automatización se vulneran, por lo que un oportuno diagnóstico permite evitar diversos tipos de accidentes o pérdidas. En este trabajo se presenta el diseño de un sistema diagnóstico de fallas (SDF) que detecta, aísla y estima la magnitud de falla existente en sensores de nivel en un sistema de tres tanques en serie. Al momento es posible simular el comportamiento del SDF a partir de fallas con magnitudes grandes y pequeñas; con y sin ruido; y con dinámicas abruptas.

Introducción

La industria de transformación es uno de los principales sectores que contribuyen al desarrollo económico, en estos sistemas se debe asegurar el buen funcionamiento de todos sus componentes para proveer los productos o servicios para los cuales fueron diseñados [1]. Se denomina falla a una anomalía física que influye en el comportamiento del instrumento provocando inestabilidad al sistema. Por otra parte, los tanques en serie son de gran interés debido al transporte y almacenamiento de fluidos, por lo que el control en estos equipos es vital para evitar accidentes como derrames o mezclas indeseadas. Un SDF tiene como tarea detectar la ocurrencia de falla, y en casos más robustos, ubicar el instrumento con falla, así como estimar la magnitud de ésta. Una de las estrategias en el diseño de un SDF es el empleo de modelos matemáticos los cuales son comparados con la información del sistema real. Un observador de entradas desconocidas (UIO) con enfoque descriptor permite detectar y estimar la magnitud de falla para lograr el monitoreo preciso, otorgando una operación de mantenimiento eficiente y garantizando la seguridad del medio ambiente [2].

Metodología

Se establece el modelo dinámico linealizado del sistema de tanques en serie, como se muestra en la Figura 1, en espacio de estados (ecuaciones 1 y 2):

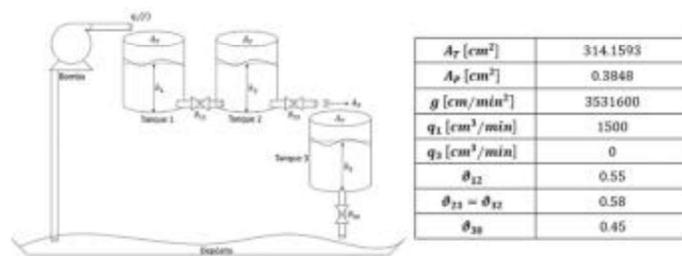


Figura 1. Sistema de tanques en serie.