

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**Diseño de un Sistema de Diagnóstico y Control Tolerante de Fallas
en Actuadores para el Proceso Hidráulico de Cuatro Tanques
Acoplados**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN
INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN**

AUTOR:

Josmell Córdova Claros

ASESOR:

Ph.D. Juan Javier Sotomayor Moriano

Septiembre, 2017

DEDICATORIA

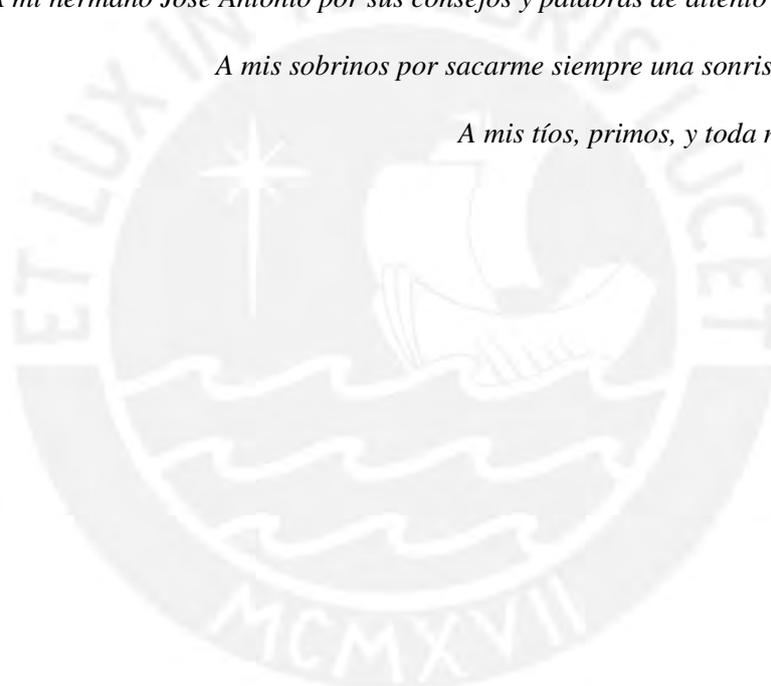
A mi mamá Neri Carmen por todo su amor incondicional, sacrificio y apoyo en mis estudios. Por su esfuerzo de sacar adelante nuestra familia, por ser un ejemplo de lucha, perseverancia y superación.

A mi papá Antonio por todo su inmenso amor y apoyo, por ser un padre trabajador, y por inculcarme valores como la responsabilidad, puntualidad, limpieza y el ser ordenado.

A mi hermano José Antonio por sus consejos y palabras de aliento que nunca faltaron.

A mis sobrinos por sacarme siempre una sonrisa y alegrar mi vida.

A mis tíos, primos, y toda mi familia y amigos.



AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo de tesis, Josmell Córdova Claros, agradece la subvención de FONDECYT-CONCYTEC a través del convenio 2015-034 FONDECYT, en el marco del cual se desarrolló la presente tesis: "Diseño de un sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas en actuadores para el proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados".



RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados en simulación de un sistema de control tolerante a fallas activo aplicado al proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados. El sistema de control tiene el objetivo de mantener las propiedades de desempeño deseadas con y sin la presencia de fallas parciales en actuadores (bombas). El sistema de control tolerante se desarrolla a partir de un sistema de detección y diagnóstico de fallas empleando el observador de entrada desconocida para estimar los niveles de los tanques. Después, se generan los residuos y se evalúan mediante un método basado en la norma del vector. Para aislar las fallas en los dos actuadores se utilizan dos observadores de entrada desconocida. La ventaja de este observador es el permitir estimar la magnitud de la falla. El mecanismo de compensación consiste en calcular una nueva ley de control que se adiciona a la señal que envía el controlador. Este método se conoce como compensación aditiva de fallas. Dicho método se aplica a dos tipos de controladores: basado en realimentación de estados (con acción integral), y basado en matriz dinámica. La principal contribución de este trabajo es el sistema de control tolerante, el cual tiene la capacidad de mantener al sistema de control operando en presencia de una falla parcial en uno de los actuadores con un desempeño cercano al obtenido cuando no hay fallas. Se utiliza la integral del error cuadrático como índice de desempeño. Las pruebas de simulación en SIMULINK muestran que la estrategia de compensación permite que los niveles de los tanques sigan sus valores de referencia de manera adecuada incluso en presencia de fallas. La misma metodología se implementa en el software RSLogix 5000 y se descarga en un PLC virtual, obteniéndose resultados similares a SIMULINK. Las simulaciones en SIMULINK y RSLogix 5000 demuestran que el controlador tolerante a fallas tiene un rendimiento superior en comparación al controlador sin compensación de fallas.

ÍNDICE

Introducción	1
1 Estado del arte del diagnóstico y control tolerante a fallas en sistemas hidráulicos	3
1.1 Introducción	3
1.2 Diagnóstico de fallas basado en modelos	3
1.2.1 Generalidades	3
1.2.2 Etapas de un sistema de control tolerante a fallas	3
1.2.3 Etapas de un sistema de diagnóstico de fallas	4
1.2.4 Clasificación de los métodos de diagnóstico de fallas	4
1.2.5 Diagnóstico de fallas basado en modelos	5
1.2.6 Clasificación de fallas	6
1.2.7 Estado del arte del diagnóstico de fallas en sistemas hidráulicos	9
1.2.8 Conclusiones parciales del diagnóstico de fallas	13
1.3 Control tolerante a fallas	13
1.3.1 Generalidades	13
1.3.2 Clasificación del control tolerante a fallas	13
1.3.3 Métodos de control tolerante a fallas	14
1.3.4 Estado del arte del control tolerante a fallas en sistemas hidráulicos	15
1.3.5 Conclusiones parciales del control tolerante a fallas	19
1.4 Desempeño de los sistemas de control	20
1.4.1 Generalidades	20
1.4.2 Especificaciones de la respuesta en el tiempo	20
1.4.3 Índices de desempeño	21
1.5 Objetivos de la tesis	22
1.5.1 Objetivo general	22
1.5.2 Objetivos específicos	23
2 Modelado y control del proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados	24
2.1 Introducción	24
2.2 Proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados	24
2.3 Desarrollo del modelo	26
2.3.1 Generalidades	26
2.3.2 Condiciones en estado estacionario	31
2.3.3 Linealización de modelos no lineales	32
2.3.4 Linealización del sistema de cuatro tanques	33

2.3.5	Ceros y polos	34
2.3.6	Fase mínima y fase no mínima	35
2.4	Sistema de control	36
2.4.1	Generalidades	36
2.4.2	Control por realimentación de estados	36
2.4.2.1	Regulador lineal cuadrático (LQR)	38
2.4.2.2	Ubicación de polos	39
2.4.3	Control por matriz dinámica	41
2.4.3.1	Generalidades	41
2.4.3.2	Sistema SISO	43
2.4.3.3	Sistema MIMO	47
2.5	Diseño y simulación del sistema de control	49
2.5.1	Control por realimentación de estados	51
2.5.2	Control por matriz dinámica	53
2.6	Representación de fallas	56
2.7	Conclusiones parciales	60
3	Diseño del Sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas	61
3.1	Introducción	61
3.2	Diagnóstico de fallas basado en modelo	61
3.2.1	Generalidades	61
3.2.2	Detección y aislamiento de fallas	63
3.2.2.1	Generación de residuos	63
3.2.2.2	Evaluación de residuos	65
3.2.3	Estimación de fallas en actuadores basado en observadores UIO	68
3.3	Sistema de control tolerante a fallas en actuadores	68
3.4	Simulación del sistema de control con y sin fallas	71
3.4.1	Control por realimentación de estados	71
3.4.2	Control por matriz dinámica	75
3.4.3	Conclusiones parciales	78
3.5	Simulación del sistema de diagnóstico de fallas	78
3.5.1	Detección y aislamiento de fallas (FDI)	78
3.5.2	Estimación de fallas (FE)	82
3.5.3	Conclusiones parciales	86
3.6	Simulación del sistema de control tolerante a fallas y comparación con el sistema de control	86
3.7	Conclusiones parciales	94
4	Propuesta de implementación	96
4.1	Introducción	96
4.2	Diagrama de Flujo	96
4.3	Implementación en RSLogix 5000	97
4.4	Interfaz con FactoryTalk View	100

4.4.1	Resultados de simulación de fallas	101
4.5	Conclusiones parciales	107
	Conclusiones	108
	Recomendaciones	109
	Bibliografía	110
	Anexo A Programas en MATLAB	
	Anexo B Programas en SIMULINK	
	Anexo C Programas en RSLogix 5000	



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Los tres pasos del diagnóstico de fallas.	4
Figura 1.2	Redundancia analítica.	5
Figura 1.3	Esquema del diagnóstico de fallas basado en modelos.	6
Figura 1.4	Sistema en lazo cerrado con fallas de actuadores, sensores y de procesos.	7
Figura 1.5	De acuerdo a su representación, las fallas son divididas en aditivas y multiplicativas.	8
Figura 1.6	De acuerdo a sus características en el tiempo, las fallas pueden ser abruptas, incipientes e intermitentes.	8
Figura 1.7	Descripción de un control tolerante a fallas activo.	14
Figura 1.8	Métodos de control tolerante a fallas activo (Patton, 2015).	15
Figura 1.9	Especificaciones de la respuesta transitoria.	21
Figura 2.1	Modelo físico del sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000).	25
Figura 2.2	Diagrama esquemático del sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000).	25
Figura 2.3	Balance de masa para un tanque con una sola entrada y salida	27
Figura 2.4	Balance de masa para un tanque que se está drenando	28
Figura 2.5	Balance de masa para el sistema de cuatro tanques	29
Figura 2.6	Otras configuraciones para el sistema de cuatro tanques encontradas en la literatura (Alvarado et al., 2011; Sutha et al., 2015).	30
Figura 2.7	Configuración de la planta piloto de cuatro tanques de la PUCP.	31
Figura 2.8	Representación del sistema tomando en cuenta el punto de operación.	34
Figura 2.9	Estado estacionario.	35
Figura 2.10	Determinación del rango lineal del proceso de cuatro tanques.	35
Figura 2.11	Sistema de control nominal tomando en cuenta el punto de operación.	38
Figura 2.12	Concepto básico del control predictivo basado en modelo (Seborg et al., 2010)	42
Figura 2.13	Polos y ceros del sistema de cuatro tanques en lazo abierto.	51
Figura 2.14	Diagrama del sistema de control en SIMULINK.	52
Figura 2.15	Respuesta temporal del controlador basado en realimentación de estados.	53
Figura 2.16	Respuesta paso del sistema de cuatro tanques para un cambio en el voltaje de la bomba 1 (izquierda) y bomba 2 (derecha).	54
Figura 2.17	Respuesta temporal del controlador DMC.	56
Figura 3.1	Esquema del observador de entrada desconocida (UIO).	65
Figura 3.2	Diagrama de flujo para el UIO.	66
Figura 3.3	Esquema de diagnóstico y control tolerante a fallas en actuadores.	71

Figura 3.4 Salidas del sistema para el caso libre de falla (controlador basado en realimentación de estados).	72
Figura 3.5 Entradas del sistema para el caso libre de falla.	73
Figura 3.6 Salidas del sistema (no controladas) para el caso libre de falla.	73
Figura 3.7 Nivel del tanque 1 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador basado en realimentación de estados).	74
Figura 3.8 Nivel del tanque 2 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador basado en realimentación de estados).	74
Figura 3.9 Salidas del sistema para el caso libre de falla (controlador DMC).	76
Figura 3.10 Entradas del sistema para el caso libre de falla (controlador DMC).	76
Figura 3.11 Nivel del tanque 1 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador DMC).	77
Figura 3.12 Nivel del tanque 2 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador DMC).	77
Figura 3.13 Diagrama del sistema FDI en SIMULINK.	79
Figura 3.14 Evaluación de residuos para el sistema libre de fallas (controlador por realimentación de estados).	80
Figura 3.15 Evaluación de residuos para el sistema libre de fallas (controlador DMC).	80
Figura 3.16 Convergencia de los valores RMS para el controlador por realimentación de estados.	81
Figura 3.17 FDI cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados).	83
Figura 3.18 FDI cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC).	83
Figura 3.19 Detección y Diagnóstico de fallas (FDI/FE) en SIMULINK.	84
Figura 3.20 Estimación de falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados).	85
Figura 3.21 Estimación de falla en la bomba 1 (controlador DMC).	85
Figura 3.22 Nivel del tanque 1 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).	87
Figura 3.23 Nivel del tanque 2 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).	87
Figura 3.24 Nivel del tanque 1 cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).	88
Figura 3.25 Entrada de control cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).	88
Figura 3.26 Entrada de control cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).	89
Figura 3.27 Nivel del tanque 1 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).	89
Figura 3.28 Nivel del tanque 2 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).	90
Figura 3.29 Nivel del tanque 1 cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).	90

Figura 3.30	Entrada de control cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).	91
Figura 3.31	Entrada de control cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).	91
Figura 3.32	Sistema de control tolerante a fallas en SIMULINK.	94
Figura 4.1	Diagrama de flujo del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores.	96
Figura 4.2	Diagrama de flujo para la detección y aislamiento de fallas parciales en actuadores.	97
Figura 4.3	Interfaz del software RSLogix 5000.	98
Figura 4.4	Ejecución de tareas tipo continua, periódica y basada en eventos.	99
Figura 4.5	Estructura del programa del PLC en RSLogix 5000.	100
Figura 4.6	Interfaz del software FactoryTalk View Studio ME.	101
Figura 4.7	Diagrama funcional de la planta de cuatro tanques acoplados.	101
Figura 4.8	Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador basado en realimentación de estados en el software FactoryTalk View para una falla en la bomba 1.	102
Figura 4.9	Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC en el software FactoryTalk View para una falla en la bomba 1.	103
Figura 4.10	Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador por realimentación de estados con compensación de fallas en el software FactoryTalk View.	103
Figura 4.11	Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC con compensación de fallas en el software FactoryTalk View.	104
Figura 4.12	Detección y aislamiento de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador por realimentación de estados).	105
Figura 4.13	Detección y aislamiento de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador DMC).	105
Figura 4.14	Estimación de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador por realimentación de estados).	106
Figura 4.15	Estimación de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador DMC).	106
Figura B.1	Control por realimentación de estados.	
Figura B.2	Bloque “Controlador RE”.	
Figura B.3	Bloque “Planta”.	
Figura B.4	Bloque “Fallas en actuadores”.	
Figura B.5	Bloque “falla en actuador 1”.	
Figura B.6	Control DMC.	
Figura B.7	Bloque “Controlador DMC”.	
Figura B.8	Detección y aislamiento de fallas (con controlador por realimentación de estados).	
Figura B.9	Bloque “Generación de Residuos”.	

Figura B.10 Bloque “UIO”

Figura B.11 Bloque “Evaluación de Residuos”.

Figura B.12 Detección y aislamiento de fallas (controlador DMC).

Figura B.13 Detección y aislamiento de fallas (controlador por realimentación de estados).

Figura B.14 Bloque “Evaluación de Residuos”.

Figura B.15 Detección y aislamiento de fallas (controlador DMC).

Figura B.16 Estimación de fallas (controlador por realimentación de estados).

Figura B.17 Bloque “Generación de Residuos”.

Figura B.18 Bloque “Estimación de la falla”.

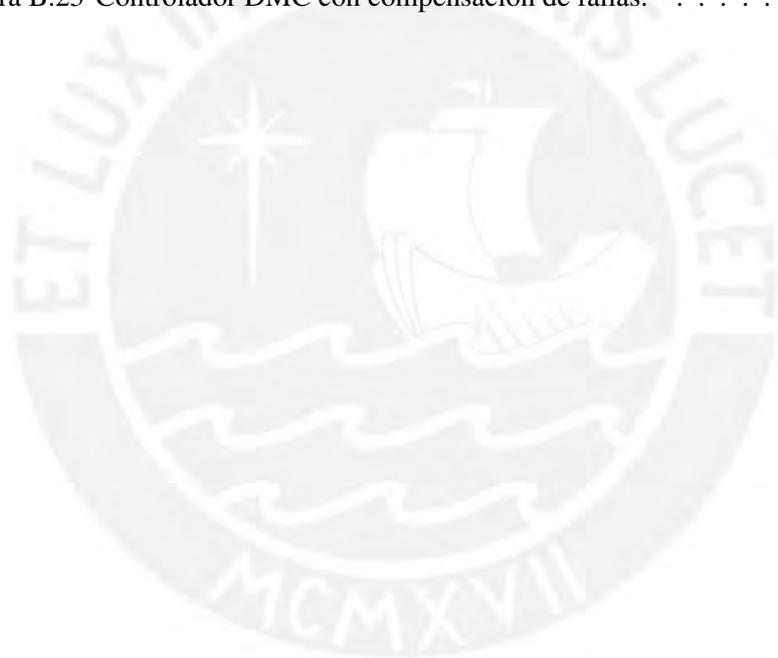
Figura B.19 Bloque “estimación falla fa1”.

Figura B.20 Estimación de fallas (controlador DMC).

Figura B.21 Controlador por realimentación de estados con compensación de fallas.

Figura B.22 Bloque “compensación de fallas”.

Figura B.23 Controlador DMC con compensación de fallas.



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Índices de desempeño para controladores.	22
Tabla 1.2	Índices de desempeño para métodos de diagnóstico de fallas	22
Tabla 2.1	Parámetros para el sistema de cuatro tanques.	30
Tabla 2.2	Parámetros para el punto de operación para la linealización.	33
Tabla 2.3	Polos normalizados de Bessel	41
Tabla 2.4	Índice de desempeño para controlador por realimentación de estados. . .	53
Tabla 2.5	Índice de desempeño para controlador DMC.	56
Tabla 2.6	Diferentes tipos de fallas en actuadores (Noura et al., 2009).	57
Tabla 3.1	Matriz de firma de fallas	63
Tabla 3.2	Desempeño del controlador por realimentación de estados con y sin falla.	75
Tabla 3.3	Desempeño del controlador DMC con y sin falla.	75
Tabla 3.4	Valores de los umbrales para el FDI.	81
Tabla 3.5	Desempeño del sistema de diagnóstico de fallas.	84
Tabla 3.6	Desempeño del sistema de diagnóstico de fallas para diferentes magnitudes de fallas.	84
Tabla 3.7	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE (control por realimentación de estados).	92
Tabla 3.8	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE (control DMC)	92
Tabla 3.9	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado (control por realimentación de estados).	92
Tabla 3.10	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado (control DMC).	92
Tabla 3.11	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado para diferentes magnitudes de falla (control por realimentación de estados).	93
Tabla 3.12	Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado para diferentes magnitudes de falla (control DMC). .	93
Tabla 3.13	Desempeño del controlador FTC con respecto al tiempo de detección de fallas (Índice ISE normalizado).	94

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los sistemas de control están presentes en casi todos los aspectos de la vida cotidiana. Están en los autos, cocinas, reproductores DVD, computadoras, etc. Además, se encuentran en los elevadores, barcos, aviones y naves espaciales. Los sistemas de control están presentes en todo tipo de industrias, y han sido usados para controlar eficientemente y de forma segura reactores químicos, columnas de destilación, centrales eléctricas, etc. Los sistemas de control trabajan de forma constante e inagotable y han hecho posible que las vidas de las personas sean más confortables, seguras y eficientes ... hasta que el sistema falla (Edwards et al., 2010). Esto es particularmente importante en sistemas con seguridad crítica como aviones, naves espaciales, plantas de energía nuclear, plantas químicas que procesan materiales peligrosos, etc. En tales sistemas, una falla menor en algún componente del sistema puede tener consecuencias adversas como pérdidas de vidas humanas, de materiales o daños al medio ambiente.

El proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados (Johansson, 2000) es no lineal y multivariable y puede ser visto como un prototipo de muchas aplicaciones en la industria de procesos, tales como plantas químicas, petroquímicas, de petróleo y gas, y tratamiento de aguas (Alipouri y Poshtan, 2013), donde el control de nivel de los productos líquidos es crucial para poder cumplir con las especificaciones de calidad, eficiencia, y seguridad; esto debido al alto costo y/o peligrosidad de dichos productos. Utilizando prototipos de sistemas hidráulicos, investigadores han podido probar exitosamente varias técnicas de control, así como métodos de diagnóstico de fallas basado en modelo (Korbicz y Witczak, 2007; Noura et al., 2009).

En la mayoría de casos, los sistemas de control han sido diseñados sin considerar la presencia de fallas en actuadores, sensores u otros componentes del sistema (Mahmoud y Xia, 2013); por lo tanto, cuando éstas ocurren, provocan un desempeño no deseado, inestabilidad, y propician desastres. Lo anterior demanda el desarrollo de sistemas de control tolerante a fallas (FTC¹), los cuales tienen la habilidad de compensar las fallas, manteniendo las propiedades de estabilidad y desempeño deseadas. (Zhang y Jiang, 2008).

Las fallas de interés de esta tesis son los *actuadores*, ya que estos representan las uniones entre las señales de control que envía el controlador y las acciones físicas realizadas por el sistema. Las fallas en los actuadores afectan la posibilidad de manipular el comportamiento del sistema, de aquí que su importancia es vital para su correcto funcionamiento. Las fallas comunes en los actuadores son: *fallas totales* y *fallas parciales* (pérdida de efectividad). Sin embargo, solo se considerarán fallas del tipo parcial. En estas, el actuador se vuelve menos efectivo y proporciona a la planta solo una parte de la señal de actuación normal. Para el sistema

¹Por sus siglas en inglés, *Fault-tolerant Control*

de cuatro tanques los actuadores son *bombas*, las cuales reciben como entrada una señal de voltaje que envía el controlador, con el fin de manipular el caudal de líquido que ingresa a los tanques. Una falla parcial en la bomba puede ser resultado de un incremento en la resistencia de la bomba, una caída en la tensión de alimentación, de alguna fuga, o taponamiento que provoca que el caudal entregado sea menor al requerido.

Para el diseño del sistema de control tolerante a fallas parciales en actuadores es crucial el desarrollo de: *a) un sistema de control* que satisface los objetivos de control cuando no hay fallas (también llamado sistema de control *nominal*), *b) un sistema de detección y diagnóstico de fallas* (FDD²) que detecta, aísla y estima la magnitud de las fallas, y *c) un módulo de acomodación de fallas* el cual compensa el efecto de la falla. El método utilizado para compensar fallas está descrito en Noura et al. (2009) y es conocido como *compensación aditiva de fallas* (Puig et al., 2004).

En esta tesis se desarrolla el método de compensación de fallas propuesto para dos tipos de controladores: un controlador basado en *realimentación de estados* (incluyendo acción integral con el fin de alcanzar un error estacionario igual a cero) y un controlador predictivo conocido como *controlador por matriz dinámica* (DMC³) (Camacho y Bordons, 2007). El sistema FDD utiliza métodos basados en modelo, específicamente se usa la técnica de *observador de entrada desconocida* (UIO⁴), la cual tiene la ventaja de no solo detectar y aislar la falla, sino de poder estimar su magnitud. El sistema FDD es crucial, pues proporciona la información de la falla al módulo de acomodación de fallas. La acomodación está basada en la técnica de *compensación aditiva de fallas* (Noura et al., 2009), la cual consiste en el cálculo de una nueva ley de control, compuesta por la señal de control que envía el controlador nominal más una señal de control adicional (basada en la magnitud de la falla estimada) que se suma a la nominal con el fin de compensar la falla.

En el capítulo 1 se lleva a cabo el estado de arte del diagnóstico y control tolerante de fallas en sistemas hidráulicos, con énfasis en los procesos de tanques interconectados. Seguidamente, en el capítulo 2 se obtiene el modelo matemático del proceso de cuatro tanques, y se presentan los algoritmos del controlador por realimentación y DMC. Luego, ambos controladores son diseñados y simulados para evaluar su desempeño. Finalmente se modelan las fallas parciales en los actuadores. En el capítulo 3 se presenta la metodología para el diseño del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores. El diagnóstico de fallas se basa en la técnica de observador de entrada desconocida, y el control tolerante de fallas utiliza el método de compensación aditiva de fallas. Finalmente se simula y compara el desempeño del controlador con y sin compensación de fallas. En el capítulo 4 se desarrolla una propuesta de implementación práctica del esquema propuesto con el software RSLogix 5000 en un PLC virtual (RSLogix Emulate 5000).

²Por sus siglas en inglés, *Fault Detection and Diagnosis*

³Por sus siglas en inglés, *Dynamic Matrix Control*

⁴Por sus siglas en inglés, *Unknown Input Observer*

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE DEL DIAGNÓSTICO Y CONTROL TOLERANTE A FALLAS EN SISTEMAS HIDRÁULICOS

1.1. Introducción

A continuación se brinda una breve introducción a los campos del diagnóstico y control tolerante de fallas. Además, se describen de forma concisa las investigaciones publicadas en los últimos años en ambos campos, con énfasis en sistemas hidráulicos de tanques interconectados. Después, se presentan los criterios para evaluar el desempeño de un sistema de control. Finalmente, se establecen los objetivos de la presente tesis.

1.2. Diagnóstico de fallas basado en modelos

1.2.1. Generalidades

El diagnóstico de fallas se inició en los años 1970 y, desde ese entonces, ha tenido un desarrollo destacable. Su eficiencia en detectar fallas en sistemas dinámicos ha sido demostrado en un gran número de aplicaciones en procesos industriales y sistemas de control automático modernos. Hoy, el diagnóstico de fallas basado en modelos está integrado completamente en los sistemas de control de vehículos, robots, transporte, energía, procesos de manufactura, control de procesos, etc. (Ding, 2013)

En la literatura, la detección y el aislamiento de fallas o la detección y la identificación de fallas son usados intercambiamente y abreviados como “FDI¹”. Para ser precisos y evitar confusiones más adelante, se adopta la terminología de Mahmoud y Xia (2013), donde se adopta el término FDI para “detección y aislamiento de fallas”, y el término FDD² para la “detección y diagnóstico de fallas”, el cual incluye el FDI y le añade la identificación o estimación de fallas (FE). Por lo tanto, el FDI está incluido dentro del FDD.

1.2.2. Etapas de un sistema de control tolerante a fallas

De manera general, según Blanke et al. (2016), un sistema de control tolerante a fallas consiste de dos pasos:

1. **Diagnóstico de fallas:** la existencia de fallas deben ser detectadas y las fallas deben ser identificadas.

¹Por sus siglas en inglés, *Fault detection and isolation*

²Por sus siglas en inglés, *Fault Detection and Diagnosis*

2. **Rediseño del control:** el controlador tiene que adaptarse a la condición de falla de tal forma que el sistema global continúa satisfaciendo su objetivo.

Por lo tanto, para el diseño del sistema control tolerante a fallas que se desarrollará más adelante, es importante primero diseñar el sistema de diagnóstico de fallas.

1.2.3. Etapas de un sistema de diagnóstico de fallas

El concepto global de diagnóstico de fallas consiste en las tres tareas esenciales: detección de fallas, aislamiento de fallas y estimación de fallas (Zhang et al., 2012), como se muestra en la Fig. 1.1

- **Detección de fallas:** es decidir si una falla ha ocurrido o no. Este paso determina el tiempo en el cual el sistema es sujeto a alguna falla.
- **Aislamiento de fallas:** es encontrar en que componente la falla ha ocurrido, por ejemplo, que sensor o actuador ha fallado. Este paso determina la localización de la falla.
- **Estimación de fallas:** es identificar la falla y estimar su magnitud. Este paso determina el tipo de falla y su severidad.



Figura 1.1: Los tres pasos del diagnóstico de fallas.

Sin embargo, desde un punto de vista práctico, para conseguir un diagnóstico de fallas completo los siguientes tres pasos esenciales deben realizarse:

- **Generación de residuos:** consiste en generar residuos que reflejan la falla. Típicamente, los residuos son generados como la diferencia entre las salidas del sistema y sus estimados obtenidos con el modelo matemático.
- **Evaluación de residuos y toma de decisión:** consiste en realizar la decisión lógica del tiempo de ocurrencia de las fallas y su localización.
- **Estimación de fallas:** determinación del tamaño (magnitud) de las fallas.

1.2.4. Clasificación de los métodos de diagnóstico de fallas

Según Venkatasubramanian et al. (2003b), los métodos de diagnóstico de fallas se clasifican en tres grandes grupos:

- métodos basados en modelos cuantitativos

- métodos basados en modelos cualitativos
- métodos basados en la historia de procesos

El uso de una técnica u otra dependerá de las características de la planta y la disponibilidad del modelo de la misma.

En esta tesis se estudiarán las metodologías correspondientes a los métodos basado en modelos cuantitativos o simplemente *métodos basado en modelos*, debido a que son los que más se han desarrollado teóricamente y además son los que están más relacionados con los contenidos de la teoría de control.

1.2.5. Diagnóstico de fallas basado en modelos

El diagnóstico de fallas basado en modelos se basa en comprobar la consistencia de los comportamientos observados (mediciones de los sensores) con los estimados mediante modelos (llamado *redundancia analítica*), ver Fig. 1.2. Dicha consistencia se basa en el cálculo de la diferencia entre el valor predicho a partir del modelo y del valor real medido por los sensores. Esta diferencia se conoce como *residuo*. Por lo tanto, el residuo lleva el mensaje más importante para que un diagnóstico de fallas sea exitoso:

Si residuo $\neq 0$ entonces hay falla, sino no hay falla.

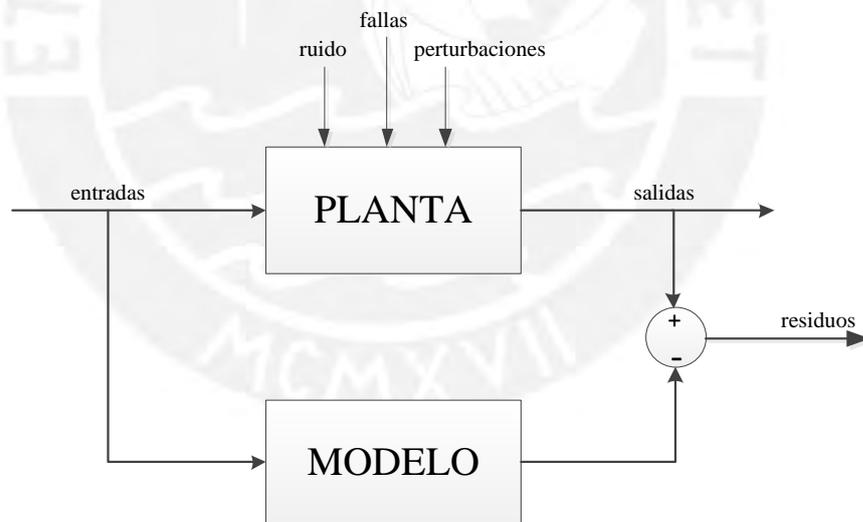


Figura 1.2: Redundancia analítica.

El procedimiento de construir la diferencia entre las salidas medidas y sus estimados es llamado *generación de residuos*. Después de este proceso, los residuos son procesados con el fin de extraer la información de la falla, este procedimiento se llama *evaluación de residuos*. Los métodos más populares de evaluación son los *métodos estadísticos* y los *métodos basado en la norma*. Ambos métodos tienen en común que crean un límite, llamado *umbral*, el cual considera todas las posibles incertidumbres del modelo, entradas desconocidas (perturbaciones) y ruido. Si se excede este umbral, entonces existe una falla en el proceso. En esta tesis el umbral se determina mediante el método conocido como *valor de la raíz media cuadrática*, y

se define en el capítulo 3. En la Fig. 1.3 se muestra el esquema de diagnóstico de fallas basado en modelos.

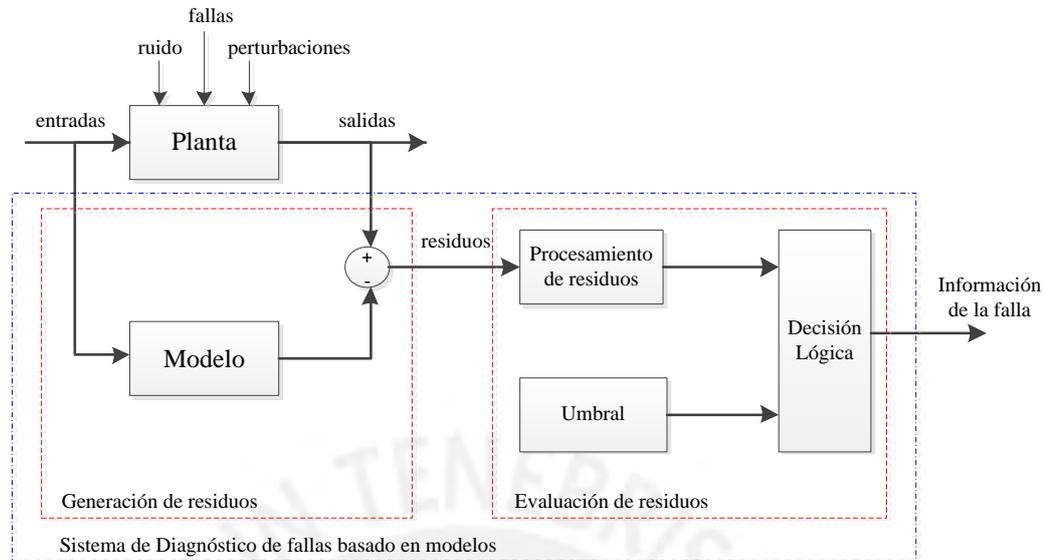


Figura 1.3: Esquema del diagnóstico de fallas basado en modelos.

Después de detectada la falla, se procede al aislamiento de la misma, con el fin de poder determinar cuál de las posibles fallas (sensores, actuadores o componentes del sistema) ha ocurrido (Castelló et al., 2016). Aunque para detectar una falla solo es necesario un residuo, para efectuar el aislamiento se necesita un conjunto (o vector) de residuos (Gertler, 1998).

Los métodos basado en modelos para la detección de fallas se suelen clasificar en:

- Ecuaciones de pariedad
- Observadores de estado
- Estimación paramétrica

Entre los esquemas existentes de diagnóstico de fallas basado en modelos, la técnica basado en observadores ha recibido bastante atención desde los años 1990, impulsada por el desarrollo de la teoría de control avanzado (Ding, 2013). En esta tesis, se utiliza el método de observadores de estado para detectar fallas, específicamente, se estudia el *observador de entrada desconocida*. Este observador se eligió debido a su ventaja de desacoplar una determinada entrada desconocida (una falla) de la estimación de los estados. Otra ventaja es el permitir estimar la magnitud de la falla, que es indispensable para el control tolerante a fallas.

Por otro lado, para el aislamiento de fallas se utiliza el enfoque de *residuos estructurados* (Gertler, 1998) de tal manera que cada residuo está diseñado para ser sensible a un subconjunto de fallas e insensible a las fallas restantes.

1.2.6. Clasificación de fallas

Las fallas suelen clasificarse de distintas formas (Edwards et al., 2010). Por ejemplo, de acuerdo al lugar de ocurrencia de la falla dentro del sistema se clasifican como: *fallas de actuadores*, *fallas de sensores* y *fallas de componentes* (ver Fig. 1.4).

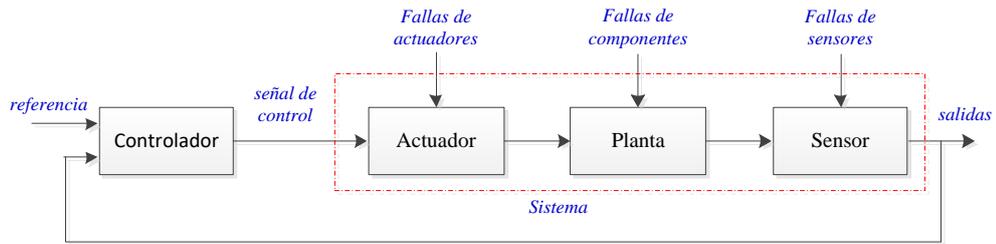


Figura 1.4: Sistema en lazo cerrado con fallas de actuadores, sensores y de procesos.

- Falla de actuadores:** representan la pérdida *parcial* o *total* de la acción de control. La falla completa del actuador significa que no se produce actuación en el sistema independientemente de la entrada que se aplica, esto por ejemplo, como resultado de una rotura o la quemadura de algún cable. Para una falla parcial en el actuador, este se convierte menos efectivo y proporciona a la planta solo con una parte de la señal normal de actuación. Esto puede resultar de fugas hidráulicas o neumáticas, el incremento de resistencia o una caída en la tensión de alimentación.

Este tipo de fallas según Witczak (2014) pueden dividirse en tres categorías:

- Bloqueado:** el actuador se bloquea en una cierta posición en un tiempo desconocido t_f y no responde a comandos posteriores.

$$u_{i,k} = u_{i,t_f} = \text{const}, \quad \forall k > t_f. \quad (1.1)$$

- Fuera de servicio:** el actuador no produce ninguna actuación en el sistema, es decir, se vuelve ineficaz.

$$u_{i,k} = 0, \quad \forall k > t_f. \quad (1.2)$$

- Perdida de efectividad:** una disminución en la ganancia del actuador que da como resultado una posición menor a la requerida.

$$u_{i,k} = \alpha_i u_{i,k}^c, \quad 0 < \alpha_i < 1 \quad \forall k > t_f. \quad (1.3)$$

donde $u_{i,k}^c$ representa la actuación requerida.

Recordar que los actuadores (o también llamados *elementos finales de control*) son dispositivos que se utilizan para ajustar la variable manipulada (generalmente flujos). Usualmente es una válvula de control, pero también pueden ser otros tipos de dispositivos como bombas de velocidad variable o calentadores eléctricos, etc.

- Fallas de sensores:** implican la incorrecta medición tomada del sistema real. Esta falla también puede subdividirse en parcial o total. Para una falla total, las mediciones ya no corresponden a los parámetros físicos requeridos. Para un fallo parcial del sensor, las mediciones dan una indicación incorrecta de los parámetros físicos requeridos.
- Falla de componentes:** son básicamente las variaciones en los parámetros del sistema, como por ejemplo, cambios en la viscosidad de un fluido, cambios en el coeficiente de

transferencia de calor en un intercambiador de calor, etc.

Para el proceso de cuatro tanques de Johansson (2000) los actuadores son específicamente los *variadores de velocidad* de las bombas, a los cuales les llega la señal procedente del controlador (voltaje), y proporcional a esta, producen una salida que actúa sobre el motor de la bomba para modificar su velocidad y, por tanto, el caudal de líquido que ingresa a los tanques. En esta tesis se tratan con fallas parciales, que para el caso de una bomba puede ser resultado de una pérdida de efectividad de la ganancia de la bomba, de un incremento en la resistencia de la bomba, de una caída en la tensión de alimentación, de alguna fuga o taponamiento, provocando que el caudal entregado sea menor al requerido.

Además, las fallas de acuerdo a como son modeladas, también pueden clasificarse como: *fallas aditivas* y *fallas multiplicativas* como se muestra en la Figura 1.5. Las fallas aditivas son sesgos (*bias*) en sensores y actuadores, fugas en la planta, etc. Las fallas multiplicativas son básicamente cambios en los parámetros de la planta. Fallas aditivas son adecuadas para representar fallas en componentes en el sistema, mientras que fallas en sensores y actuadores son en práctica de naturaleza multiplicativa.



Figura 1.5: De acuerdo a su representación, las fallas son divididas en aditivas y multiplicativas.

Las fallas también son clasificadas de acuerdo a sus características en el tiempo (ver Figura 1.6) como *abruptas*, *incipientes* e *intermitentes*. Las fallas abruptas ocurren instantáneamente a menudo como resultado del daño de hardware. Estas pueden ser muy graves, ya que si afectan el rendimiento y/o estabilidad del sistema controlado, se requiere una reacción rápida del sistema FTC. Las fallas incipientes representan cambios paramétricos lentos, a menudo como resultado del envejecimiento. Estas son más difíciles de detectar debido a sus características lentas en el tiempo, aunque son menos severas. Finalmente, las fallas intermitentes son fallas que aparecen y desaparecen repetidamente, por ejemplo debido a un cableado parcialmente dañado.

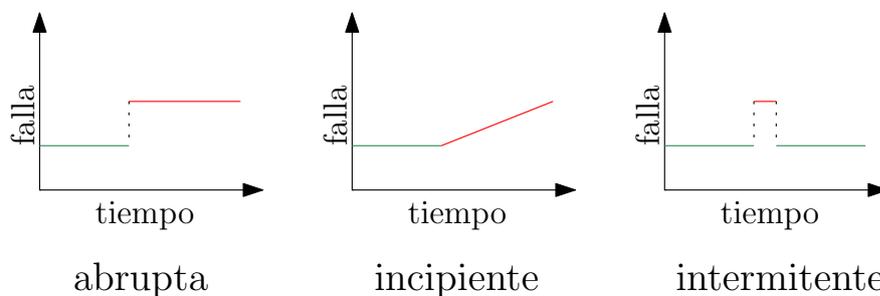


Figura 1.6: De acuerdo a sus características en el tiempo, las fallas pueden ser abruptas, incipientes e intermitentes.

1.2.7. Estado del arte del diagnóstico de fallas en sistemas hidráulicos

- En el trabajo de Lakhmani et al. (2016) se presenta un estimador de parámetros con ventana móvil con el fin de identificar fugas en tanques. El estimador con ventana móvil utiliza el filtro extendido de Kalman para la estimación de estados y parámetros que representan a las fugas. La efectividad de este esquema es demostrado mediante simulación para el sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000) y también para una planta experimental. La eficacia del estimador con ventana móvil se compara con el filtro de Kalman extendido aumentado, en el cual el primero demostró tener un mejor rendimiento, y además que es más fácil de sintonizar.
- En el trabajo de Prajapati y Roy (2016) se presenta el diagnóstico múltiple de fallas para el sistema de tres tanques, utilizando un banco de observadores de entrada desconocida (UIO). Cada UIO genera residuos que son insensibles a una sola falla y sensible al resto de ellas. Para el diagnóstico de fallas en actuadores y sensores se asume que las fallas en ambos no ocurren simultáneamente. La mayor ventaja del esquema propuesto es permitir aislar más de una falla (en sensor o actuador) al mismo tiempo. El efecto de las entradas desconocidas (perturbaciones) son desacopladas de los residuales mediante el UIO evitando que se generen falsas alarmas. El método UIO permite fácilmente aislar los componentes fallidos en el sistema.
- En el trabajo de Nagarajan et al. (2016) se realiza la detección y aislamiento de fallas en sensores para el sistema hidráulico de tres tanques, mediante el uso de redes neuronales como estimadores de estado. El aislamiento de la falla se logra con un enfoque similar al esquema de observadores dedicados (DOS³). Este esquema se basa en la estimación de todos los estados a partir de medir un solo estado. Se diseñaron tres redes neuronales que fueron entrenadas mediante el algoritmo de retropropagación en base a datos de la planta en condiciones de operación normal. El entrenamiento se realizó fuera de línea. El enfoque propuesto logra detectar y aislar correctamente las fallas en cada uno de los sensores. Cabe mencionar, que las pruebas se realizaron en lazo cerrado, con un controlador basado en realimentación de estados incluyendo acción integral para eliminar el error estacionario.
- En el trabajo de Tahraoui et al. (2015) se enfoca el problema de diagnóstico de fallas robusto en actuadores para un sistema de red de agua representada por un sistema de cuatro tanques, en presencia de entradas desconocidas (perturbaciones) y ruido en las mediciones. La detección de fallas se lleva a cabo mediante la generación de residuos utilizando un observador de entradas desconocidas (UIO). El aislamiento se realiza generando un conjunto de residuos, los cuales son insensibles a una determinada falla pero sensible a otra. La ventaja del método es el tener en cuenta perturbaciones en el sistema (flujos intermitentes de agua que ingresan a los tanques), las cuales son desacopladas mediante la técnica UIO, es decir, que dichas perturbaciones no generan falsas alarmas en el sistema, las cuales solo se activan en caso de fallas.

³Por sus siglas en inglés, *Dedicated Observer Scheme*

- En el trabajo de Gharaee y Shoorehdeli (2015) se presenta la detección y el aislamiento de fallas para el sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000) mediante simulación. Las fallas en este caso son fugas en los fondos de los tanques, las cuales provocan la salida indeseada de flujo, disminuyendo así el nivel de líquido en los tanques. La estrategia se basa en el diseño de un observador de Luenberger el cual es diseñado mediante ubicación de polos usando desigualdades de matrices lineales (LMI⁴). Dos residuos son formulados basados en la estimación del error para detectar y aislar fallas en el sistema. Los residuos son la diferencia en los niveles de los tanques que ganan mayor influencia en las fallas. Además, se consideran cuatro casos diferentes, cada uno con diferentes números de fallas que ocurren en el sistema. Para cada caso se logró detectar y aislar la falla, como también estimar el tiempo en que ocurrió la falla.
- En el trabajo de (Maalej et al., 2014) se realiza la estimación de estado y falla (en actuador) mediante el uso del observador de Kalman de estado aumentado difuso (FASKO⁵), esto para el sistema no lineal de tres tanques, y es comparado con el observador de Kalman de estado aumentado (ASKO⁶). La metodología se basa en que el sistema no lineal es representado mediante el método de inferencia de Takagi-Sugeno, el cual utiliza modelos lineales obtenidos mediante linearización en diferentes puntos de operación. Luego, el FASKO se encarga de estimar los estados de este modelo de Takagi-Sugeno. Por lo tanto, se combina el filtro de Kalman estándar con cada modelo lineal local. Tanto el FASKO como el ASKO logran estimar los estados y las fallas. Sin embargo, el FASKO tiene la ventaja con respecto al ASKO de converger más rápidamente y ser menos sensible al ruido.
- En el trabajo de Sobhani y Poshtan (2012) se presenta la detección y aislamiento de fallas usando observadores de entrada desconocida para la generación de residuos, esto para el sistema de tres tanques. Un banco de UIO fue usado para generar residuos estructurados para el aislamiento de fallas. Como las fallas en sensores y actuadores del mismo tanque no pueden ser distinguidas, un UIO adicional se añade al banco tal que ambos actuadores fueran sus entradas desconocidas, y por lo tanto este observador sirve para determinar si un sensor ha fallado o no. Los escenarios de fallas estudiados (en los cuales se probó el esquema propuesto) fueron: deterioro o pérdida de efectividad en la ganancia del actuador y sensor, así como sesgo (*bias*) en el sensor. La desventaja del método es no permitir aislar fallas simultáneas.
- En el trabajo de Kousar et al. (2012) se presenta una metodología para la detección de fallas en sensores para un sistema de tres tanques acoplados verticales, la cual es simulada y también implementada en una planta piloto de laboratorio, obteniendo resultados exitosos. El esquema propuesto hace uso de un observador de Luenberger para la generación de residuos, y la evaluación de los residuos se basa en la norma. En este caso se utiliza el valor cuadrático medio (RMS⁷). Utilizando el RMS se calculan los umbrales cuando

⁴Por sus siglas en inglés, *Linear matrix inequality*

⁵Por sus siglas en inglés, *Fuzzy Augmented State Kalman Observer*

⁶Por sus siglas en inglés, *Augmented State Kalman Observer*

⁷Por sus siglas en inglés, *Root mean square*

el sistema no tiene falla (en presencia de ruido en la medición). Finalmente se establece la lógica, que cuando se sobrepasa el umbral, se detecta la falla. El esquema de detección de fallas se diseñó en base al modelo linealizado del sistema y fue implementado exitosamente en la planta real.

- En el trabajo de Zarei y Poshtan (2010) se realiza la detección de fallas en sensores para un reactor de tanque agitado continuo (CSTR⁸) altamente no lineal. La metodología empleada es diseñar un observador de entrada desconocida no lineal (NUIO⁹) y generar residuos que sean robustos a las incertidumbres del modelo o perturbaciones, para esto primero se hace una extensión del UIO (lineal) para sistemas no lineales y luego empleando la transformación *unscented*¹⁰ se calcula la ganancia del observador. Este enfoque es similar al filtro de Kalman *Unscented* (UKF¹¹). Este método se comparó con el observador de entrada desconocida extendido (EUIO¹²), el cual está basado en la linealización del modelo no lineal de la planta y en el cálculo del jacobiano, similar al EKF. Se demostró que el NUIO genera mejores residuos que el EUIO.
- En el trabajo de Kamel et al. (2009) se presenta un esquema de detección y aislamiento de fallas para la clase de sistemas no lineales de Lipschitz con entradas desconocidas para un sistema de cuatro tanques. Se diseña un observador de entradas desconocidas bajo el enfoque de desigualdades de matrices lineales (LMI) para detectar, aislar y estimar las fallas. Basado en el diseño del UIO, dos enfoques son utilizados para la detección y aislamiento de fallas. El primero es para detectar y aislar fallas en actuadores y el segundo es para detectar y estimar fallas aditivas.
- En el trabajo de Said y M'Sahli (2008) se diseñan diferentes tipos de observadores no lineales para el sistema de cuatro tanques interconectados. El objetivo es la estimación de los niveles de líquido de los tanques superiores a partir de las mediciones de los niveles de los tanques inferiores. Los observadores que se estudiaron fueron tres, el filtro de Kalman extendido (EKF¹³), EKF con alta ganancia (HG-EKF¹⁴) y un observador de alta ganancia (HGO¹⁵). Entre estos observadores no lineales, se compararon la calidad de reconstrucción de los estados frente a ruido y perturbaciones. Las simulaciones demostraron que el algoritmo EKF no garantiza la convergencia del error de estimación en presencia de perturbaciones, mientras que los otros dos métodos sí alcanzan converger exponencialmente. Aunque el observador de alta ganancia presenta un mejor rendimiento en la estimación, es más sensible al ruido. Por lo tanto, existe un compromiso entre un buen seguimiento de los estados y el rechazo al ruido. El HG-EKF combina las propiedades de convergencia del observador de alta ganancia con el algoritmo de optimalidad del EKF, el cual le da un aspecto adaptativo a la reconstrucción del estado y una convergen-

⁸Por sus siglas en inglés, *Continuous Stirred Tank Reactor*

⁹Por sus siglas en inglés, *Nonlinear Unknown Input Observer*

¹⁰El término *unscented* no tiene una traducción conocida en español

¹¹Por sus siglas en inglés, *Unscented Kalman Filter*

¹²Por sus siglas en inglés, *Extended Unknown Input Observer*

¹³Por sus siglas en inglés, *Extended Filter Kalman*

¹⁴Por sus siglas en inglés, *High gain-extended filter Kalman*

¹⁵Por sus siglas en inglés, *High Gain Observer*

cia global al error de estimación. La desventaja del HG-EKF es debido a que no puede aplicarse a sistemas rápidos debido al alto costo computacional en línea que requiere el algoritmo.

- En el trabajo de Rodrigues et al. (2008) se desarrolla un esquema de detección y aislamiento de fallas utilizando múltiples modelos de operación que describen la dinámica de la planta, es decir, trabajan con múltiples modelos obtenidos a partir de linealizar la planta alrededor de varios puntos de operación. La generación de residuos se realiza mediante un banco de filtros de Kalman desacoplados. En base a estos residuos se generan funciones de ponderación que son robustas a las fallas. Estas funciones permiten reproducir el comportamiento dinámico en un amplio rango de operación tanto cuando no hay y si hay falla. Con esta representación multi-modelo se diseña un filtro adaptativo para detectar, aislar y estimar fallas. Para garantizar la estabilidad del filtro adaptativo, se realizó un análisis de estabilidad mediante el uso de desigualdades de matrices lineales (LMI). La metodología propuesta demostró su eficacia en un sistema hidráulico de tres tanques utilizado en plantas de tratamiento de agua y procesamiento de minerales que trabajan en múltiples regímenes de operación.
- En el trabajo de Anzures-Marin et al. (2008) se lleva a cabo la detección y aislamiento de fallas (FDI) en sensores para un sistema hidráulico de dos tanques, mediante observadores de entrada desconocida (UIO). El algoritmo propuesto fue probado tanto en simulación como en tiempo real en una planta de laboratorio, brindando resultados exitosos. El uso de observadores UIO permite que el esquema FDI sea robusto al ruido y al error de modelado. El aislamiento de fallas se realizó mediante un banco de observadores UIO.
- En el trabajo de Korbicz y Witczak (2007) se realiza la detección y aislamiento de fallas para un sistema de dos tanques (no lineal), los cuales están interconectados a través de una tubería. Para la generación de residuos utilizan el observador de entrada desconocida extendido (EUIO), cuya estructura es similar al EKF. Con el EUIO se logró aislar los diferentes tipos de fallas: en el actuador (pérdida de efectividad de la bomba), en los sensores y en el proceso (fuga en un tanque y taponamiento de la tubería que conecta los tanques). El enfoque es similar al UIO, es decir, el residuo es insensible a una falla en particular pero sensible a todas las demás. La ventaja de este método es que puede aplicarse a plantas no lineales, además su algoritmo no es tan complicado como otros observadores no lineales.
- En el trabajo de Sotomayor y Odloak (2005) se presenta el estudio y la aplicación de la metodología de observadores de entrada desconocida (UIO) para el diagnóstico de fallas en línea de fallas en actuadores, sensores, parámetros del modelo y perturbaciones de plantas químicas complejas como son plantas de polimerización y de craqueo catalítico fluidizado, las cuales operan con un controlador predictivo basado en modelo. Para la primera se diseñó un UIO de orden reducido y para la segunda se utilizó un UIO de orden completo. Los residuos son calculados mediante un promedio acumulativo del residual con factores de ponderación y de olvido exponencial. El aislamiento de fallas se realiza

mediante un banco de observadores UIO, bajo el esquema de observador generalizados (GOS¹⁶). También, mediante el UIO se logra estimar la magnitud de las fallas.

1.2.8. Conclusiones parciales del diagnóstico de fallas

Según las investigaciones publicadas, uno de los sistemas experimentales más populares en laboratorios de control es el sistema de dos, tres y cuatro tanques, el cual sirve para investigar diferentes técnicas de diagnóstico de fallas, así como, control multivariable y no lineal. Como se puede observar en la literatura, el diagnóstico de fallas ha sido principalmente desarrollado en el sistema de tres tanques.

Es importante resaltar el interés que tienen los observadores de entrada desconocida (UIO) para la detección y aislamiento de fallas (FDI) robustos frente a perturbaciones e incertidumbres del modelo. Con este observador se generan residuos que son insensibles a las perturbaciones desconocidas pero sensible a las fallas; por lo tanto, no se generan falsas alarmas. Igualmente, el UIO es útil para aislar fallas, ya que si estas se tratan como perturbaciones, se pueden desacoplar entre sí.

Otra ventaja importante del UIO es debido a que permite estimar la magnitud de las fallas, el cual es un paso necesario para el diseño del sistema de control tolerante a fallas.

Las principales fallas que se reportan para sistemas de tanques son en sensores, seguidas de fallas en actuadores (bombas, válvulas de control, etc.) y en el proceso (fugas, taponamiento, etc.). Los métodos de diagnóstico de fallas generalmente son aplicados para algún tipo de falla en específico. Por lo tanto, se deben combinar diferentes estrategias si se quiere diagnosticar fallas de manera global.

1.3. Control tolerante a fallas

1.3.1. Generalidades

Las primeras investigaciones en los sistemas de control tolerante a fallas se desarrollaron en los años 1980 (Mahmoud y Xia, 2013), impulsado por la industria aeroespacial. Actualmente, el control tolerante a fallas sigue atrayendo cada vez más la atención de la comunidad industrial y académica, esto debido a las demandas crecientes por seguridad, alto rendimiento de los sistemas, productividad y eficiencia operativa en un amplio rango de aplicaciones de ingeniería, y no solo limitado a sistemas tradicionales de seguridad crítica (aviones, trenes, vehículos, la red, plantas de energía nuclear, plantas químicas, etc.).

1.3.2. Clasificación del control tolerante a fallas

De manera general, los sistemas de control tolerante a fallas se clasifican en dos tipos: *pasivo* y *activo*.

- **Control tolerante a fallas pasivo (PFTC¹⁷):** se basa solo en el uso de un controlador robusto, en donde las fallas son consideradas como incertidumbres dentro del sistema de

¹⁶Por sus siglas en inglés, *Generalized Observer Scheme*

¹⁷Por sus siglas en inglés, *Passive Fault Tolerant Control*

lazo cerrado. En este caso, el controlador se mantiene fijo y no se reconfigura en caso de una falla. El método pasivo por lo tanto no requiere información en línea de la presencia de una falla (FDD).

- **Control tolerante a fallas activo (AFTC¹⁸):** consiste en el diagnóstico en línea de la falla (FDD), es decir, detectar, localizar e identificar la falla (estimar el tamaño y el tiempo en que ocurrió), y a partir de dicha información, activar algún mecanismo de reconfiguración del control (ver Fig. 1.7). Es también llamado detección, identificación y acomodación de fallas.

1.3.3. Métodos de control tolerante a fallas

De acuerdo a Patton (2015), los sistemas de control tolerante a fallas activos pueden subdividirse en: *reconfiguración del control*, *estimación y compensación*, y *control adaptativo* (como se muestra en Fig. 1.8).

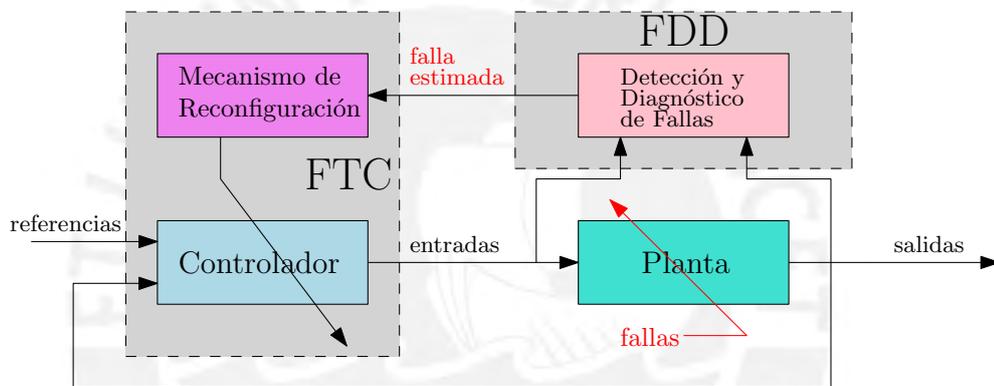


Figura 1.7: Descripción de un control tolerante a fallas activo.

- **Reconfiguración del control:** se divide en dos métodos: *basados en proyección* y *basados en el rediseño del controlador en línea*. Este último involucra el cálculo en línea de los nuevos parámetros del controlador o recalculando tanto la estructura o parámetros del controlador. Por otro lado, los métodos basados en proyección seleccionan un controlador a partir de un conjunto de controladores prediseñados fuera de línea. Usualmente cada controlador es diseñado para una falla particular, y por lo tanto, se activa cuando el sistema de diagnóstico (FDD) detecta dicha falla.
- **Estimación y compensación:** utilizando la información de la falla obtenida del sistema FDD, una señal de control de compensación de la falla se adiciona con la señal de control enviada por el controlador nominal, el cual ha sido diseñado para la condición sin falla. En la presente tesis se desarrolla este método.
- **Control adaptativo:** el controlador adaptativo tradicional adapta automáticamente los parámetros del controlador a los cambios en la dinámica del sistema. Este método es adecuado para control tolerante a fallas en plantas cuya variación de parámetros es lenta,

¹⁸Por sus siglas en inglés, *Active Fault Tolerant Control*

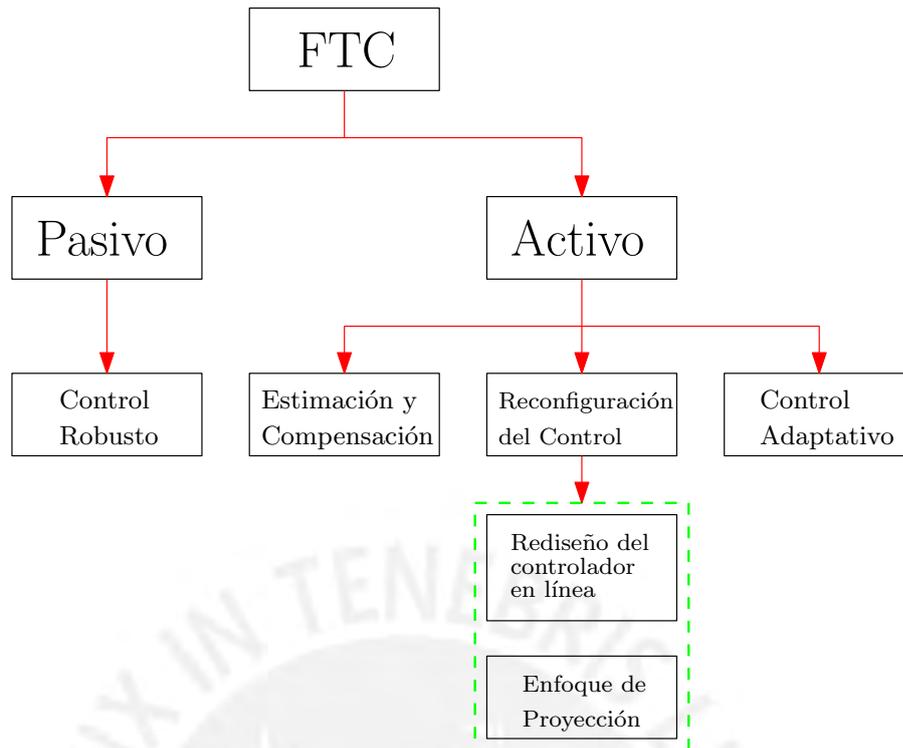


Figura 1.8: Métodos de control tolerante a fallas activo (Patton, 2015).

y que pueden tolerar fallas de actuadores y de componentes. Fallas de sensores no pueden ser toleradas, pues el controlador adapta sus parámetros de acuerdo a las mediciones de la planta, si estas son erróneas, el sistema en lazo cerrado no trabajará correctamente.

1.3.4. Estado del arte del control tolerante a fallas en sistemas hidráulicos

- En el trabajo de Luzar (2016) se presenta un esquema de diagnóstico y control tolerante a fallas en sensores para el sistema no lineal de dos tanques interconectados. Para el diagnóstico de fallas se diseña un observador de entradas desconocidas no lineal. La ganancia del observador se calcula resolviendo desigualdades de matrices lineales (LMI), que garantiza que el error de estimación converga asintóticamente. Con la estimación de estados del observador no lineal se generan residuos para detectar fallas. Para el aislamiento de fallas se diseñan dos observadores bajo el esquema de observadores dedicados (DOS¹⁹). El controlador nominal está basado en realimentación de estados. El esquema de control tolerante a fallas se basa en reemplazar las mediciones reales (en falla) por las estimaciones del observador. La verificación experimental confirma la alta eficiencia del enfoque propuesto.
- En el trabajo de Arıcı y Kara (2016) se presenta un esquema de control tolerante a fallas para el proceso de control de nivel de un tanque. El control tolerante a fallas consiste de un controlador adaptivo por modelo de referencia (MRAC²⁰). Este controlador es comparado con un controlador PI. Se modelan diferentes fallas que pueden ocurrir en

¹⁹Por sus siglas en inglés, *Dedicated Observer Scheme*

²⁰Por sus siglas en inglés, *Model Reference Adaptive Control*

el proceso y en el actuador, en este caso, una válvula de control. Como por ejemplo, pérdida de efectividad, válvula bloqueada, válvula abierta, congelamiento, desviación o sesgo, fugas, etc. Los resultados de simulación muestran que el controlador adaptativo puede compensar cualquier falla parcial independientemente de sus características en el tiempo, es decir, ya sea abrupta, intermitente o incipiente. En comparación con el controlador PI, la respuesta en lazo cerrado presenta un mejor comportamiento, además de un menor sobreimpulso.

- En el trabajo de Hameed et al. (2015) se presenta el diseño de un control reconfigurable de ocultación de fallas (*fault-hiding*) en actuadores y sensores, aplicado al sistema de cuatro tanques de Johansson (2000). Las fallas son modeladas como pérdidas drásticas en la ganancia de actuadores (bombas) y sensores (niveles). El sistema posee un controlador reconfigurable Proporcional Integral (PI) descentralizado. Esta estrategia está basada en la idea de colocar un bloque de reconfiguración entre el controlador nominal y la planta defectuosa (en falla). La ocultación de fallas hace uso de la diferencia entre el estado del sistema nominal y el sistema en falla (se debe conocer el modelo del sistema cuando hay falla). El bloque de reconfiguración oculta la falla del controlador y ayuda que el sistema defectuoso opere como si no hubiera falla, es decir, mantenga su comportamiento nominal. El bloque de reconfiguración contiene un sensor virtual y un actuador virtual. El sensor virtual es esencialmente un observador de estado de la planta defectuosa, y consiste del modelo de la planta defectuosa aumentado con el error de salida. El actuador virtual contiene un modelo de referencia para la planta nominal realimentado con la diferencia entre el estado de referencia y el estado observado, además de alimentarse de la señal de control. Los resultados de simulación muestran que el enfoque propuesto puede manejar diferentes tipos de fallas y que tiene la habilidad de recuperar instantáneamente el rendimiento del sistema original, después de la ocurrencia de fallas severas en actuadores, sensores y en ambos.
- En el trabajo de Buciakowski et al. (2014) se presenta un sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas para el sistema de cuatro tanques acoplados de Johansson (2000). El principal aporte de este artículo es el integrar la estimación de fallas en actuadores (bombas) junto con el diseño de un controlador robusto. Por lo tanto, el esquema de control es una combinación de la compensación de la falla y un esquema de control robusto. La compensación de la falla se hace en base a la estimación de la falla, el cual tiene un enfoque similar al método basado en observadores de entrada desconocida (UIO). Se demuestra que el esquema de control propuesto brinda un mejor comportamiento del sistema en lazo cerrado que cuando solo es un controlador robusto, que no considera ninguna información de la falla. Las fallas en los actuadores son modeladas como una disminución en su rendimiento o pérdida de efectividad. También se analizó cuando la falla ocurre en ambos actuadores simultáneamente, brindando resultados favorables. La ganancia del controlador se calcula fuera de línea en base a la resolución de desigualdades de matrices lineales (LMI). Por lo tanto, esta estrategia solo necesita que se calcule en línea la estimación de la falla.

- En el trabajo de Indriawati et al. (2013) se presenta un control tolerante a fallas reconfigurable para el sistema de tres tanques, con fallas en sensores (niveles) y actuadores (bombas). El aporte de este trabajo es el considerar la presencia de ruido en las mediciones, por lo tanto, para el sistema de diagnóstico de fallas (FDI) utilizan un método estadístico basado en la modificación del diagrama de control de Shewhart, del método de control estadísticos de procesos (SPC²¹). Este método permite minimizar la ocurrencia de falsas alarmas debido al ruido. Para la estimación de las fallas en actuadores y sensores construyen un banco de observadores basado en un sistema aumentado, el cual incluye como vector de estado a la falla. La estimación de la falla en el actuador se realiza utilizando la técnica de descomposición en valores singulares (SVD²²) presentada en Noura et al. (2009). Para la estimación de la falla en el sensor asumen que la falla permanecerá en el tiempo y no se recuperará, por lo tanto es igual a la diferencia entre el valor real y la estimación del observador. El mecanismo de reconfiguración consiste en recalcular la señal de control basado en el tipo de falla que ocurre. La nueva ley de control aplicada al sistema es dada por la señal de control que envía el controlador nominal más la señales de control de compensación por fallas en los sensores y actuadores. Las simulaciones demuestran que el esquema de reconfiguración de control presenta un mejor desempeño en lazo cerrado que el controlador nominal, con una mayor rapidez de convergencia y menores sobreimpulsos en la respuesta del sistema. Estos resultados fueron cuantificados utilizando la integral del error absoluto (IAE²³). Los resultados de la simulación comprueban que el sistema de control desarrollado tiene la habilidad de compensar más de una falla, sin importar cual ocurre primera (sensor o actuador).
- En el trabajo de Mendonça et al. (2012) se presenta un control tolerante a fallas (FTC) usando el enfoque de control predictivo difuso multimodelo para el sistema de tres tanques. El esquema FTC se basa en dos pasos: detección y aislamiento de la falla (FDI) y la acomodación de la falla. La acomodación de fallas adapta los parámetros del controlador de acuerdo a la dinámica de la planta con falla. El método se basa en el prediseño de controladores, cada uno de ellos seleccionado fuera de línea para cada falla en específica. La detección de fallas se realiza mediante un enfoque basado en modelos, específicamente utilizando observadores para generar residuos. El observador se construye a partir del modelo del proceso en operación normal. Cuando el residuo es mayor que un determinado umbral, el sistema detecta fallas. Seguidamente, se activa un banco de observadores, contruidos a partir del modelo para cada falla, y se calcula un vector de residuos. El aislamiento de la falla utiliza un enfoque de toma de decisión basada en lógica difusa. La información obtenida en el FDI es usado para seleccionar el modelo para la acomodación de la falla, que utiliza un controlador predictivo difuso. Este controlador le agrega flexibilidad al controlador predictivo (MPC²⁴) utilizando conjuntos difusos en la función objetivo. Las fallas que se simularon fueron fugas en los tanques. El rendimiento del control es medido mediante la suma de los cuadrados del error normalizados.

²¹Por sus siglas en inglés, *Statistical Process Control*

²²Por sus siglas en inglés, *Singular Value Decomposition*

²³Por sus siglas en inglés, *Integral Absolute Error*

²⁴Por sus siglas en inglés, *Model Predictive Control*

- En el trabajo de Hajiani y Poshtan (2011) se presenta un sistema de control de seguimiento tolerante a fallas en los actuadores para el sistema de cuatro tanques de Johansson (2000). Con la ecuación en espacio de estado del sistema, las fallas en los actuadores (bombas) son modeladas como cambios en la matriz de entrada B y la matriz A se asume como constante. Para la detección y evaluación de las fallas (cambios en los parámetros de la matriz B) se utiliza un método de estimación de parámetros en línea, utilizando el algoritmo de mínimo cuadrados recursivos. Usando el método de Ackerman, se calcula la ganancia del controlador por realimentación de estado. Para la reconfiguración del controlador la matriz de ganancia es calculada en línea basada en los valores en tiempo real de la matriz de entrada. El método propuesto tiene la desventaja de ser sensible al ruido en comparación con otros métodos basado en modelos. Sin embargo, tiene la gran ventaja de detectar fallas multiplicativas en el sistema.
- En el trabajo de Khedher et al. (2011) se diseña un controlador tolerante a fallas activo para el sistema de tres tanques, el cual es modelado como un sistema de Takagi-Sugeno, utilizando modelos lineales del sistemas alrededor de varios puntos de operación. Se construye un modelo aumentado con el fin de poder estimar las fallas y variables de estado. Para esto, se necesita conocer el modelo de la planta con falla. Con el modelo aumentado se diseña un observador proporcional integral, el cual tiene la ventaja de ser robusto con respecto a incertidumbres y perturbaciones del sistema. El controlador tolerante es implementado como un controlador basado en realimentación de estados, el cual se diseña tal que estabiliza la planta con falla utilizando la teoría de Lyapunov y LMI. La principal contribución de este trabajo es que toma en cuenta funciones de ponderación para el controlador tolerante. Las fallas que se consideran son fugas en los tanques.
- En el trabajo de Casavola et al. (2010) se presenta un esquema de supervisión en tiempo real tolerante a fallas para un sistema de cuatro tanques interconectados, de diferente configuración a la Johansson (2000). La estrategia de control planteada consiste en agregar al sistema compensado primario un objeto no lineal denominado en la literatura como regulador de referencia (CG²⁵) cuya acción se basa en el estado actual, las referencias y las restricciones a las que se ve sometido el sistema, teniendo como finalidad permitir que el problema primario de control, opere linealmente en un rango dinámico de mayor amplitud al que sería posible operar sin la presencia del CG.
- En el trabajo de Orani et al. (2009) se presenta un observador el cual tiene un término correctivo basado en un algoritmo de control en modos deslizantes de segundo orden, que le permite una convergencia global. La ventaja del enfoque propuesto es el permitir, gracias al observador global, la reconstrucción de fallas y/o perturbaciones se pueden llevar a cabo sin necesidad de filtrar. Este método permite la detección, aislamiento y reconstrucción de fallas de actuadores (válvulas) para un sistema de tres tanques verticales. Además, el esquema presentado permite la estimación de perturbaciones en el sistema (fugas en la parte inferior de los tanques). Las simulaciones y los resultados

²⁵Por sus siglas en inglés, *Command Governor*

experimentales de la implementación en línea de este observador demuestran su efectividad. La reconstrucción de fallas y perturbaciones se realizó en lazo cerrado con un controlador PI. En el artículo se resalta que como trabajo futuro sería interesante implementar un mecanismo de acomodación de fallas en base a la reconstrucción de fallas y perturbaciones.

- En el trabajo de Theilliol et al. (2002) se lleva a cabo el diagnóstico y acomodación de fallas para el sistema hidráulico de tres tanques. Las fallas consideradas son en los sensores (*bias*) y actuadores (pérdida de efectividad en las bombas). Se utiliza el UIO para la generación de residuos y para la evaluación de estos se utiliza un método estadístico. Para la estimación de la falla se utilizan las variables de estado estimadas con el UIO y la descomposición en valores singulares. El mecanismo de acomodación (compensación) de fallas se basa en el cálculo de una señal de control adicional que se suma a la enviada por el controlador nominal, en este caso, un controlador basado en realimentación de estados, tal que la respuesta del sistema con falla es similar al caso nominal. Los resultados de la implementación de este método indican que las salidas del sistema compensado son cercanas al sistema nominal (cuando no hay falla) en comparación a las salidas del sistema con la ley de control clásica que no considera compensación de fallas. La desventaja de esta técnica es no tener la capacidad de compensar la pérdida total (falla total) del actuador.

1.3.5. Conclusiones parciales del control tolerante a fallas

En las últimas publicaciones se demuestra el interés de diseñar sistemas de control tolerante a fallas, principalmente los *activos*, que permiten que la planta mantenga su estabilidad y un desempeño aceptable incluso en presencia de alguna falla. Existe un amplio número de metodologías, muchas de ellas bastante complejas y específicas para un sistema y tipo de falla en particular. Un resumen de estos métodos se pueden encontrar en Puig et al. (2004); Zhang y Jiang (2008).

Para el diseño del sistema de control tolerante a fallas es necesario tener un sistema de diagnóstico de fallas, el cual no solo detecte y aisle la falla, sino que también estime la falla. Toda esta información de la falla permite que la estrategia de control se reconfigure; por ejemplo, cambio en los parámetros o estructura del controlador, o que se le adicione un término que compense a la falla, tal que el sistema de control mantenga el mismo desempeño de cuando no había falla. La reconfiguración se da principalmente para fallas en actuadores y en el proceso. Las fallas en actuadores son generalmente modeladas como una pérdida de efectividad (falla parcial), y las fallas en el proceso como fugas.

Las fallas en sensores generalmente se compensan reemplazando la medición real por su estimación mediante un observador o filtro de Kalman (y otros tipos de estimadores), siempre y cuando el sistema siga siendo observable.

1.4. Desempeño de los sistemas de control

1.4.1. Generalidades

Hay una serie de criterios por los cuales el rendimiento deseado de un sistema de lazo cerrado puede especificarse en el tiempo. Por ejemplo, se puede especificar que la respuesta de lazo cerrado no tenga sobreimpulso o error estacionario. En base a esto, se debe elegir el tipo de controlador y ajustar sus constantes de sintonización tal que cuando se conecte al proceso, se obtenga la respuesta de lazo cerrado deseada. Naturalmente, la especificación de control debe ser físicamente alcanzable. No se puede violar las restricciones en la variable manipulada, y no se puede requerir un controlador físicamente irrealizable (Luyben, 1990).

Existen varias especificaciones en el dominio del tiempo. Algunas de las más usadas se desarrollan a continuación.

1.4.2. Especificaciones de la respuesta en el tiempo

En muchos casos prácticos, las características de desempeño deseadas del sistema de control se especifican en base a su respuesta en el tiempo para un cambio tipo escalón en el punto de consigna (*setpoint*). La respuesta en el tiempo de los sistemas de control está compuesta de dos partes: la respuesta transitoria y la respuesta estacionaria. La *respuesta transitoria* es la respuesta que desaparece con el tiempo. La *respuesta estacionaria* es la respuesta que existe durante mucho tiempo siguiendo a cualquier iniciación de señal de entrada (Dorf et al., 2005).

La respuesta transitoria de un sistema de control práctico muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario. Al especificar las características de un sistema de control para una entrada escalón, es común especificar lo siguiente (Ogata, 1998):

- **Tiempo de subida o crecimiento** (T_r): es el tiempo requerido para que la respuesta crezca del 0 al 100 % o del 10 % al 90 % de su valor final (valor estacionario).
- **Tiempo de retardo** (T_d): es el tiempo requerido para que la respuesta aparezca a la salida del sistema, luego de aplicado un estímulo a su entrada.
- **Sobreimpulso** (M_p): es el valor pico máximo de la curva de respuesta medido desde el valor estacionario de la respuesta escalón.

$$M_p = y_{max} - y_{es}$$

donde y_{max} es el valor máximo de $y(t)$ y y_{es} es el valor estacionario de $y(t)$.

Usualmente el sobreimpulso es representado en porcentaje del valor estacionario de la respuesta:

$$m_p = \frac{y_{max} - y_{es}}{y_{es}} \times 100 \%$$

- **Tiempo de establecimiento o asentamiento** (T_{es}): es el tiempo requerido para que la respuesta alcance y permanezca dentro de un determinado rango alrededor de su valor

final. La dimensión de este rango se especifica en porcentaje absoluto del valor estacionario ($p = 2\%$ o 5%).

- **Error estacionario** (e_{es}): es la diferencia entre el valor de la respuesta deseada y el valor estacionario:

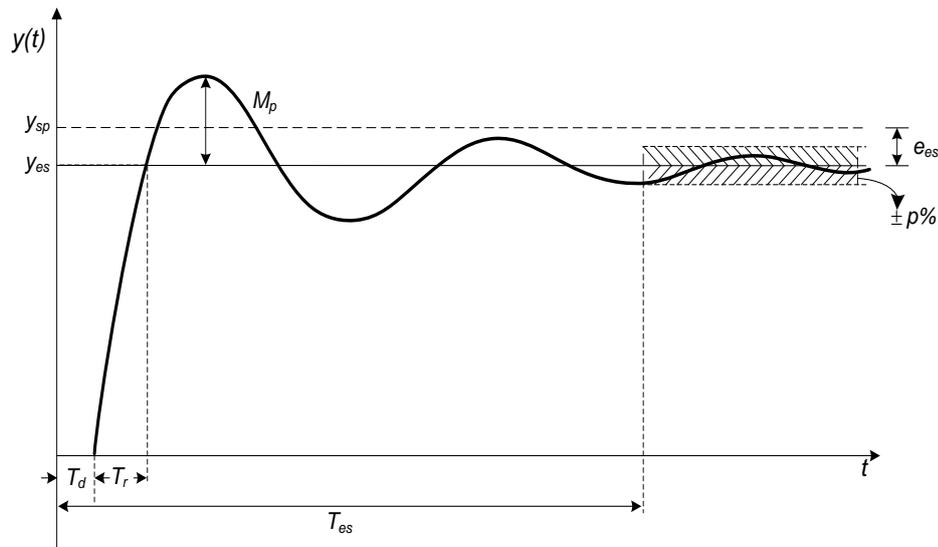
$$e_{es} = y_{sp} - y_{es}$$

donde y_{sp} es el valor deseado de $y(t)$ y y_{es} es el valor estacionario de $y(t)$.

e.

La

5.1 Respuesta en el Tiempo



3

Figura 1.9: Especificaciones de la respuesta transitoria.

1.4.3. Índices de desempeño

Un índice de desempeño es una medida cuantitativa del comportamiento de un sistema y se elige de forma que se resalte las especificaciones importantes del sistema (Dorf et al., 2005). Un sistema se considera *sistema de control óptimo* cuando sus parámetros se ajustan de forma que el índice alcanza un valor extremo, comúnmente un valor mínimo. Generalmente estos índices son valores positivos.

Los índices de desempeño han sido usados extensamente en la sintonización de controladores. Por ejemplo, la integral del cuadrado del error (ISE²⁶). Otro índice basado en el error es la integral del valor absoluto del error (IAE²⁷). La diferencia entre el IAE y el ISE, consiste en que con el ISE se le da más peso a los errores grandes, los cuales se presentan generalmente al inicio de la respuesta, y menos peso para errores pequeños, los cuales ocurren hacia el final de la respuesta. En muchas aplicaciones el índice de desempeño debe contener una penalización al tiempo transcurrido desde el inicio de la respuesta, para estos casos se usa el criterio ITSE (ITSE²⁸) (Smith y Corripio, 2006).

²⁶Por sus siglas en inglés, *Integral Squared Error*

²⁷Por sus siglas en inglés, *Integral Absolute Error*

²⁸Por sus siglas en inglés, *Integral Time Squared Error*

Una medida que determina la energía empleada por el controlador (esfuerzo de control) viene representada por la integral del cuadrado de las desviaciones de la señal de control en el estado estacionario (ISU²⁹). La evolución a la salida del controlador vendrá expresada por el valor absoluto de las variaciones totales (TVU³⁰), la cual es equivalente a la integral del valor absoluto de la derivada de control (IADU³¹) (Rodríguez-Mariano et al., 2015). Los índices de desempeño se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Índices de desempeño para controladores.

Indicador	Expresión	Característica
<i>ISE</i>	$\sum_{k=1}^N e(k)^2$	Integral del error cuadrático
<i>ITSE</i>	$\sum_{k=0}^N ke(k)^2$	Integral del tiempo por el error cuadrático
<i>IAE</i>	$\sum_{k=1}^N r_k - y_k $	Integral del valor absoluto del error
<i>ISU</i>	$\sum_{k=0}^N (u(k) - u_{ss})^2$	Integral de la salida de control cuadrática
<i>TVU</i>	$\sum_{k=1}^N u_k - u_{k-1} $	Integral de la variación total del control

Igualmente, existen índices que evalúan el desempeño de un método de diagnóstico de fallas (FDI/FDD) para determinar si es adecuado para una aplicación práctica (ver Tabla 1.2). Un buen desempeño del método FDI/FDD debería detectar y aislar fallas tan pronto como sea posible. Además, considerando la acción futura del FTC, el diseño del FE debe ser tal que proporciona información precisa de la falla para el mecanismo de reconfiguración. Más índices de desempeño para la evaluación de métodos de diagnóstico de fallas pueden encontrarse en Sun (2013).

1.5. Objetivos de la tesis

1.5.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es desarrollar un sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas parciales en actuadores (llamadas *pérdida de efectividad*) para el proceso hidráulico de

²⁹Por sus siglas en inglés, *Integral Square Signal Control Deviation*

³⁰Por sus siglas en inglés, *Control Signal Total Variation*

³¹Por sus siglas en inglés, *Integral Absolute Derivative Control*

Tabla 1.2: Índices de desempeño para métodos de diagnóstico de fallas

Indicador	Definición
Tiempo de detección de falla (FDT)	El intervalo de tiempo entre el instante en el cual ocurre una falla y el instante de tiempo en el cual es declarada como detectada.
Tiempo de aislamiento de falla (FIT)	El intervalo de tiempo entre el instante en el cual ocurre una falla y el instante de tiempo en el cual es declarada como aislada.

cuatro tanques acoplados, con el fin de lograr un funcionamiento deseado del proceso aun en presencia de estas fallas.

1.5.2. Objetivos específicos

Para poder realizar este objetivo es necesario llevar a cabo los siguientes trabajos de investigación y desarrollo:

- Estudio del estado de arte de métodos de diagnóstico y control tolerante a fallas en sistemas de tanques.
- Desarrollo del modelo matemático del proceso de cuatro tanques acoplados.
- Diseñar un sistema de control para el control de nivel de los tanques: a) basado en realimentación de estados con acción integral, y b) basado en matriz dinámica.
- Diseñar un sistema de diagnóstico de fallas basado en modelo empleando la técnica de *observador de entrada desconocida*.
- Diseñar el mecanismo de acomodación de fallas en actuadores basado en la técnica de *compensación aditiva de fallas*.
- Comparar el desempeño del sistema de control tolerante a fallas con el sistema de control sin compensación de fallas.
- Desarrollar una propuesta de implementación del método de diagnóstico y control tolerante a fallas en la planta piloto de cuatro tanques acoplados del laboratorio de Control Avanzado del Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

CAPÍTULO 2. MODELADO Y CONTROL DEL PROCESO HIDRÁULICO DE CUATRO TANQUES ACOPLADOS

2.1. Introducción

En este capítulo se obtiene el modelo matemático del proceso hidráulico de cuatro tanques a partir de las ecuaciones de balance de masa y Bernoulli. Luego, se presenta el algoritmo de control para dos tipos de controladores: control por realimentación de estados y control DMC. Después, ambos controladores son diseñados y simulados para evaluar su desempeño. Finalmente, se modelan las fallas parciales (pérdida de efectividad) en los actuadores y se obtiene el modelo del sistema con falla.

2.2. Proceso hidráulico de cuatro tanques acoplados

La mayoría de los procesos industriales son no lineales, tienen múltiples entradas y salidas, con fuertes interacciones entre las variables manipuladas y controladas. Estas interacciones hacen del sistema de cuatro tanques un buen ejemplo para demostrar diferentes estrategias de control, principalmente en el área de control multivariable y control no lineal. Igualmente, según se reporta en las últimas publicaciones, este sistema también es atractivo para ensayar distintas estrategias de detección y aislamiento de fallas, así como en el control tolerante a fallas. El sistema *benchmark* de cuatro tanques de Johansson (2000) consiste de cuatro tanques de agua interconectados y de dos bombas. En la Fig. 2.1 se muestra el modelo físico creado en el Instituto Tecnológico de Lund, donde se aprecia el sistema de tanques y el computador con el programa utilizado para el control del proceso. La altura de cada tanque es de 20 cm, y la capacidad de las bombas es de 2.5 l/min.

El diagrama esquemático del sistema de cuatro tanques se muestra en la Fig. 2.2. Las entradas del proceso (variables manipuladas) son los voltajes que se aplican a los variadores de velocidad que a su vez controlan las bombas hidráulicas, modificando el flujo de agua que ingresan en los tanques. El rango del voltaje de entrada es 0 – 10 V. Las salidas del proceso son los niveles de los tanques los cuales son medidos por los sensores de nivel. El principal propósito del sistema de cuatro tanques es controlar el nivel de líquido de los dos tanques inferiores (variables controladas).

La salida de cada bomba es dividida en dos corrientes usando una válvula de tres vías. La bomba 1 es compartida por el tanque 1 y 4, mientras que la bomba 2 es compartida por el tanque 2 y 3. Por lo tanto, cada salida de la bomba va hacia dos tanques, uno inferior y otro superior

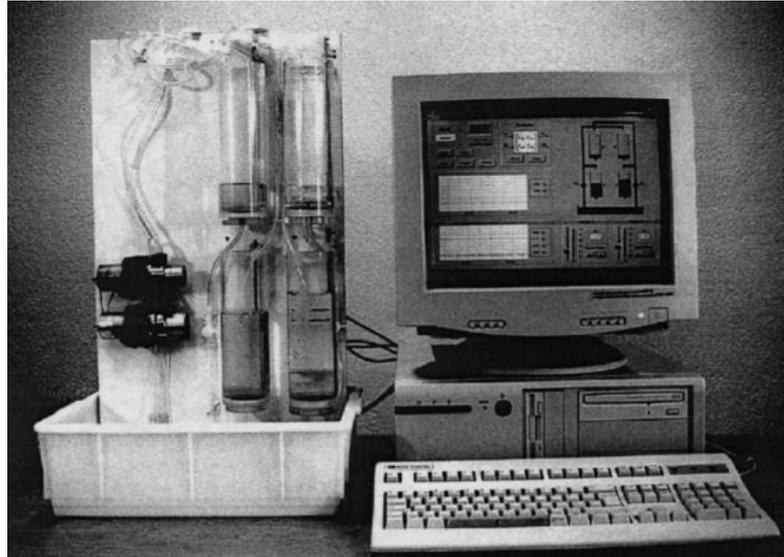


Figura 2.1: Modelo físico del sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000).

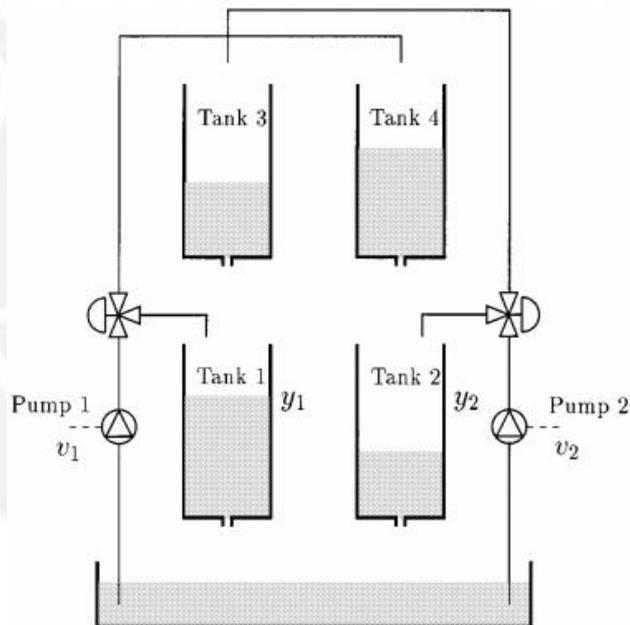


Figura 2.2: Diagrama esquemático del sistema de cuatro tanques (Johansson, 2000).

diagonal a éste. El flujo de estos tanques son controlados por la posición de las válvulas de tres vías representado como γ_i ($i = 1, 2$). La posición de las dos válvulas determinan si el sistema esta en fase mínima o en fase no mínima. El parámetro γ_i se determina a partir de la configuración de las válvulas.

Cada tanque tiene una válvula de descarga en el fondo. La descarga del tanque 3 se va hacia el tanque 1, mientras que la descarga del tanque 4 va hacia el tanque 2. Esta interacción crea un fuerte acoplamiento entre los tanques convirtiéndolo en un sistema de control multivariable. La descarga de los tanques 1 y 2 van hacia el tanque reservorio en el fondo.

2.3. Desarrollo del modelo

2.3.1. Generalidades

El modelamiento de un proceso es necesario para investigar como el comportamiento de un proceso cambia con el tiempo bajo la influencia de cambios en las perturbaciones externas y variables manipuladas, y en consecuencia diseñar un controlador apropiadamente (Jayaprakash y Kumar, 2014). Básicamente existen dos enfoques, uno teórico y otro experimental. El modelo teórico está basado en las leyes físico-químicas del proceso, como los balances de materia y energía. El otro enfoque es desarrollar un modelo matemático utilizando métodos estadísticos a partir de datos experimentales, conocido como *identificación de sistemas* (Ljung, 1999).

A continuación, derivamos el modelo matemático para el sistema de cuatro tanques basado en las leyes físico-químicas del proceso. Para cada tanque $i = 1 \dots 4$, el modelamiento matemático se realiza considerando la ecuación de balance de masa y la ley de Bernoulli. La ecuación de balance de masa o también llamada ley de conservación de masa viene dado por:

$$\begin{array}{r} \text{Tasa de acumulación} \\ \text{de masa en el sistema} \end{array} = \begin{array}{r} \text{Flujo de masa} \\ \text{de entrada al sistema} \end{array} - \begin{array}{r} \text{Flujo de masa} \\ \text{de salida del sistema} \end{array} \quad (2.1)$$

Antes de derivar las ecuaciones matemáticas del sistema, se considera lo siguiente:

- La entrada a la bomba 1 es v_1 y para la bomba 2 es v_2 .
- Las posiciones de las válvulas son $\gamma_1, \gamma_2 \in [0, 1]$.
- El flujo a través de la bomba 1 cuando se le aplica un voltaje v_1 es k_1v_1 y para la bomba 2 cuando se le aplica un voltaje v_2 es k_2v_2 .
- El flujo a través de la bomba es directamente proporcional al voltaje de entrada aplicado a la bomba.
- El flujo en el tanque 1 después de cruzar la válvula 1 es $\gamma_1k_1v_1$ y para el tanque 2 después de cruzar la válvula 2 es $\gamma_2k_2v_2$.
- El flujo en el tanque 4 después de cruzar la válvula 1 es $(1 - \gamma_1)k_1v_1$ y para el tanque 3 después de cruzar la válvula 2 es $(1 - \gamma_2)k_2v_2$.

Primero deduciremos las ecuaciones para un solo tanque con una sola entrada y salida (ver Fig.2.3). Según la Ec. 2.1, el balance de masa es:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_o \quad (2.2)$$

donde m es la masa acumulada en el tanque, \dot{m}_i es el flujo de masa de entrada, y \dot{m}_o es el flujo de masa de salida.

Sea ρ la densidad de líquido dentro del tanque, ρ_i y ρ_o la densidad del líquido de entrada y salida. Igualmente, sea V el volumen del tanque, q_i y q_o los flujos volumétricos de entrada y

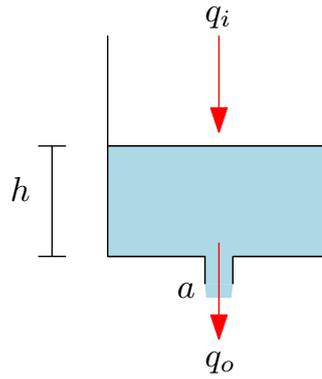


Figura 2.3: Balance de masa para un tanque con una sola entrada y salida

salida, tenemos:

$$m = \rho V$$

$$\dot{m}_i = \rho_i q_i$$

$$\dot{m}_o = \rho_o q_o$$

Debido a la incompresibilidad de los líquidos, la densidad de los mismos es independiente de la presión y solo depende de la temperatura. Asumiendo que la variación de temperatura es despreciable, la densidad del líquido se mantiene constante, es decir, $\rho = \rho_i = \rho_o$. De aquí tenemos que:

$$A \frac{dh}{dt} = q_i - q_o \quad (2.3)$$

donde A es el área de la sección transversal del tanque, h es el nivel de agua del tanque.

El flujo volumétrico de entrada q_i solo depende del voltaje aplicado a la bomba, mientras que el flujo volumétrico de salida q_o depende de la aceleración debido a la gravedad y el nivel de agua en el tanque. Para el cálculo de q_o aplicaremos la ecuación de Bernoulli para un tanque que se está drenando (ver Fig. 2.4). La ecuación de Bernoulli establece que:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \quad (2.4)$$

donde se ha asumido que no hay trabajo externo (bomba) y las pérdidas por fricción son despreciables. P es la presión, z es la altura (con respecto a un nivel de referencia) y V la velocidad. El valor de α es igual a 1 o 2 si es flujo turbulento o laminar respectivamente.

En la Fig. 2.4 el punto 1 corresponde a la superficie del tanque y el punto 2 a la salida del agujero. En base a la ecuación de continuidad:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (2.5)$$

Asumiendo que la densidad es constante ($\rho_1 = \rho_2$), entonces:

$$V_1 = V_2 \frac{A_2}{A_1} = V_2 \left(\frac{d}{D}\right)^2 = V_2 \beta^2 \quad (2.6)$$

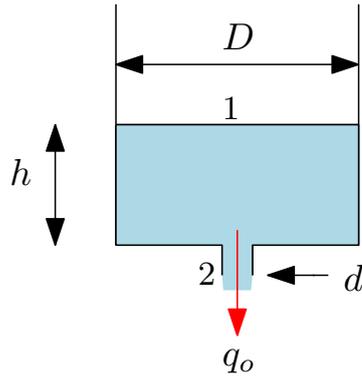


Figura 2.4: Balance de masa para un tanque que se está drenando

Asumiendo como nivel de referencia $z_2 = 0$, entonces $z_1 = h$. Además, la presión en ambos puntos 1 y 2 es atmosférica, $P_1 = P_2$, y asumiendo $\alpha = 1$, podemos reemplazar la Ec. 2.6 en la Ec. 2.4 y despejar V_2 :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gh}{1 - \beta^4}} \quad (2.7)$$

La ecuación anterior es conocida como la *ecuación de Torricelli*. Si se cumple que $A_1 \gg A_2$, entonces $\beta \approx 0$, es decir:

$$V_2 = \sqrt{2gh} \quad (2.8)$$

Entonces, el caudal q_o viene dado por:

$$q_o = a\sqrt{2gh} \quad (2.9)$$

donde a es el área de la sección transversal de la tubería de salida y g la aceleración de la gravedad.

De acuerdo a la Fig. 2.5, se lleva a cabo el balance de masa de forma individual para cada tanque $i = 1 \dots 4$.

Tanque 1

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= q_{i,1} + q_{o,3} - q_{o,1} \\ &= \gamma_1 k_1 v_1 + a_3 \sqrt{2gh_3} - a_1 \sqrt{2gh_1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Tanque 2

$$\begin{aligned} A_2 \frac{dh_2}{dt} &= q_{i,2} + q_{o,4} - q_{o,2} \\ &= \gamma_2 k_2 v_2 + a_4 \sqrt{2gh_4} - a_2 \sqrt{2gh_2} \end{aligned} \quad (2.11)$$

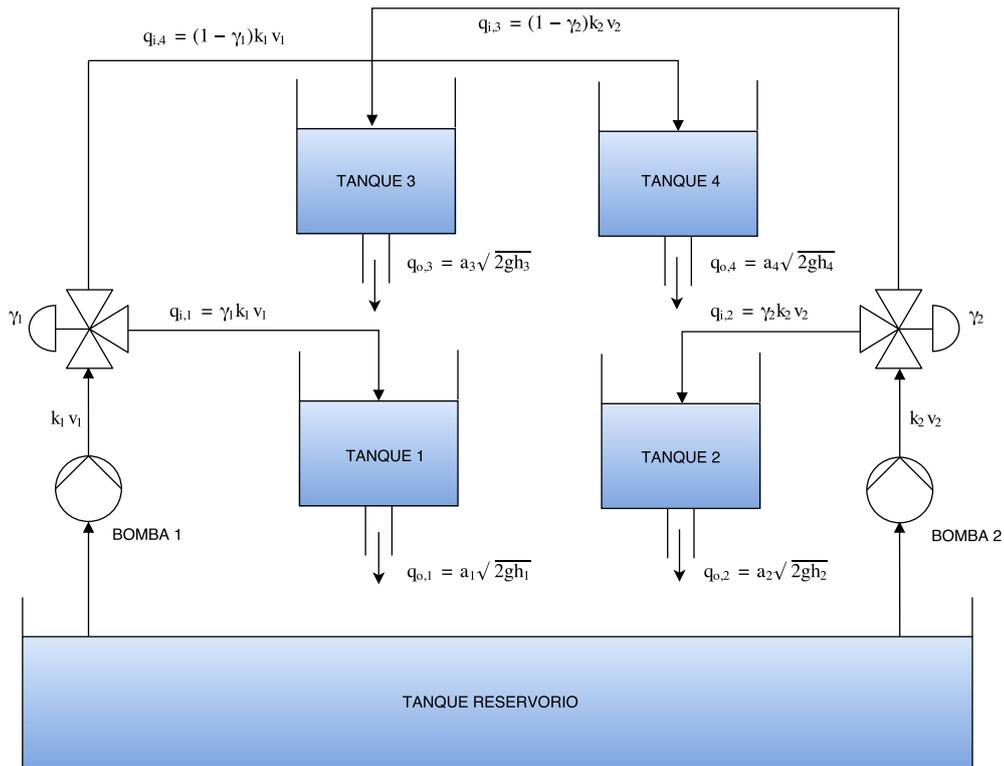


Figura 2.5: Balance de masa para el sistema de cuatro tanques

Tanque 3

$$\begin{aligned} A_3 \frac{dh_3}{dt} &= q_{i,3} - q_{o,3} \\ &= (1 - \gamma_2) k_2 v_2 - a_3 \sqrt{2gh_3} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Tanque 4

$$\begin{aligned} A_4 \frac{dh_4}{dt} &= q_{i,4} - q_{o,4} \\ &= (1 - \gamma_1) k_1 v_1 - a_4 \sqrt{2gh_4} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ordenando, se obtiene las siguientes ecuaciones finales:

$$\begin{aligned} \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1 \\ \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2 \\ \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1 - \gamma_2) k_2}{A_3} v_2 \\ \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1 - \gamma_1) k_1}{A_4} v_1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

donde:

A_i : sección transversal del tanque i .

a_i : sección transversal de la tubería de salida del tanque i .

h_i : nivel de líquido en el tanque i .

La ecuación diferencial no lineal (Ec. 2.14) representa el modelo matemático para el sistema de cuatro tanques. Los valores de los parámetros del proceso de acuerdo a Johansson (2000) se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros para el sistema de cuatro tanques.

Parámetros	Unidad	Valor
A_1, A_3	cm^2	28
A_2, A_4	cm^2	32
a_1, a_3	cm^2	0.071
a_2, a_4	cm^2	0.057
g	cm/s^2	981

Es importante mencionar que en la literatura se encuentran diferentes modificaciones del sistema de cuatro tanques propuesto por Johansson (2000), tanto en la configuración como en el tamaño de la planta, como se pueden ver en la Fig. 2.6 (Alvarado et al., 2011; Sutha et al., 2015). La configuración de la planta piloto de la PUCP se muestra en la Fig. 2.7. Sin embargo, independientemente de la configuración de la planta, se puede derivar su modelo a partir de las ecuaciones de balance de masa y Bernoulli como se hizo para el sistema de Johansson (2000).



Figura 2.6: Otras configuraciones para el sistema de cuatro tanques encontradas en la literatura (Alvarado et al., 2011; Sutha et al., 2015).



Figura 2.7: Configuración de la planta piloto de cuatro tanques de la PUCP.

2.3.2. Condiciones en estado estacionario

El punto de operación de estado estacionario (h^0, v^0) se determina haciendo las derivadas en la Ec. 2.14 iguales a cero, obteniéndose:

$$\begin{aligned} \frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3^0} &= \frac{(1 - \gamma_2)k_2}{A_3} v_2^0 \\ \frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4^0} &= \frac{(1 - \gamma_1)k_1}{A_4} v_1^0 \end{aligned} \quad (2.15)$$

y por lo tanto:

$$\begin{aligned} \frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1^0} &= \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} v_1^0 + \frac{(1 - \gamma_2)k_2}{A_1} v_2^0 \\ \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2^0} &= \frac{(1 - \gamma_1)k_1}{A_2} v_1^0 + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} v_2^0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Entonces existe una única entrada constante (v_1^0, v_2^0) dados los niveles estacionarios (h_1^0, h_2^0) si y solo si la matriz

$$\begin{bmatrix} \gamma_1 k_1 & (1 - \gamma_2)k_2 \\ (1 - \gamma_1)k_1 & \gamma_2 k_2 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

es no singular, es decir, $\gamma_1 + \gamma_2 \neq 1$ (Johansson, 2000).

2.3.3. Linealización de modelos no lineales

Considerar el siguiente modelo no lineal general donde x es un vector de n variables de estado, u es un vector de m variables de entrada y y es un vector de r variables de salida:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m) \\ y_1 &= g_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m) \\ &\vdots \\ y_r &= g_r(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m) \end{aligned}$$

En notación vectorial:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (2.19)$$

Usando la expansión en series de Taylor alrededor del punto de operación en estado estacionario $(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s)$, donde se cumple que $\mathbf{f}(\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s) = \mathbf{0}$, y despreciando los términos de orden superior, se obtiene que los elementos de las matrices de linealización (Bequette, 1998) vienen dado por:

$$A_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right|_{\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s} \quad B_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial u_j} \right|_{\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s} \quad (2.20)$$

$$C_{ij} = \left. \frac{\partial g_i}{\partial x_j} \right|_{\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s} \quad D_{ij} = \left. \frac{\partial g_i}{\partial u_j} \right|_{\mathbf{x}_s, \mathbf{u}_s} \quad (2.21)$$

El punto de operación en estado estacionario también es llamado *punto de equilibrio*. Después de la linealización se obtiene la forma en espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}' &= \mathbf{A}\mathbf{x}' + \mathbf{B}\mathbf{u}' \\ \mathbf{y}' &= \mathbf{C}\mathbf{x}' + \mathbf{D}\mathbf{u}' \end{aligned} \quad (2.22)$$

Donde el símbolo ($'$) es usado para representar las *variables de desviación*:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}' &= \mathbf{x} - \mathbf{x}_s \\ \mathbf{u}' &= \mathbf{u} - \mathbf{u}_s \end{aligned} \quad (2.23)$$

Las variables de desviación representan el cambio o perturbación (desviación) del valor en estado estacionario. Generalmente se ignora la notación ($'$) y se entiende que el modelo está en

forma de variables de desviación:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}\tag{2.24}$$

Generalmente, la variable de salida (medida) no depende de la variable de entrada, por lo tanto es más común ver el siguiente modelo en espacio de estados:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.25}$$

2.3.4. Linealización del sistema de cuatro tanques

La no linealidad del sistema de cuatro tanques es debido a los términos de raíz cuadrada presente en la Ec. 2.14. Antes de linealizar el sistema se debe elegir el punto de operación, el cual usualmente es definido como un punto de equilibrio (en estado estacionario). El modelo linealizado corresponde a una relación entre la *variación de las salidas del sistema* y la *variación de las entradas del sistema* alrededor de este punto de operación (Noura et al., 2009). Consideremos un sistema asociado con sus actuadores y sensores, con las entradas y salidas globales U y Y respectivamente.

Definiendo las siguientes variables de desviación:

$$\begin{aligned}x_i &= h_i - h_i^0 \\ u_i &= v_i - v_i^0\end{aligned}\tag{2.26}$$

Donde h_i^0 y v_i^0 son los valores en estado estacionario de los niveles de los tanques y los voltajes aplicado a las bombas. Estos valores se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros para el punto de operación para la linealización.

Parámetros	Unidad	Valor
h_1^0, h_2^0	cm	(12.4, 12.7)
h_3^0, h_4^0	cm	(1.8, 1.4)
v_1^0, v_2^0	V	(3.00, 3.00)
k_1, k_2	cm ³ /V.s	(3.33, 3.35)
γ_1, γ_2	adimensional	(0.70, 0.60)

Si el sistema es linealizado alrededor del punto de operación (U_0, Y_0) , donde $U_0 = [v_1^0 \ v_2^0]^T$ y $Y_0 = [h_1^0 \ h_2^0 \ h_3^0 \ h_4^0]^T$, el modelo linealizado corresponde a la relación entre las variaciones de las entradas u y salidas y (ver Fig. 2.8), tal que:

$$\begin{aligned}u &= U - U_0 \\ y &= Y - Y_0\end{aligned}\tag{2.27}$$

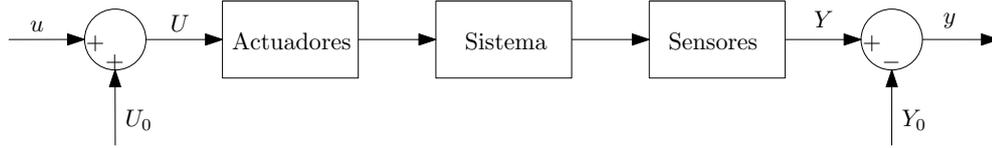


Figura 2.8: Representación del sistema tomando en cuenta el punto de operación.

Al linealizar la Ec. 2.14 utilizando las Ec. 2.20 y 2.21 se obtiene el modelo lineal en espacio de estados dado por la ecuación 2.28.

$$\frac{dx}{dt} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & 0 & \frac{A_3}{A_1 T_3} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} & 0 & \frac{A_4}{A_2 T_4} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_4} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} \\ 0 & \frac{(1-\gamma_2)k_2}{A_3} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1}{A_4} & 0 \end{bmatrix} u \quad (2.28)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} x \quad (2.29)$$

Las variables de salida son los niveles de los tanques, los cuales son los estados del sistema (se asume que está disponible la medición de los niveles de los cuatro tanques). Las constantes de tiempo son:

$$T_i = \frac{A_i}{a_i} \sqrt{\frac{2h_i^0}{g}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.30)$$

La Ec.2.28 y Ec. 2.29 pueden representarse en espacio de estados en tiempo continuo como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B_c u(t) \\ y(t) &= C_c x(t) \end{aligned} \quad (2.31)$$

El subíndice “c” es para indicar que son las matrices en tiempo continuo.

Ahora determinamos el rango lineal del sistema. A partir de la Ec. 2.16 se encuentra que los valores estacionarios de los tanques 1 y 2 dependen de ambas entradas (voltajes aplicados a las bombas), como se puede ver en la Fig. 2.9. Esto debido a la naturaleza multivariable del proceso. A partir de la Fig. 2.10 se observa que el rango lineal está comprendido entre 2 – 4 V aproximadamente para ambas entradas, que en porcentaje sería 20 – 40 %.

2.3.5. Ceros y polos

La matriz de función de transferencia $G(s)$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (2.32)$$

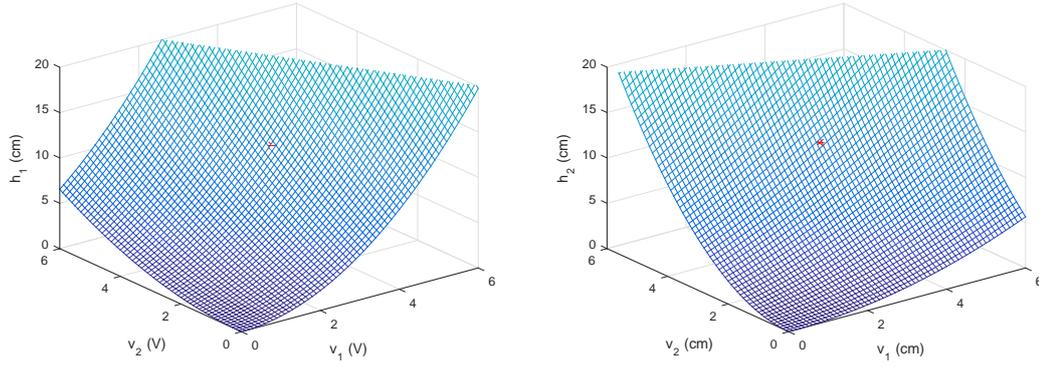


Figura 2.9: Estado estacionario.

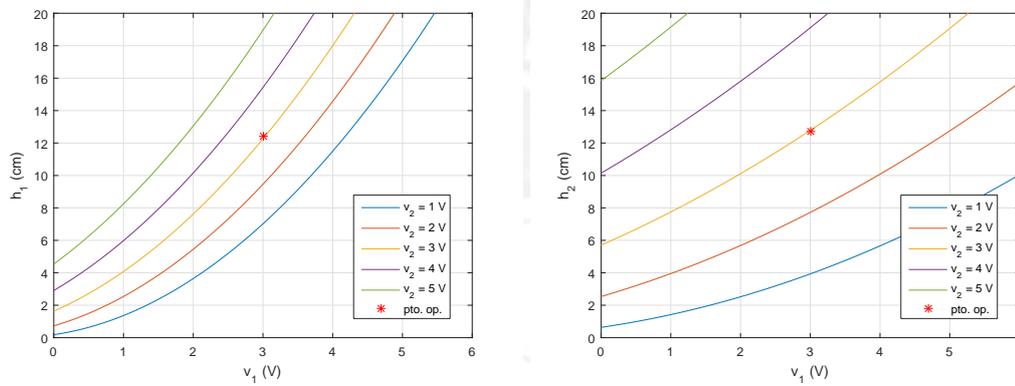


Figura 2.10: Determinación del rango lineal del proceso de cuatro tanques.

De aquí:

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1 k_1 T_1}{A_1(1+T_1 s)} & \frac{(1-\gamma_2)k_2 T_1}{A_1(1+T_1 s)(1+T_3 s)} \\ \frac{(1-\gamma_1)k_1 T_2}{A_2(1+T_2 s)(1+T_4 s)} & \frac{\gamma_2 k_2 T_2}{A_2(1+T_2 s)} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A partir del determinante de la matriz de transferencia se obtienen los ceros y polos:

$$\det(G(s)) = \frac{k_1 k_2 T_1 T_2}{A_1 A_2} \left(\frac{T_3 T_4 \gamma_1 \gamma_2 s^2 + \gamma_1 \gamma_2 (T_3 + T_4) s + \gamma_1 + \gamma_2 - 1}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)(1 + T_3 s)(1 + T_4 s)} \right) \quad (2.34)$$

Los ceros se obtienen al igualar el numerador del polinomio dado en la Ec. 2.34 a cero. Igualmente, los polos se obtienen al igualar a cero el denominador.

2.3.6. Fase mínima y fase no mínima

Es importante mencionar que el sistema de cuatro tanques se comporta como fase mínima o fase no mínima dependiendo de las posiciones de las válvulas de tres vías: γ_1 y γ_2 .

- Para fase mínima: $1 < \gamma_1 + \gamma_2 < 2$
- Para fase no mínima: $0 < \gamma_1 + \gamma_2 < 1$

Un sistema es de fase mínima cuando los ceros de la función de transferencia están ubicados

en el semiplano izquierdo. Si alguno de los ceros se ubica a la derecha del plano complejo el sistema es de fase no mínima (Ogata, 2010).

Una interpretación física para el sistema de fase mínima es que la suma de los caudales en los tanques superiores son menores a la suma de los caudales de los tanques inferiores. Esta condición es intuitivamente más fácil de controlar. El sistema de fase no mínima se da cuando mayor cantidad de caudal se dirige hacia los tanques superiores. Los sistemas de fase no mínima presentan respuesta inversa y son más difíciles de controlar.

En la presente tesis se trabaja con el sistema de cuatro tanques en fase mínima (ver Tabla 2.2).

2.4. Sistema de control

2.4.1. Generalidades

El primer paso para diseñar un sistema de control tolerante a fallas es diseñar un sistema de control, el cual tiene la capacidad de satisfacer los objetivos o requerimientos de control para el sistema libre de fallas (también es llamado sistema de control *nominal*). El sistema de control es de dos tipos: un controlador clásico basado en realimentación de estados (con acción integral para obtener un error estacionario igual a cero), y un controlador avanzado, conocido como controlador de matriz dinámica o DMC, de la familia de controladores predictivos basados en modelo. El sistema de control no considera a las fallas en su diseño.

2.4.2. Control por realimentación de estados

Este diseño se hace en base al modelo lineal de la planta. La representación en espacio de estados en tiempo discreto se obtiene a partir de la discretización de la Ec. 2.31, y viene dado por:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{2.35}$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $u \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada de control, y $y \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida. Las matrices A , B y C son de dimensiones apropiadas.

La ley de control de seguimiento requiere que el número de salidas controladas deben ser menores o iguales al número de entradas de control disponibles en el sistema (d'Azzo y Houpis, 1995).

Si el número de salidas es mayor que el número de entradas de control, se debe seleccionar las salidas que deben seguir la referencia y partir el vector de salida como sigue:

$$y(k) = Cx(k) = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} x(k) = \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix}\tag{2.36}$$

El controlador por realimentación de estados debe ser capaz de lograr que las variables controladas $y_1 \in \mathbb{R}^p$ ($p \leq m$) sigan a sus valores de referencia (deseados) y_r , tal que en estado

estacionario:

$$y_r(k) - y_1(k) = 0. \quad (2.37)$$

Con el fin de alcanzar este objetivo, se incorpora un vector integrador de Euler hacia adelante $z \in \mathbb{R}^p$ que satisface la siguiente relación:

$$\begin{aligned} z(k+1) &= z(k) + T_s(y_r(k) - y_1(k)) \\ &= z(k) + T_s(y_r(k) - C_1x(k)) \end{aligned} \quad (2.38)$$

Donde T_s es el periodo de muestreo, el cual debe elegirse adecuadamente. El sistema aumentado que incluye acción integral viene dado por:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ z(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0_{n,p} \\ -T_s C_1 & I_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0_{p,m} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0_{n,p} \\ T_s I_p \end{bmatrix} y_r(k) \\ y(k) &= \begin{bmatrix} C & 0_{q,p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.39)$$

Este sistema aumentado puede representarse en espacio de estados como:

$$\begin{aligned} \bar{X}(k+1) &= \bar{A}\bar{X}(k) + \bar{B}(k) + \bar{W}_r y_r(k) \\ y(k) &= \bar{C}\bar{X}(k) \end{aligned} \quad (2.40)$$

donde \bar{A} , \bar{B} , \bar{W}_r y \bar{C} son las nuevas matrices para el sistema aumentado.

La ley de control basado en la realimentación de estados se calcula como:

$$u(k) = -K\bar{X}(k) = -\begin{bmatrix} K_x & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ z(k) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Donde $K = \begin{bmatrix} K_x & K_z \end{bmatrix}$ es la matriz de ganancias realimentadas del controlador, la cual se puede calcular por ejemplo mediante a) *ubicación de polos* o b) usando un *regulador lineal cuadrático* (LQR). Ambas técnicas serán explicadas más adelante. Para lograr esta ley de control se necesita que todos los estados puedan ser medidos. Para el sistema de cuatro tanques, las variables de estado son los niveles de líquido en los tanques y se asumen que son medidos. En caso contrario, estos podrían ser estimados mediante un observador o filtro de Kalman. Para el sistema de cuatro tanques se cumple que las salidas son las variables de estado, por lo tanto la matriz C es la matriz identidad I_n .

El diagrama esquemático del sistema de control nominal basado en realimentación de estados con acción integral tomando en cuenta el punto de operación, y con $y = x$ se muestra en la Fig. 2.11.

A continuación se explican dos métodos clásicos para el cálculo de la matriz de ganancias del controlador K por realimentación.

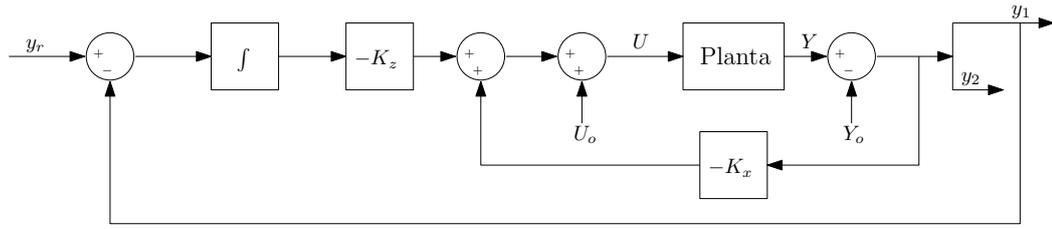


Figura 2.11: Sistema de control nominal tomando en cuenta el punto de operación.

2.4.2.1. Regulador lineal cuadrático (LQR)

Después de que se definen las matrices aumentadas \bar{A} y \bar{B} descritas por la Ec. 2.40, $K = \begin{bmatrix} K_x & K_z \end{bmatrix}$ se calcula utilizando la técnica de optimización lineal cuadrática, tal que se minimiza la siguiente función de costo:

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (X^T(k)QX(k) + u^T(k)Ru(k)) \quad (2.42)$$

Donde las matrices de ponderación Q y R son matrices simétricas no negativas y matrices positivas definidas respectivamente ($Q \geq 0$ y $R > 0$). Mediante la elección de las matrices Q y R se puede balancear la velocidad de convergencia de la solución con el costo del control.

La matriz de ganancias del controlador K se calcula como:

$$K = [R + \bar{B}^T S \bar{B}] \bar{B}^T S \bar{A} \quad (2.43)$$

donde la matriz S se determina resolviendo la ecuación algebraica de Riccati en tiempo discreto:

$$S = \bar{A}^T [S - S \bar{B} R^{-1} \bar{B}^T S] \bar{A} + Q \quad (2.44)$$

Para que el sistema en lazo cerrado sea estable el par (\bar{A}, \bar{B}) debe ser controlable y el par (\bar{A}, \sqrt{Q}) debe ser observable (Goodwin et al., 2001).

De manera general, el par (A, B) es controlable si la matriz de controlabilidad de $n \times nr$:

$$C = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

tiene rango n . Donde $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ y $B \in \mathfrak{R}^{n \times r}$.

Igualmente, el par (A, C) es observable si la matriz de observabilidad de $n \times np$:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

tiene rango n . Donde $A \in \mathfrak{R}^{n \times n}$ y $C \in \mathfrak{R}^{n \times p}$.

El cálculo de la matriz S se puede realizar usando el comando $dare()$ de MATLAB y luego calcular K mediante la Ec. 2.43. También se puede calcular la ganancia K directamente utilizando el comando $dlqr()$ de MATLAB.

Una de las preguntas principales en el diseño de un controlador LQR es como elegir los pesos Q y R . Para esto, se debe usar el conocimiento del sistema que estamos tratando de controlar. Generalmente, se utilizan pesos diagonales.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & q_n \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \rho_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \rho_n \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Para esta elección de Q y R , los elementos de la diagonal describen cuanto cada estado y entrada (al cuadrado) deben contribuir al costo total. Por lo tanto, si queremos que los estados permanezcan pequeños, debemos asignarles valores de pesos más altos. Similarmente, se puede penalizar la entrada de control frente a los estados y otras entradas a través de la elección correspondiente del peso de entrada ρ .

La dinámica del sistema en lazo cerrado dependerá de la elección de las matrices Q y R . En la práctica, se necesita realizar varias pruebas de ensayo y error para obtener una respuesta en lazo cerrado satisfactoria.

2.4.2.2. Ubicación de polos

Esta técnica consiste en ubicar o asignar los polos del sistema de lazo cerrado en cualquier posición preestablecida. Dada las posiciones deseadas de los polos y el modelo del sistema, se puede diseñar el controlador por realimentación que desplaze los polos del sistema original a las posiciones deseadas. Como requisito se tiene que el sistema debe ser controlable. Cabe mencionar que para sistemas discretos, las posiciones de los polos deseados deben estar dentro del círculo unitario.

La técnica consiste básicamente en calcular el polinomio:

$$|zI - (\bar{A} - \bar{B}K)| \quad (2.48)$$

cuyas raíces son los eigenvalores del lazo cerrado, y calculando los coeficientes de K tal que este polinomio sea igual al deseado. Dos de los algoritmos más conocidos para ubicación de polos es el algoritmo de Ackerman y Bass-Gura (Xue et al., 2007). A continuación se describe el algoritmo de Ackerman por ser el más conocido.

Algoritmo de Ackerman

La ganancia del controlador se calcula mediante la formula:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{B} & \bar{A}\bar{B} & \bar{A}^2\bar{B} & \dots & \bar{A}^{n-1}\bar{B} \end{bmatrix} \alpha_c(\bar{A}) \quad (2.49)$$

donde $\mathcal{C} = \begin{bmatrix} \bar{B} & \bar{A}\bar{B} & \dots \end{bmatrix}$ es la matriz de controlabilidad, n es el orden del sistema. La ecuación característica deseada $\alpha_c(z)$ viene dada por:

$$\alpha_c(z) = |zI - (\bar{A} - \bar{B})K| = z^n + \alpha_1 z^{n-1} + \dots + \alpha_n \quad (2.50)$$

Y sustituyendo z por \bar{A} en $\alpha_c(z)$ para formar:

$$\alpha_c(\bar{A}) = \bar{A}^n + \alpha_1 \bar{A}^{n-1} + \alpha_2 \bar{A}^{n-2} + \dots + \alpha_n I \quad (2.51)$$

La matriz de controlabilidad \mathcal{C} debe ser de rango completo para que la matrix sea invertible y para que el sistema sea controlable.

MATLAB tiene la función *acker()* que implementa este algoritmo. Esta función solo puede aplicarse a sistemas SISO de bajo orden (menor a 10).

Algoritmo de ubicación de polos numéricamente robusto

Se ha encontrado que el algoritmo de ubicación de polos de Ackerman y Bass-Gura puede no ser numéricamente robusto (Xue et al., 2007). La función de MATLAB *place()* calcula la matriz de realimentación K usando un algoritmo numéricamente robusto descrito en Kautsky et al. (1985). Esta función tiene la ventaja que puede ser usado para problemas de ubicación de polos de sistemas MIMO. Sin embargo, las posiciones de los polos deseados deben ser distintos, es decir, la multiplicidad de cualquier polo no puede ser mayor a 1. Por otro lado, la función *acker()*, aunque no puede tratar con sistemas MIMO, puede usarse con polos deseados de cualquier multiplicidad.

La ubicación de los polos en lazo cerrado deben ser elegidos cuidadosamente bajo ciertas reglas o guías que permitan obtener el mejor desempeño. Estas reglas han sido publicadas en Vaccaro (2014) y demuestran una base sólida para la elección de la ubicación de los polos para cualquier sistema, que satisfacen un tiempo de establecimiento requerido y producen un buen grado de robustez. Estas reglas son las siguientes:

Polos reguladores

1. Usar los polos normalizados de Bessel escalados (divididos) por el tiempo de establecimiento deseado (ver Tabla 2.3).
2. Usar polos de la planta suficientemente amortiguados, es decir, polos cuyas partes reales se encuentran a la izquierda de $s1/T_{es}$.
3. Si la planta tiene polos complejos que no son suficientemente amortiguados, elegir los polos en lazo cerrado reemplazando las partes reales de estos polos con $s1/T_{es}$ y manteniendo las mismas partes imaginarias. Cambiando las partes reales adiciona amortiguamiento a estos polos de la planta.
4. Si la planta tiene polos inestables (parte real mayor que cero) considerar la reflexión de estos polos sobre el eje imaginario, es decir, cambiar el signo de la parte real del polo. Si el polo reflejado está a la izquierda de $s1/T_{es}$ usarlo como un polo de lazo cerrado.

Polos para sistemas de seguimiento

1. Usar todas las reglas para polos reguladores.
2. Si la planta tiene ceros estables “lentos”, considerar estos como polos en lazo cerrado para el sistema de seguimiento. Un cero estable “lento” es un cero cuya parte real es negativa y está a la derecha de $4 * s1/T_{es}$. Se debe notar que este polo lento de lazo cerrado no va a afectar el tiempo de establecimiento del sistema de seguimiento porque se cancela con el cero correspondiente de la planta.

Polos para observadores

1. Usar los polos normalizados de Bessel escalados (divididos) por el tiempo de establecimiento deseado del observador. Este tiempo debe ser elegido entre un tercio a un quinto del tiempo de establecimiento del regulador o sistema de seguimiento. De aquí se dice que el observador es de tres a cinco veces más rápido.
2. Si la planta tiene ceros estables, considerar usar estos ceros como polos para observadores.
3. Si la planta tiene ceros en el plano derecho, la reflexión de estos ceros (reemplazar sus partes reales con las negativas de sus partes reales) deben ser elegidos como polos observadores.

Las anteriores reglas son para elegir la ubicación de polos deseados para el sistema de lazo cerrado y observadores en tiempo continuo. Para sistemas en tiempo discreto, los polos, p_i , deben ser mapeados usando el método del retenedor de orden cero (ZOH), $e^{p_i T_s}$, donde T_s es el intervalo de muestreo en segundos.

Se utilizará el método de ubicación de polos considerando las reglas anteriores, pues nos permiten seleccionar de antemano el tiempo de establecimiento deseado para el sistema de lazo cerrado.

Tabla 2.3: Polos normalizados de Bessel

Variable	Ubicación de polos
$s1$	-4.6200
$s2$	$-4.0530 \pm j2.3400$
$s3$	$-5.0093, -3.9668 \pm j3.7845$
$s4$	$-4.0156 \pm j5.0723, -5.5281 \pm j1.6553$

2.4.3. Control por matriz dinámica

2.4.3.1. Generalidades

El DMC pertenece a la familia de controladores predictivos basados en modelo (MPC¹), fue desarrollado al final de los años setenta por Cutler y Ramaker (1980), ingenieros de la

¹Por sus siglas en inglés, *Model Predictive Control*

empresa Shell Oil Co., y ha sido ampliamente aceptado en las industrias, principalmente en la industria petroquímica (Camacho y Bordons, 2007).

Actualmente el DMC es más que un algoritmo de control, ya que resuelve problemas de identificación y optimización global de plantas industriales.

El gran éxito del DMC en la industria es debido a su habilidad de tratar con procesos multivariantes. Primero se desarrolla el caso de un sistema de una sola entrada y una sola salida (SISO²) ya que los fundamentos de este controlador pueden entenderse más fácilmente. Después, se hace la extensión del método a plantas multivariantes, de múltiples entradas y salidas (MIMO³), que básicamente es cuestión de notación.

El concepto básico de un MPC se muestra en la Fig. 2.12 (Seborg et al., 2010). Los cálculos del MPC están basados en las mediciones actuales y las predicciones de los valores futuros de las salidas. El objetivo del MPC es determinar la secuencia de *movimientos de control* (esto es, cambios en las entradas manipuladas) tal que la respuesta predicha se acerca al punto de consigna (*set point*) de una manera óptima. La salida actual y , salida predicha \hat{y} y entrada manipulada u para un sistema SISO se muestra en la Fig. 2.12. En el instante de tiempo actual t , la estrategia MPC calcula una secuencia de M valores de la entrada $\{u(t+k-1), i = 1, 2, \dots, M\}$. La secuencia consiste de la entrada actual $u(t)$ y $M-1$ entradas futuras. La entrada se mantiene constante después de M movimientos de control. Las entradas son calculadas tal que la secuencia de P salidas predichas $\{\hat{y}(t+k), i = 1, 2, \dots, P\}$ alcanza el punto de consigna de una manera óptima. Los cálculos de control están basados en la optimización de una función objetivo. El número de predicciones P se llama *horizonte de predicción*, mientras que el número de movimientos de control M se llama *horizonte de control*.

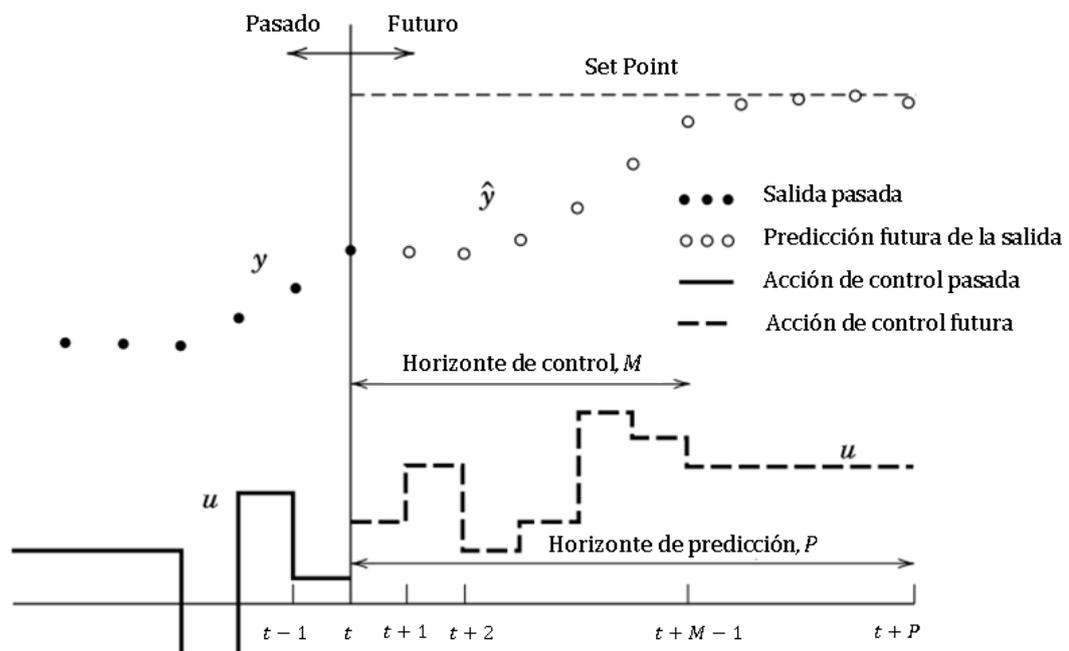


Figura 2.12: Concepto básico del control predictivo basado en modelo (Seborg et al., 2010)

²Por sus siglas en inglés, *Single-Input Single-Output*

³Por sus siglas en inglés, *Multiple Input Multiple Output*

2.4.3.2. Sistema SISO

Utiliza el modelo (lineal) de respuesta paso (escalón) de la planta:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \quad (2.52)$$

donde g_i son los coeficientes de la respuesta paso, Δu es el incremento en la señal de control ($\Delta u(t) = u(t) - u(t-1)$), y y es la respuesta del sistema.

La predicción de la salida viene dado por:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) + n(t) \quad (2.53)$$

donde $n(t)$ son las perturbaciones.

La predicción de la salida en instantes futuros de tiempo se desarrolla sustituyendo en la Ec. 2.53 (t) por ($t+k$)

$$\hat{y}(t+k) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + n(t+k) \quad (2.54)$$

Resulta conveniente separar los términos de las sumatorias que dependen de valores pasados (son conocidos en el instante t) y los términos que dependen de las acciones presentes y futuras:

$$\hat{y}(t+k) = \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + n(t+k) \quad (2.55)$$

Esto facilita la solución del problema de optimización. Para $\Delta u(t+k-i)$ se tiene:

Si $k-i \geq 0$ es futuro

Si $k-i < 0$ es pasado

Se desconoce el valor de las perturbaciones futuras $n(t+k)$, pero estas pueden estimarse considerando que el valor de las perturbaciones permanece constante e igual al valor actual en (t), es decir:

$$\begin{aligned} \hat{n}(t+k) &= \hat{n}(t) = y_m(t) - \hat{y}(t/t) \\ &= y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \end{aligned} \quad (2.56)$$

donde $y_m(t)$ es el valor medido de la salida y $\hat{y}(t/t)$ es el valor estimado por el modelo.

Sustituyendo la Ec. 2.56 en la Ec. 2.55 tenemos:

$$\begin{aligned}\hat{y}(t+k) &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \Delta u(t-i) \\ &= \sum_{i=1}^k g_i \Delta u(t+k-i) + f(t+k)\end{aligned}\quad (2.57)$$

donde $f(t+k)$ es la *respuesta libre*, la parte de la respuesta que no depende de acciones de control futuras, dada por:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (2.58)$$

Si el proceso es asintóticamente estable, los coeficientes de la respuesta paso, g_i , tienden a un valor constante después de N periodos de muestreo, por lo tanto:

$$g_{k+i} - g_i \cong 0, \quad i > N \quad (2.59)$$

La Ec. 2.58 puede simplificarse a:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \Delta u(t-i) \quad (2.60)$$

Aplicando las ecuaciones anteriores para un horizonte de predicción igual a P y un horizonte de control igual a M :

$$\begin{aligned}\hat{y}(t+1/t) &= g_1 \Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2/t) &= g_2 \Delta u(t) + g_1 \Delta u(t+1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+P/t) &= \sum_{i=P-M+1}^P g_i \Delta u(t+P-i) + f(t+P)\end{aligned}\quad (2.61)$$

Se define la matriz dinámica G :

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_M & g_{M-1} & \dots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_P & g_{P-1} & \dots & g_{P-M+1} \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

donde la matriz G tiene dimensión $P \times M$.

En forma vectorial la Ec. 2.61 puede escribirse como:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} \quad (2.63)$$

donde $\hat{\mathbf{y}}$ es un vector de dimensión P que contiene las predicciones futuras en el horizonte de predicción, \mathbf{u} es un vector de dimensión M que contiene los incrementos de control y \mathbf{f} es el vector de respuesta libre.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}} &= [\hat{y}(t+1/t), \hat{y}(t+2/t), \dots, \hat{y}(t+P/t)]^T \\ \mathbf{u} &= [\Delta u(t), \Delta u(t+1), \dots, \Delta u(t+M-1)]^T \\ \mathbf{f} &= [f(t+1), f(t+2), \dots, f(t+P)]^T \end{aligned} \quad (2.64)$$

La Ec. 2.63 relaciona las salidas futuras con los incrementos en la señal de control y es usado para el calculo de las acciones necesarias para conseguir el comportamiento deseado del sistema.

El objetivo del DMC es encontrar los incrementos de control que minimicen una función de costo (objetivo) cuadrática que incluye errores futuros y esfuerzos en el control:

$$J = \sum_{j=1}^P (\hat{y}(t+j/t) - r(t+j))^2 + \sum_{j=1}^M \lambda (\Delta u(t+j-1))^2 \quad (2.65)$$

donde P es el horizonte de predicción, M es el horizonte de control, $\hat{y}(t+k/t)$ es la predicción óptima j pasos hacia adelante de la salida de la planta, $r(t+k)$ es la trayectoria de referencia futura y λ es un factor de ponderación del esfuerzo de control.

En forma vectorial la Ec. 2.65 puede escribirse como:

$$J = \mathbf{e}^T \mathbf{e} + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \quad (2.66)$$

donde \mathbf{e} es el vector de errores futuros.

Reemplazando la Ec. 2.63:

$$\begin{aligned} J &= (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{r})^T (\mathbf{G}\mathbf{u} + \mathbf{f} - \mathbf{r}) + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \\ J &= \mathbf{u}^T \mathbf{G}^T \mathbf{G} \mathbf{u} + 2\mathbf{u}^T \mathbf{G}^T \mathbf{f} - 2\mathbf{u}^T \mathbf{G}^T \mathbf{r} + \mathbf{r}^T \mathbf{r} - \mathbf{f}^T \mathbf{r} - \mathbf{r}^T \mathbf{f} + \mathbf{f}^T \mathbf{f} + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{u} \\ J &= \mathbf{u}^T (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{u} - 2\mathbf{u}^T \mathbf{G}^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) + (\mathbf{r} - \mathbf{f})^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \end{aligned} \quad (2.67)$$

Si no se considera restricciones en los valores de las variables, el valor de \mathbf{u} que minimiza la función de costo se obtiene analíticamente derivando J respecto a \mathbf{u} e igualando a cero, es decir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial \mathbf{u}} &= 0 \\ &= 2(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I}) \mathbf{u} - 2\mathbf{G}^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \end{aligned} \quad (2.68)$$

que da como resultado:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (2.69)$$

Esta ley puede escribirse en forma compacta como:

$$\mathbf{u} = \mathbf{K}_c (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (2.70)$$

donde \mathbf{K}_c es la ganancia del controlador DMC definida como:

$$\mathbf{K}_c = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T \quad (2.71)$$

Notar que \mathbf{K}_c es matriz de dimensiones $M \times P$ y puede calcularse fuera de línea si la matriz \mathbf{G} y λ son constantes.

Aunque el DMC calcula una secuencia de M cambios a aplicar en la variable manipulada, solo se implementa en el instante t el primero, $\Delta u(t)$. Luego, al siguiente periodo de muestreo, se leen nuevos datos y se calcula una nueva secuencia de control. Una vez más, solo el primero es implementado. Estas actividades son repetidas en cada periodo de muestreo, y la estrategia es conocida como *enfoque de horizonte móvil*.

El primer elemento del vector \mathbf{u} , $\Delta u(t)$, que es la señal que efectivamente se envía a la planta, puede calcularse como:

$$\Delta u(t) = \mathbf{K}_{c1} (\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (2.72)$$

donde \mathbf{K}_{c1} se define como la primera fila de \mathbf{K}_c . Por tanto, \mathbf{K}_{c1} tiene dimensiones de $1 \times P$.

Puede parecer extraño calcular M movimientos de control para solo implementar el primero. La ventaja importante del enfoque de horizonte móvil es debido a que la nueva información, a través de la medición más reciente $y_m(t)$, es usada inmediatamente en vez de ser ignorada en los siguientes M instantes de muestreo. De otra manera, las predicciones y los movimientos de control estarán basados en información pasada y por lo tanto serán afectados negativamente por perturbaciones no medibles (Seborg et al., 2010).

Resumen de parámetros

Los parámetros de diseño para el DMC son los siguientes:

- **Horizonte de predicción (P):** Indica el horizonte de tiempo durante el cual la salida debe seguir la referencia. Puede expresarse también como el periodo comprendido entre N_1 y N_2 . Donde $N_1 > 1$ si existe retardo de tiempo o respuesta inversa.
- **Horizonte de control (M):** Indica los pasos de tiempo futuros para los cuales los incrementos de control son calculados. Otra nomenclatura usada es N_u .
- **Horizonte del modelo (N):** Indica el intervalo de tiempo de la respuesta paso que se usa como modelo.
- **Factor de ponderación (λ):** Este coeficiente penaliza la señal de control con el fin de evitar que sea demasiada agresiva y también una respuesta oscilatoria.

2.4.3.3. Sistema MIMO

El DMC para sistemas SISO puede generalizarse fácilmente a sistemas MIMO utilizando el principio de superposición. Las ecuaciones básicas desarrolladas en la sección anterior permanecen igual, excepto que las matrices y vectores se hacen más grandes y son divididas apropiadamente.

Considerando un sistema MIMO con r entradas y m salidas, el modelo de respuesta paso de la planta es:

$$y_j = \sum_{k=1}^r \sum_{i=1}^{\infty} g_i^{kj} \Delta u_k(t-i) \quad (2.73)$$

donde g_i^{kj} son los coeficientes de la respuesta paso de la salida j con respecto a la entrada k .

Basado en la linealidad del modelo, el principio de superposición puede utilizarse para obtener las salidas predecidas provocadas por las entradas al sistema. El vector de salidas predecidas se define ahora en forma de bloques como:

$$\hat{\mathbf{y}} = \left[\hat{y}_1(t+1/t), \dots, \hat{y}_1(t+P/t), \dots, \hat{y}_m(t+1/t), \dots, \hat{y}_m(t+P/t) \right]^T \quad (2.74)$$

que es un vector columna de dimensión mP .

El vector de incrementos en la señal de control futuras se define como:

$$\mathbf{u} = \left[\Delta u_1(t), \dots, \Delta u_1(t+M-1), \dots, \Delta u_r(t), \dots, \Delta u_r(t+M-1) \right]^T \quad (2.75)$$

que es un vector columna de dimensión rM .

El vector de respuesta libre se define como:

$$\mathbf{f} = \left[f_1(t+1), \dots, f_1(t+P), \dots, f_m(t+1), \dots, f_m(t+P) \right]^T \quad (2.76)$$

que es un vector columna de dimensión mP .

Se debe tomar en cuenta que la respuesta libre de la salida i depende tanto de los valores pasados de y_i y los valores pasados de todas las señales de control. Por ejemplo, para un sistema con dos entradas y dos salidas, la respuesta libre viene dada por la ecuación:

$$\begin{aligned} f_1(t+k) &= y_{m1}(t) + \sum_{i=1}^{N_{11}} (g_{k+i}^{11} - g_i^{11}) \Delta u_1(t-i) + \sum_{i=1}^{N_{12}} (g_{k+i}^{12} - g_i^{12}) \Delta u_2(t-i) \\ f_2(t+k) &= y_{m2}(t) + \sum_{i=1}^{N_{21}} (g_{k+i}^{21} - g_i^{21}) \Delta u_1(t-i) + \sum_{i=1}^{N_{22}} (g_{k+i}^{22} - g_i^{22}) \Delta u_2(t-i) \end{aligned} \quad (2.77)$$

Con los vectores definidos anteriormente, las ecuaciones de predicción son iguales a la Ec.

2.63, simplemente considerando la matriz dinámica G como:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1r} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{m1} & G_{m2} & \dots & G_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

La matriz G tiene ahora dimensiones de $mP \times rM$. Cada matriz G_{ij} contiene los coeficientes de la respuesta paso de la salida i correspondiente a la entrada j y tiene dimensión $P \times M$.

En general puede especificarse un horizonte de modelo diferente para cada par entrada-salida. Igualmente, pueden elegirse diferentes horizontes de predicción y control.

La ley de control se obtiene mediante la minimización de la siguiente función de costo cuadrática:

$$J = \sum_{j=1}^P \|\hat{y}(t+k/t) - r(t+k)\|_R^2 + \sum_{j=1}^M \|\Delta u(t+k-1)\|_Q^2 \quad (2.79)$$

donde P es el horizonte de predicción, M es el horizonte de control, $\hat{y}(t+k/t)$ es la predicción óptima j pasos hacia adelante de la salida de la planta, $r(t+k)$ es la trayectoria de referencia futura, R y Q son matrices de peso (ponderación) definidas positivas de la señal de error futuro y del esfuerzon en el control respectivamente, las cuales normalmente se eligen diagonales (R tiene dimensión $mP \times mP$ y Q tiene dimensión $rM \times rM$).

$$\begin{aligned} R &= \text{diag}(R_1, R_2, \dots, R_m), & Q &= \text{diag}(Q_1, Q_2, \dots, Q_r) \\ R_i &= \text{diag}(\gamma_{i1}, \gamma_{i2}, \dots, \gamma_{iP}), & i &\in 1, \dots, m \\ Q_j &= \text{diag}(\beta_{j1}, \beta_{j2}, \dots, \beta_{jM}), & j &\in 1, \dots, r \end{aligned} \quad (2.80)$$

y

$$\|x\|_Q^2 = x^T Q x \quad (2.81)$$

La solución óptima viene dado por:

$$u = (G^T R G + Q)^{-1} G^T R (r - f) \quad (2.82)$$

Esta ley puede escribirse en forma compacta como:

$$u = K_c (r - f) \quad (2.83)$$

donde la ganancia del controlador K_c se define como:

$$K_c = (G^T R G + Q)^{-1} G^T R \quad (2.84)$$

La matriz K_c es de dimensión $rM \times mP$ y puede calcularse fuera de línea si la matriz G y las matrices de ponderación R y Q son constantes.

Para el sistema SISO solo se implementaba el primer elemento del vector de incrementos

en la señal de control, y por tanto solo la primera fila de la matriz del controlador se utilizaba. Similarmente, para el proceso multivariable se toma la primera fila de cada bloque correspondiente a cada entrada, es decir:

$$\Delta \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} \Delta u_1(t) \\ \Delta u_2(t) \\ \vdots \\ \Delta u_r(t) \end{bmatrix} = \mathbf{K}_{c1}(\mathbf{r} - \mathbf{f}) \quad (2.85)$$

donde

$$\mathbf{K}_{c1} = L\mathbf{K}_c, \quad (2.86)$$

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \theta & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \theta & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \theta \end{bmatrix} \in \mathfrak{R}^{r \times rM}, \theta = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \in \mathfrak{R}^M \quad (2.87)$$

Entonces, \mathbf{K}_{c1} es de dimensión $r \times mP$, y $\Delta u_k(t)$ es la señal de control correspondiente a la entrada k que se envía a la planta.

Una descripción detallada del algoritmo DMC tanto para sistemas SISO y MIMO se pueden encontrar en Bao-Cang y Baocang (2010).

2.5. Diseño y simulación del sistema de control

Reemplazando los valores de los parámetros de las Tablas 2.1 y 2.2 en el modelo lineal en espacio de estados continuo dado por la Ec. 2.31, tenemos:

$$A_c = \begin{bmatrix} -0.0159 & 0 & 0.0444 & 0 \\ 0 & -0.0111 & 0 & 0.0333 \\ 0 & 0 & -0.0444 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0333 \end{bmatrix}$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0.0833 & 0 \\ 0 & 0.0628 \\ 0 & 0.0479 \\ 0.0312 & 0 \end{bmatrix} \quad C_c = I_4$$

Discretizando con el método del retenedor de orden cero (ZOH⁴) con un periodo de muestreo $T_s = 0.1 \text{ seg}$ se obtiene:

$$A = \begin{bmatrix} 0.9984 & 0 & 0.0044 & 0 \\ 0 & 0.9989 & 0 & 0.0033 \\ 0 & 0 & 0.9956 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9967 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.0083 & 0 \\ 0 & 0.0063 \\ 0 & 0.0048 \\ 0.0031 & 0 \end{bmatrix} \quad C = I_4$$

El modelo lineal aumentado (con acción integral) dado por la Ec. 2.39 es:

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0.9984 & 0 & 0.0044 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9989 & 0 & 0.0033 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9956 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9967 & 0 & 0 \\ -0.1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{bmatrix} 0.0083 & 0 \\ 0 & 0.0063 \\ 0 & 0.0048 \\ 0.0031 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

donde

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

Como se puede observar en las ecuaciones anteriores, el sistema aumentado con acción integral es de sexto orden.

⁴Por sus siglas en inglés, *Zero-order hold*

2.5.1. Control por realimentación de estados

El diseño de este controlador se lleva a cabo mediante el método de *ubicación de polos* utilizando las reglas descritas en la Sección 2.4.2.2, basadas en los polos normalizados de Bessel, escalados por el tiempo de establecimiento. Sin embargo, en vez de usar los polos de Bessel para la ubicación de polos, las reglas sugieren examinar los polos y ceros de la planta en lazo abierto para ver si estos pueden ser usados como polos de lazo cerrado.

Primero determinamos los polos y ceros de la planta en lazo abierto. Para esto nos ayudamos del comando `pzmap()` de MATLAB (analíticamente se puede obtener a partir de la Ec.2.34). Este comando nos muestra gráficamente los polos y ceros de la planta en lazo abierto, el cual se muestra en la Fig. 2.13 (los polos están marcados con aspas y los ceros con círculos).

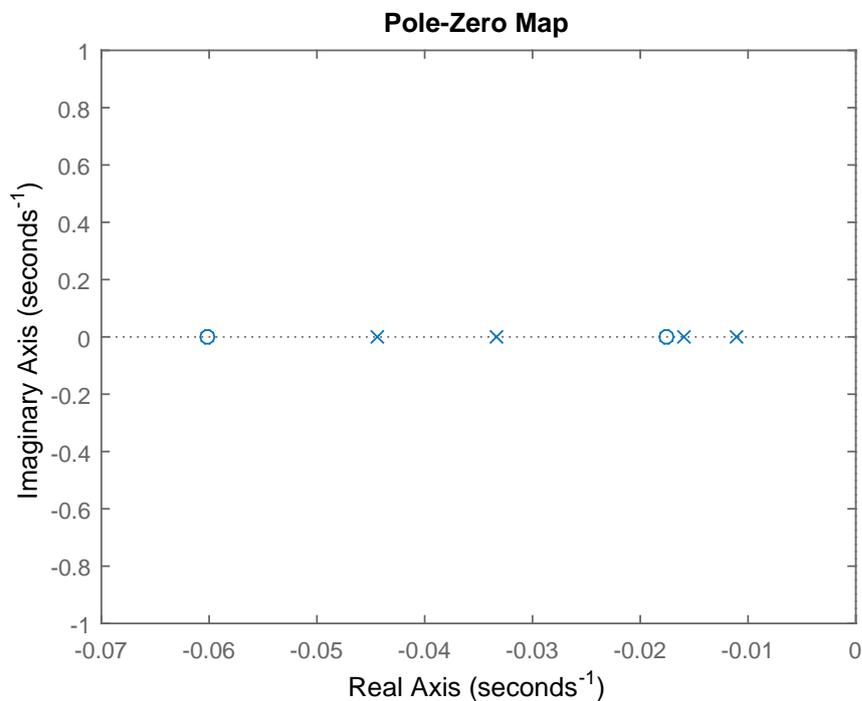


Figura 2.13: Polos y ceros del sistema de cuatro tanques en lazo abierto.

Los polos para el sistema de cuatro tanques son:

$$\left[-0.0159 \quad -0.0111 \quad -0.0444 \quad -0.0328 \right] \quad (2.89)$$

Para seleccionarlos como polos en lazo cerrado, la planta debe ser suficientemente amortiguada, es decir, estos polos deben tener parte real que se encuentren a la izquierda del polo de Bessel de primer orden dividido por el tiempo de establecimiento. El tiempo de establecimiento deseado para el sistema de cuatro tanques es $T_{es} = 30 \text{ s}$. Por lo tanto, los polos deben estar a la izquierda de $s1/T_{es} = -0.1540$. Como se puede observar, ninguno de los polos son validos para ser elegidos como polos de lazo cerrado. La segunda regla para sistemas de seguimiento recomienda la selección de ceros estables “lentos” como polos de lazo cerrado. Para esto, la parte de real de los ceros deben ser negativos y estar a la derecha de $4 * s1/T_{es} = -0.6160$.

Los ceros del sistema de cuatro tanques son:

$$\begin{bmatrix} -0.0598 & -0.0174 \end{bmatrix} \quad (2.90)$$

Ya que ambos ceros satisfacen la segunda regla, son elegidos como polos de lazo cerrado. Entonces, el siguiente vector representa los seis polos para el sistema de cuatro tanques (sistema aumentado de sexto orden) con tiempo de establecimiento de $T_{es} = 30s$:

$$p_i = \begin{bmatrix} -0.0598 & -0.0174 & s4/T_{es} \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

donde $s4$ es el polinomio de Bessel de orden 4 y está definido en la Tabla 2.3:

$$s4 = \begin{bmatrix} -4.0156 \pm j5.0723, -5.5281 \pm j1.6553 \end{bmatrix} \quad (2.92)$$

Si bien con los polos de lazo cerrado seleccionados (Ec. 2.91) se cumple con el tiempo de establecimiento deseado, la respuesta presenta sobreimpulso, por lo tanto, se disminuye la parte imaginaria de los polos conjugados de $s4$ con el fin de eliminar el sobreimpulso. Por lo tanto:

$$s4^* = \begin{bmatrix} -4.0156 \pm 0.1522, -5.5281 \pm j0.1655 \end{bmatrix} \quad (2.93)$$

Entonces el siguiente vector representa los seis polos elegidos como polos de lazo cerrado:

$$p_i^* = \begin{bmatrix} -0.0598 & -0.0174 & s4^*/T_{es} \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

Finalmente, los polos p_i^* son mapeados al plano-z, utilizando la fórmula de mapeo de ZOH, $e^{p_i^* T_s}$.

La matriz de ganancias del controlador (Ec. 2.41) se calcula con la función `place()` de MATLAB (para el sistema aumentado) y viene dado por:

$$K = \begin{bmatrix} 3.5168 & -0.0465 & 0.5328 & -0.0013 & -0.2770 & -0.0127 \\ -0.4611 & 4.9645 & -0.0007 & 0.5206 & 0.0878 & -0.4102 \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

Se construye el esquema del sistema en lazo cerrado con el controlador por realimentación de estados diseñado en SIMULINK como se muestra en la Fig. 2.14.

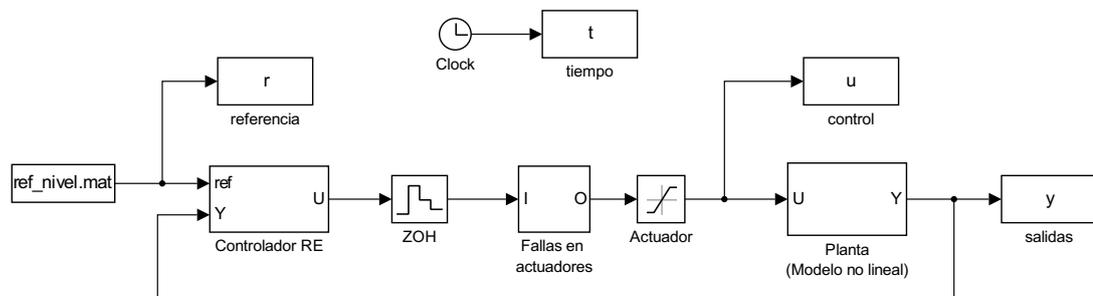


Figura 2.14: Diagrama del sistema de control en SIMULINK.

Desempeño del controlador por realimentación de estados

Para medir el desempeño del controlador por realimentación de estados diseñado se utilizan los siguientes índices: ISE (integral del error cuadrático), ISU (integral de la salida de control cuadrática), T_{es} (tiempo de establecimiento), M_p (sobrepulso) y e_{es} (error estacionario); los cuales fueron definidos en la Sección 1.4. Se considera un cambio tipo escalón en ambas referencias de forma simultánea, de una magnitud igual a 25 % del valor estacionario.

La respuesta temporal del sistema se puede observar en la Fig. 2.15 y los valores de los índices de desempeño calculados en la Tabla 2.4. Como era de esperarse el error estacionario es igual a cero y además no hay sobrepulso.

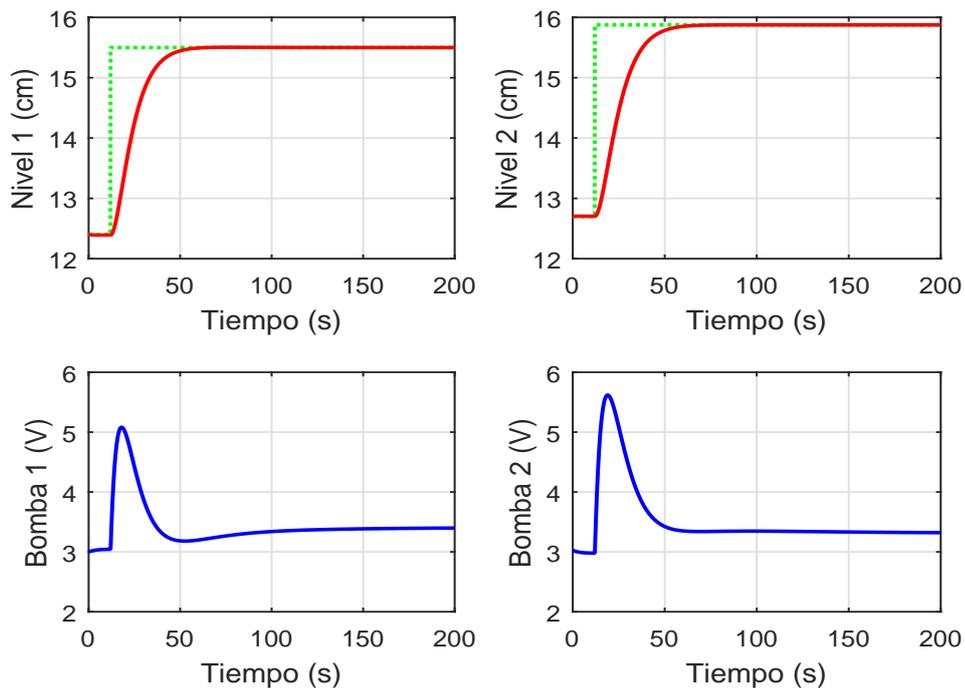


Figura 2.15: Respuesta temporal del controlador basado en realimentación de estados.

Tabla 2.4: Índice de desempeño para controlador por realimentación de estados.

Variable Controlada	ISE	ISU	$T_{es}(s)$	$M_p(\%)$	$e_{es}(\%)$
Nivel 1	784.5	300.8	25.1	0	0
Nivel 2	891.9	656.3	27.3	0	0

2.5.2. Control por matriz dinámica

Para el diseño del controlador DMC se necesita la respuesta paso (escalón) del sistema de cuatro tanques, la cual se obtiene del modelo no lineal y se muestra en la Fig. 2.16. La respuesta paso se genera luego de aplicar un escalón en la variable manipulada (cambio en el voltaje de entrada de 1 V de magnitud) al sistema en estado estacionario (ver Tabla 2.2). Recordar que se

esta trabajando con el sistema en fase mínima, es decir, el caudal hacia los tanques superiores es menor a los inferiores, de ahí que sea más fácil su control.

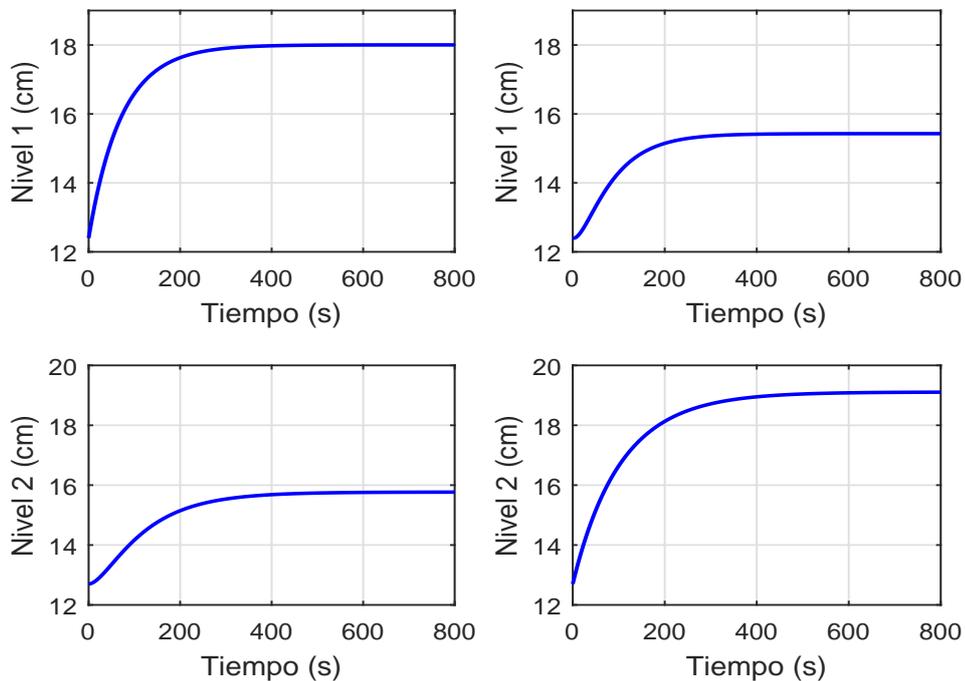


Figura 2.16: Respuesta paso del sistema de cuatro tanques para un cambio en el voltaje de la bomba 1 (izquierda) y bomba 2 (derecha).

Existen algunos trabajos de investigación con respecto a la sintonización de controladores DMC, como por ejemplo en Shridhar y Cooper (1998) se presenta una estrategia de sintonización para sistemas MIMO. Sin embargo, con esta estrategia generalmente se obtienen valores grandes para el horizonte de predicción P y horizonte de control M , con lo cual computacionalmente se complica el algoritmo. En Garriga y Soroush (2010) existe una recopilación de métodos de sintonización para sistemas SISO y MIMO, y en Reverter et al. (2014) se brinda algunas recomendaciones para los parámetros de sintonización de controladores DMC para sistemas SISO, las cuales sugieren valores más pequeños en el horizonte de predicción P y control M con respecto a otros métodos pero con similar rendimiento.

En base a las recomendaciones de Shridhar y Cooper (1998) y Reverter et al. (2014) los parámetros del controlador DMC se calculan de la siguiente manera:

1. Aproximar la dinámica del proceso para cada par entrada-salida (r entradas y m salidas) como modelos de primer orden con tiempo muerto (FOPDT⁵).

$$\frac{y_j(s)}{u_i(s)} = \frac{K_{ji}e^{-\theta_{ji}s}}{\tau_{ji}s + 1} \quad (j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, r) \quad (2.96)$$

⁵Por sus siglas en inglés, *First-Order Plus Dead Time*

2. Seleccionar el tiempo muestreo lo más cerca posible a:

$$\begin{aligned} T_{ji} &= \text{máx}(0.1\tau_{ji}, 0.5\theta_{ji}) \\ T &= \text{mín}(T_{ji}) \end{aligned} \quad (2.97)$$

3. Calcular el horizonte de predicción, P :

$$P = \text{máx} \left(\frac{\tau_{ji}}{T} + k_{ji} \right) \quad (2.98)$$

donde

$$k_{ji} = \left(\frac{\theta_{ji}}{T} + 1 \right) \quad (j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, r) \quad (2.99)$$

4. Calcular los horizontes de modelo N_{ji} :

$$N_{ji} = P + \text{máx} \left(\frac{T_{es}^{ji}}{T} \right) \quad (2.100)$$

5. Elegir los pesos de la matriz R con el fin de compensar los diferentes rangos en las variables de salidas. También se pueden pesar las variables de salida de acuerdo a su grado de importancia, teniendo mayores pesos las variables más importantes. Igualmente, los pesos de las entradas de control, dado por la matriz Q , se eligen según su importancia relativa. Incrementando el valor de sus pesos provoca magnitudes menores de los incrementos de la señal de control.
6. El horizonte de control M se determina por ensayo y error, teniendo en cuenta que conforme aumenta su valor, la respuesta es más agresiva y el esfuerzo computacional es mayor. Por lo tanto, se elige como el menor valor posible que permita obtener una respuesta satisfactoria.

De las recomendaciones anteriores, se obtuvieron los siguientes parámetros para el controlador DMC: tiempo de muestreo $T_{s,DMC} = 4 \text{ s}$, horizonte de predicción $P = 37$, horizonte de control $M = 2$, horizontes del modelo $N_{11} = 93$, $N_{12} = 98$, $N_{21} = 123$ y $N_{22} = 118$. Como las variables de salida (nivel de los tanques) tienen las mismas dimensiones (cm), los elementos de la matriz R son iguales a 1. Los pesos para la señal de control son iguales a 1.4 y 1.2 para las variables manipuladas 1 y 2, respectivamente. El objetivo de control era lograr que la respuesta temporal tenga error estacionario igual a cero y no haya sobreimpulso, con el menor tiempo de establecimiento posible.

Desempeño del controlador DMC

Similarmente a lo que hizo con el controlador por realimentación de estados, se obtiene la respuesta para un cambio tipo escalón simultáneo en ambas referencias, de 25 % de magnitud (del valor estacionario) y se calculan los índices de desempeño.

La respuesta temporal del sistema se puede observar en la Fig. 2.17 y los valores de los índices de desempeño calculados en la Tabla 2.5.

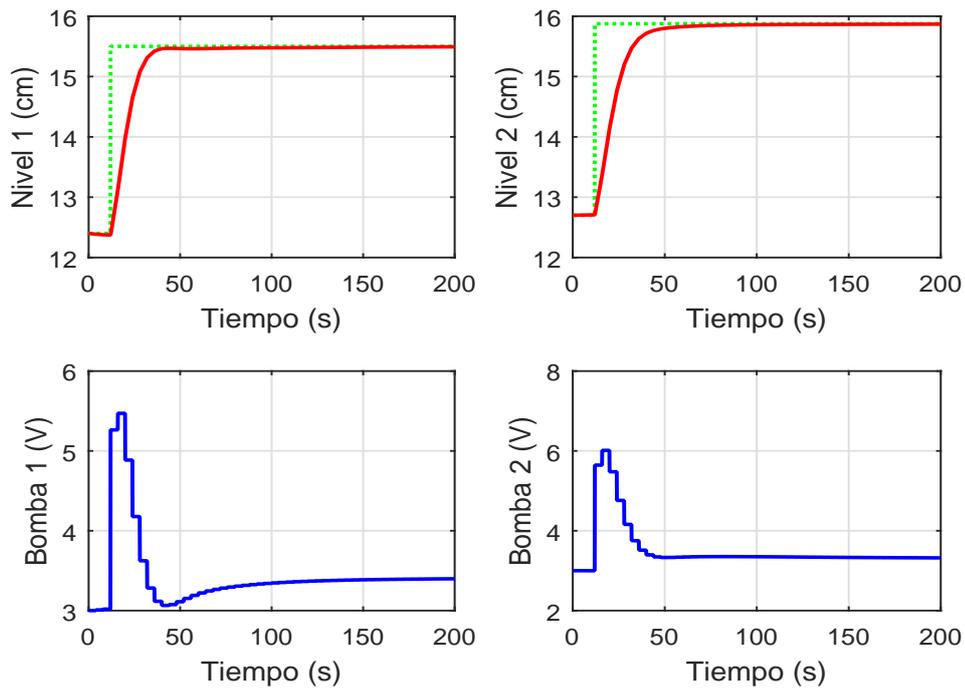


Figura 2.17: Respuesta temporal del controlador DMC.

Tabla 2.5: Índice de desempeño para controlador DMC.

Variable Controlada	ISE	ISU	$T_{es}(s)$	M_p	e_{es}
Nivel 1	542.8	468.9	17.6	0	0
Nivel 2	642.8	825.1	21.8	0	0

Comparando las Tablas 2.4 y 2.5, el controlador DMC tiene un mejor desempeño que el controlador por realimentación de estados, con un menor ISE y T_{es} , aunque el esfuerzo de control es mayor para el DMC (mayor ISU).

2.6. Representación de fallas

Durante la operación del sistema, fallas pueden afectar los sensores, actuadores, o componentes del sistema. Estas fallas pueden ocurrir como fallas aditivas o multiplicativas debido al mal funcionamiento o al envejecimiento de los equipos.

Para el FDI, usualmente se hace una distinción entre fallas aditivas y multiplicativas. Sin embargo, en FTC, el objetivo es compensar el efecto de la falla en el sistema independientemente de la naturaleza de la falla.

Las fallas que afectan un sistema a menudo son representadas como una variación de los parámetros del sistema. Por lo tanto, en presencia de una falla, el modelo del sistema puede ser

escrito como:

$$\begin{aligned}x_f(k+1) &= A_f x_f(k) + B_f u_f(k) \\y_f(k) &= C_f x_f(k)\end{aligned}\tag{2.101}$$

Donde las nuevas matrices del sistema en falla son definidas como:

$$A_f = A + \delta A; \quad B_f = B + \delta B; \quad C_f = C + \delta C.\tag{2.102}$$

δA , δB y δC corresponden a la desviación de los parámetros del sistema con respecto a sus valores nominales. Sin embargo, cuando una falla ocurre en el sistema, es muy difícil obtener en línea estas nuevas matrices.

El efecto de fallas en actuadores y sensores pueden también representarse como un vector de entradas desconocidas adicional en la dinámica del sistema o en las mediciones (Noura et al., 2009).

Fallas en actuadores

Es importante mencionar que la falla en un actuador corresponde a la variación de la entrada de control global U aplicada al sistema y no solamente u (variable de desviación):

$$U_f = \Gamma U + U_{f0}\tag{2.103}$$

donde

- U es la entrada de control global normal aplicada al sistema.
- U_f es la entrada de control global ante una falla
- u es la variación de la entrada de control alrededor del punto de operación U_0 , ($u = U - U_0$, $u_f = U_f - U_0$).
- U_{f0} corresponde al efecto de una falla aditiva en el actuador (*bias*).
- ΓU representa el efecto de una falla multiplicativa en el actuador. Donde $\Gamma = \text{diag}(\alpha_i)$ es una matriz diagonal, y α_i permite modelar la *perdida de efectividad o degradación* del actuador “i” (ver tabla 2.6).

Tabla 2.6: Diferentes tipos de fallas en actuadores (Noura et al., 2009).

	Desviación constante $u_{f0i} = 0$	Desviación constante $u_{f0i} \neq 0$
$\alpha_i = 1$	Libre de falla	Bias
$0 < \alpha_i < 1$	Pérdida de efectividad	Pérdida de efectividad
$\alpha_i = 0$	Fuera de servicio	Actuador bloqueado

En presencia de una falla en el actuador, el sistema linealizado (Ec. 2.35) puede expresarse como:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + B(\Gamma U(k) + U_{f0} - U_0) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{2.104}$$

La ecuación anterior puede también escribirse como:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B[(\Gamma - I)U(k) + U_{f0}] \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{2.105}$$

Definiendo $f_a(k)$ como un vector de entradas desconocidas que corresponde a fallas en los actuadores, la Ec. 2.101 puede representarse como:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_a f_a(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\tag{2.106}$$

Donde $F_a = B$ y $f_a = (\Gamma - I)U + U_{f0}$. Si el i -ésimo actuador falla, entonces F_a es igual a la i -ésima columna de la matriz B y f_a corresponde a la magnitud de la falla que afecta este actuador.

Fallas en sensores

De una forma similar, considerando f_s como una entrada desconocida que representa la falla en sensores, el sistema lineal en falla puede representarse por:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) \\y(k) &= Cx(k) + F_s f_s(k)\end{aligned}\tag{2.107}$$

Representación de fallas en actuadores y sensores

En base a las Ec. 2.106 y 2.107, la representación en espacio de estados del sistema afectado por fallas en actuadores y sensores viene dada por:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_a f_a(k) \\y(k) &= Cx(k) + F_s f_s(k)\end{aligned}\tag{2.108}$$

Donde las matrices F_a y F_s se asumen conocidas, y f_a y f_s corresponde a la magnitud de las fallas en actuadores y sensores respectivamente. La magnitud y el tiempo en que ocurre la falla son completamente desconocidas.

La Ec. 2.108 puede representarse de forma unificada como:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_x f(k) \\y(k) &= Cx(k) + F_y f(k)\end{aligned}\tag{2.109}$$

Donde $f = \begin{bmatrix} f_a^T & f_s^T \end{bmatrix}^T \in \mathfrak{R}^v$ ($v = m + q$) es una representación común de fallas en sensores

y actuadores. $F_x \in \mathbb{R}^{n \times v}$ y $F_y \in \mathbb{R}^{q \times v}$ son las matrices de fallas en actuadores y sensores respectivamente, con $F_x = \begin{bmatrix} B & 0_{n,q} \end{bmatrix}$ y $F_y = \begin{bmatrix} 0_{q,m} & I_q \end{bmatrix}$.

El objetivo es aislar fallas. Para lograr esto se generan residuos sensibles a ciertas fallas e insensibles a otras, comúnmente llamado residuos estructurados. El vector de falla f en la ecuación anterior, puede separarse en dos partes. La primera parte contiene las “ d ” fallas que se van aislar, $f^0 \in \mathbb{R}^d$. En la segunda parte, las otras “ $v - d$ ” fallas se reúnen en el vector $f^* \in \mathbb{R}^{v-d}$. Entonces, el sistema puede representarse como:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_x^0 f^0(k) + F_x^* f^*(k) \\ y(k) &= Cx(k) + F_y^0 f^0(k) + F_y^* f^*(k) \end{aligned} \quad (2.110)$$

Donde las matrices F_x^0 , F_x^* , F_y^0 y F_y^* se asumen son conocidas.

Con el fin de detectar y aislar una falla en particular f^0 entre otras, se construye un conjunto de residuos el cual es requerido para aislar fallas, y los residuos son generados usando el esquema de desacoplo de entradas desconocidas, en el cual, los residuos son sensibles al vector de falla f^* e insensible a f^0 . Se asume que solo una falla ocurre en un tiempo dado (no hay fallas simultáneas), por lo que el vector f^0 es un escalar ($d = 1$) y es considerado como una entrada desconocida. La condición necesaria para la existencia de residuos desacoplados de acuerdo a Hou y Muller (1994) es: el número de entradas desconocidas debe ser menor o igual que el número de mediciones ($d \leq q$).

El esquema de desacoplo puede utilizarse tanto para fallas en actuadores, como en sensores. Sin embargo, la presente tesis solo trabaja con el caso de fallas en actuadores.

Sistema libre de fallas en sensores

En caso de una falla en el actuador i -ésimo (no hay falla en los sensores) el sistema puede ser representado por:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + B_i f^0(k) + \begin{bmatrix} \bar{B}_i & 0_{n,m} \end{bmatrix} f^*(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (2.111)$$

Donde la matriz B_i es la columna i -ésima de la matriz B y \bar{B}_i es la matriz B sin la columna i -ésima.

La Ec. 2.111 puede representarse como:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + F_d f_d(k) + F_x^* f^*(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (2.112)$$

Donde f^0 se denota como f_d y es el vector de entrada desconocida y también $F_d = B_i$.

Bajo el enfoque del FTC, una vez que el módulo FDI indica que actuador ha fallado, la magnitud de la falla debe ser estimada y una nueva ley de control debe establecerse para compensar el efecto de la falla en el sistema. En esta tesis, se asume que solo una falla ocurre en un tiempo dado, ya que la presencia de fallas simultáneas no es una situación muy común Chen y Patton (1999).

2.7. Conclusiones parciales

- Se desarrolló el modelo matemático del sistema de cuatro tanques acoplados en base a las ecuaciones de balance de masa y Bernoulli para cada tanque.
- Se desarrolló la teoría correspondiente al diseño del sistema de control: control por realimentación de estados y control por matriz dinámica (DMC). Se simularon ambos controladores obteniéndose una respuesta sin sobreimpulso y con error estacionario igual a cero, y además con un tiempo de establecimiento menor a 30 s.
- Se modelaron las fallas parciales en los actuadores (pérdida de efectividad) y se obtuvo el modelo del sistema con falla.



CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL SISTEMA DE DIAGNÓSTICO Y CONTROL TOLERANTE A FALLAS

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta la metodología para el diseño del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores. El diagnóstico de fallas (detección, aislamiento y estimación) se basa en la técnica de *observador de entrada desconocida*; por lo tanto, se presentan las condiciones suficientes y necesarias para la existencia de este observador. El sistema de control tolerante a fallas utiliza la técnica de *compensación aditiva de fallas*, la cual consiste en calcular una acción de control adicional (en base a la estimación de la falla) y adicionarla a la señal de control que envía el controlador. Finalmente, se simula y compara el desempeño del controlador con y sin compensación de fallas.

3.2. Diagnóstico de fallas basado en modelo

3.2.1. Generalidades

Después de diseñar el sistema de control (Sec. 2.4), el segundo paso es monitorear el comportamiento del sistema para detectar y aislar cualquier tipo de falla (FDI) tan pronto como sea posible. El FDI permite evitar condiciones críticas en la planta debido a la falla, y ayuda en la toma de decisión de si parar la planta o que esta siga operando en un modo degradado a pesar de la presencia de la falla.

El diagnóstico de fallas a partir de métodos de tendencias de datos es a menudo difícil (Noura et al., 2009). Esto debido a la dificultad de poder extraer información relevante a partir de inmensas bases de datos, para las cuales se tienen que utilizar técnicas que demandan un alto esfuerzo computacional (un resumen detallado de dichas técnicas pueden encontrarse en Venkatasubramanian et al. (2003a)). Sin embargo, estos métodos tienen la gran ventaja de no necesitar un modelo del sistema, que es el caso de plantas industriales complejas como las plantas petroquímicas (Kiran et al., 2012). Por lo tanto, ya que se cuenta con un modelo matemático del proceso de cuatro tanques solo se consideran las técnicas FDI basado en modelos.

El objetivo del diagnóstico de fallas es realizar dos tareas principales: detectar la falla, la cual consiste en decidir si la falla ha ocurrido o no, y aislar la falla, la cual consiste en decidir que elemento(s) del sistema ha fallado (sensor, actuador o proceso). El procedimiento general consiste de tres pasos:

1. **Generación de residuos:** es el proceso de comparar la salida real de la planta con la salida estimada por el modelo. Se denota como r y se calcula como $r = y - \hat{y}$.
2. **Evaluación de residuos:** es el proceso de comparar los residuos con determinados umbrales basados en una prueba estadística o en la norma del residuo, generándose así los síntomas $S(r)$.
3. **Toma de decisión:** es el proceso de decidir a través de un indicador, denotado como I , basado en los síntomas $S(r)$, que elementos han fallado (aislamiento).

Esto implica el diseño de residuos r que son cercanos a cero ($r \approx 0$) cuando no hay fallas ($f = 0$), pero que se desvían de cero ($r \neq 0$) cuando si hay fallas ($f \neq 0$). Por lo tanto, los residuos tienen la habilidad de poder discriminar si ha ocurrido una falla o no.

Si bien un solo residuo puede ser suficiente para detectar una sola falla, un conjunto de residuos estructurados es necesario para poder aislar la falla. Para poder aislar fallas, algunos residuos se hacen sensibles con ciertas fallas e insensibles con otras. Es decir, basado en la Ec. 2.112, $r = 0$ si $f^* = 0$ y $r \neq 0$ si $f \neq 0$, independientemente de otras fallas definidas como f_d . Entonces, para poder aislar y estimar fallas en los actuadores se necesita un banco de observadores de residuos estructurados, donde cada vector de residuos r puede ser usado para detectar una determinada falla de acuerdo a un método estadístico, como por ejemplo la prueba de Page-Hinkey, prueba de control de límites, prueba de razón de verosimilitud, análisis de tendencias de datos, etc (Noura et al., 2009). También pueden usarse métodos basados en la norma del vector de residuos, como por ejemplo el método del Valor Pico, Raíz de la Media Cuadrática (RMS), etc (Ding, 2008). En la presente tesis se utiliza los métodos basados en la norma.

El vector de salida de la evaluación de residuos, llamado vector de coherencia S_r , se construye a partir de un banco de v residuos:

$$S_r = \left[S(\|r_1\|) \dots S(\|r_v\|) \right]^T \quad (3.1)$$

Donde $S(\|r_j\|)$ representa un síntoma asociado con la norma del vector de residuos r_j . Esta es una simple variable binaria y trabaja de acuerdo a la siguiente lógica:

$$\begin{aligned} \|r(t)\| \leq \text{Umbral} & \text{ para } f(t) = 0, \text{ entonces } S(\|r(t)\|) = 0 \text{ (libre de falla),} \\ \|r(t)\| > \text{Umbral} & \text{ para } f(t) \neq 0, \text{ entonces } S(\|r(t)\|) = 1 \text{ (falla detectada).} \end{aligned}$$

Después, el vector de coherencia se compara con el vector de firma de fallas $S_{(ref, f_j)}$ asociado con la j -ésima falla de acuerdo a los residuos generados para ser sensibles a todas las fallas menos una, como se representa en la tabla 3.1 según Noura et al. (2009). La decisión se hace de acuerdo a una simple prueba lógica que se describe como sigue: un indicador $I(f_j)$ es igual a 1 si S_r es igual a la j -ésima columna de la matriz de incidencia (S_{ref, f_j}), sino es igual 0. El elemento asociado con el indicador igual a 1 es entonces el que está en falla.

Tabla 3.1: Matriz de firma de fallas

S_r	No hay fallas	S_{ref,f_1}	S_{ref,f_2}	...	S_{ref,f_v}	Otras fallas
$S(\ r_1\)$	0	0	1	...	1	1
$S(\ r_2\)$	0	1	0	...	1	1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\ddots	\vdots	\vdots
$S(\ r_v\)$	0	1	1	...	0	1

3.2.2. Detección y aislamiento de fallas

3.2.2.1. Generación de residuos

Basado en la Ec. 2.112, varios enfoques han sido sugeridos para generar un conjunto de residuos llamados *residuos estructurados* para detectar y aislar fallas (Gertler, 1998). Se considera la teoría y diseño de *observadores de entrada desconocida* (UIO), la cual es desarrollada de acuerdo a Chen y Patton (1999) debido a que no solo sirve para detectar y aislar fallas, sino que también para estimar la magnitud de las fallas.

La definición de un observador de entrada desconocida (Chen y Patton, 1999) se da a continuación:

Definición 3.1. *Un observador es definido como de entrada desconocida para el sistema definido por la Ec. 2.112 ($f^* = 0$), si su vector de error de estimación de estados e_x converge asintóticamente a cero, independientemente de la presencia de la entrada desconocida f_d (perturbación) en el sistema.*

El observador UIO de orden completo se construye como sigue:

$$\begin{aligned} w(k+1) &= Ew(k) + TBu(k) + K_{12}y(k) \\ \hat{x}(k) &= w(k) + Hy(k) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado estimado y $w \in \mathbb{R}^n$ es el estado de este observador de orden completo, obtenido por la transformación lineal $w = Tx$. Las matrices E, T, K_{12} y H son matrices diseñadas para lograr el desacoplamiento de la entrada desconocida f_d (ver Ec. 2.112).

De acuerdo a Chen y Patton (1999) la entrada desconocida puede ser usada para describir perturbaciones aditivas así como diferentes tipos de incertidumbres del modelo, por ejemplo: ruido, términos no lineales en la dinámica del sistema, términos que surgen de la dinámica del sistema variante en el tiempo, errores de linealización, etc. En la presente tesis, la falla en el actuador es tratada como una entrada desconocida. Si existieran otras perturbaciones, el vector f_d debería incluir las fallas y las perturbaciones.

En base a la Ec. 2.112, f_d contiene la falla que no será detectada y f^* contiene las fallas que serán monitoreadas por el sistema de diagnóstico de fallas (no hay fallas en sensores). El vector de error de estimación de estados ($e_x = x - \hat{x}$) y el vector de residuos vienen definidos por:

$$\begin{aligned}
e_x(k+1) &= x(k+1) - \hat{x}(k+1) \\
&= Ax(k) + Bu(k) + F_d f_d(k) + F_x^* f^*(k) - Ew(k) - TBu(k) - K_1 y(k) \\
&\quad - K_2 y(k) - HCAx(k) - HCBu(k) - HCF_d f_d(k) - HCF_x^* f^*(k) \\
&= (A - HCA - K_1 C)x(k) + (A - HCA - K_1 C)(\hat{x}(k) - \hat{x}(k)) \\
&\quad + (I - T - HC)Bu(k) + (I - HC)F_d f_d(k) + (I - HC)F_x^* f^*(k) \\
&\quad - Ew(k) - K_2 y(k) + (A - HCA - K_1 C)(Hy(k) - Hy(k)) \\
&= (A - HCA - K_1 C)(x(k) - \hat{x}(k)) + (A - HCA - K_1 C)(\hat{x}(k) - Hy(k)) \\
&\quad + ((I - HC) - T)Bu(k) + (I - HC)F_d f_d(k) + (I - HC)F_x^* f^*(k) \\
&\quad - Ew(k) + ((A - HCA - K_1 C)H - K_2)y(k) \\
&= (A - HCA - K_1 C)e_x(k) + ((A - HCA - K_1 C) - E)w(k) \\
&\quad + ((I - HC) - T)Bu(k) + (I - HC)F_d f_d(k) + (I - HC)F_x^* f^*(k) \\
&\quad + ((A - HCA - K_1 C)H - K_2)y(k)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

donde

$$K_{12} = K_1 + K_2 \tag{3.4}$$

y

$$r(k) = y(k) - C\hat{x}(k) = (I - CH)y(k) - Cw(k) \tag{3.5}$$

Si se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
T &= I - HC \\
TF_d &= 0 \\
E &= TA - K_1 C \\
K_2 &= EH
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Entonces, la Ec. 3.3 se convierte en:

$$e_x(k+1) = Ee_x(k) + TF_x^* f^*(k) \tag{3.7}$$

Si los autovalores de la matriz E son estables, y asumiendo que $f^* = 0$, el error de estimación de estados e_x convergerá a cero asintóticamente, es decir $\hat{x} \rightarrow x$, por lo tanto $r(k) = Ce_x(k)$. Esto significa que el residuo será insensible a la falla f_d , y por lo tanto $r(k) = 0$ si $f^*(k) = 0$, mientras que $r(k) \neq 0$ si $f^*(k) \neq 0$ para todo $u(k)$ y $f_d(k)$.

Asumiendo que se satisfacen las condiciones definidas en la Ec. 3.6, una solución particular es (Chen y Patton, 1999):

$$H = F_d [(CF_d)^T (CF_d)]^{-1} (CF_d)^T \tag{3.8}$$

Teorema 3.1. *Las condiciones necesarias y suficientes para la existencia de un UIO de orden*

completo definido por la Ec. 3.2 para el sistema definido por la Ec. 2.112 ($f^* = 0$) son:

- (I) $\text{rango}(CF_d) = \text{rango}(F_d)$
- (II) (C, A_1) es un par detectable, donde $A_1 = TA$

Observación 3.1. La detectabilidad es una condición más débil que la observabilidad. Un par (C, A_1) es detectable cuando todos los modos (autovalores) no observables para este par son estables (Chen y Patton, 1999; Marín y Díaz, 2009).

En el Teorema 3.1, la condición (I) significa que el máximo número de entradas desconocidas que pueden desacoplarse está limitado al número de mediciones. La condición (II) es equivalente a la condición que todos los modos no observables del sistema son estables. Los modos restantes son estabilizados por la ganancia K_1 , la cual se elige para estabilizar la matriz dinámica F (Sotomayor y Odloak, 2005).

El diagrama esquemático del observador de entrada desconocida se muestra en la Fig. 3.1.

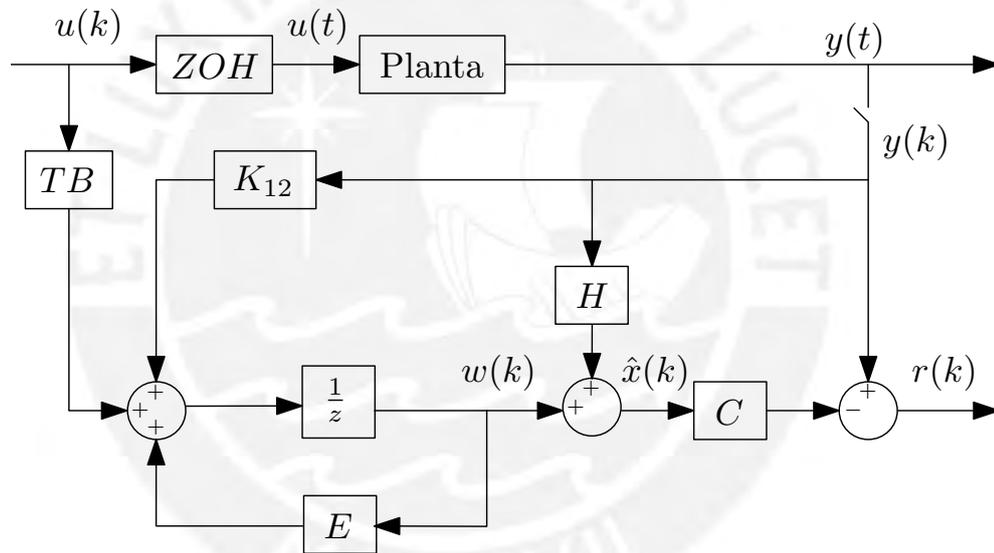


Figura 3.1: Esquema del observador de entrada desconocida (UIO).

Uno de los pasos más importantes en el diseño del UIO es estabilizar $E = A_1 - K_1C$ mediante la elección de la matriz K_1 , cuando el par (C, A_1) es detectable. Si (C, A_1) es observable, esto se puede lograr fácilmente usando la técnica de ubicación de polos. Para el caso que (C, A_1) no es observable se tiene que seguir el procedimiento dado en Chen y Patton (1999). El diagrama de flujo para el diseño del UIO se muestra en la Fig. 3.2.

3.2.2.2. Evaluación de residuos

La evaluación de residuos es importante con el fin de lograr un eficiente y confiable sistema de detección y aislamiento de fallas (FDI). Se asume que un vector de residuos, $r \in \mathbb{R}^{k_r}$ está disponible. A continuación se describen algunas funciones de evaluación estándares según (Ding, 2008):

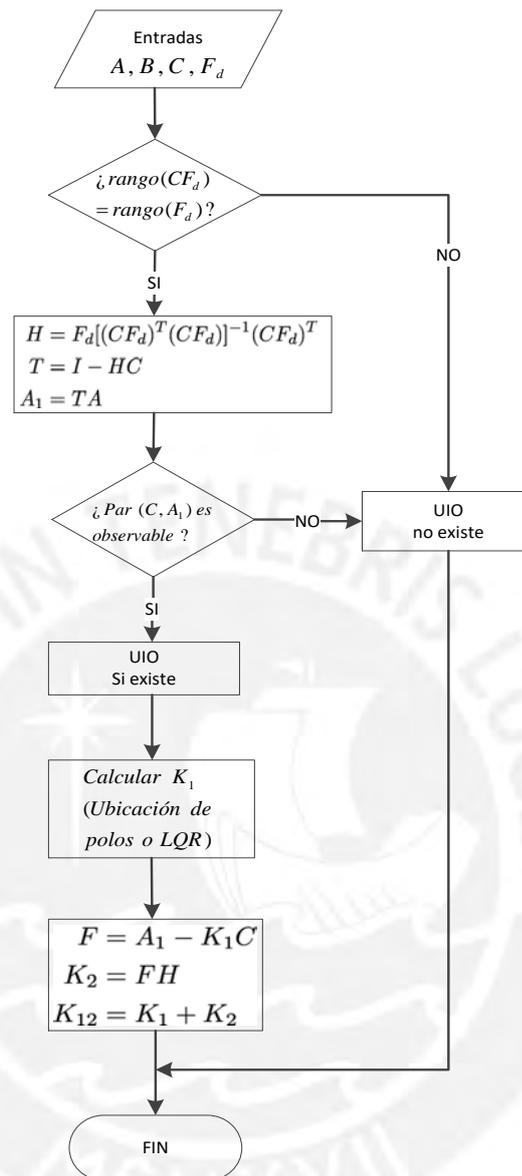


Figura 3.2: Diagrama de flujo para el UIO.

Valor Pico

El valor pico de un residuo r en tiempo discreto viene dado por:

$$J_{pico} = \|r(k)\| = \left(\sum_{i=1}^{k_r} r_i^2(k) \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

El valor pico de r es exactamente el valor pico de la norma de r . Usando el valor pico de r se puede detectar una falla de acuerdo a la siguiente lógica:

$$\begin{aligned} J_{pico} > J_{umb,pico} &\Rightarrow \text{se detecta una falla} \\ J_{pico} \leq J_{umb,pico} &\Rightarrow \text{libre de falla} \end{aligned}$$

donde el umbral, $J_{umb,pico}$, se define como el valor máximo de J_{pico} , es decir:

$$J_{umb,pico} = \text{máx}(J_{pico}) \quad (3.10)$$

Valor Promedio

El valor promedio de un residuo r en tiempo discreto viene dado por:

$$J_{promedio} = \bar{r}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r(k+j) \quad (3.11)$$

y además:

$$J_{umb,promedio} = \text{máx}(J_{promedio}) \quad (3.12)$$

Similarmente, la lógica para detectar una falla es:

$$\begin{aligned} J_{promedio} > J_{umb,promedio} &\Rightarrow \text{se detecta una falla} \\ J_{promedio} \leq J_{umb,promedio} &\Rightarrow \text{libre de falla} \end{aligned}$$

A menudo se utiliza la forma *modificada del valor promedio* definida por:

$$\bar{r}(k+1) = (1-\beta)\bar{r}(k) + r(k) \quad (3.13)$$

donde $0 \ll \beta < 1$.

Valor de la raíz de la media cuadrática o Valor RMS

El Valor RMS de r es definido en tiempo discreto como:

$$J_{RMS} = \|r(k)\|_{RMS} = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \|r(k+j)\|^2 \right)^{1/2} \quad (3.14)$$

J_{RMS} mide la energía promedio de r sobre el intervalo de tiempo $(k, k+N)$. Sea el umbral

$$J_{umb,RMS} = \text{máx}(J_{RMS}) \quad (3.15)$$

entonces la lógica de detección es:

$$\begin{aligned} J_{RMS} > J_{umb,RMS} &\Rightarrow \text{se detecta una falla} \\ J_{RMS} \leq J_{umb,RMS} &\Rightarrow \text{libre de falla} \end{aligned}$$

3.2.3. Estimación de fallas en actuadores basado en observadores UIO

De acuerdo al aislamiento de la falla, la magnitud de la falla se hace directamente del j -ésimo observador de entrada desconocida el cual es construido para ser insensible a la falla j -ésima (cuando $f^*(k) = 0$). Basado en el observador de entrada desconocida, la sustitución de la estimación del estado en el sistema en falla representado por la Ec. 2.112 se obtiene:

$$F_d f_d(k) = \hat{x}(k+1) - A\hat{x}(k) - Bu(k) \quad (3.16)$$

En presencia de la falla en el actuador, F_d es una matriz de rango columna completo. Por lo tanto, la estimación de la magnitud de la falla \hat{f}_d se puede calcular haciendo uso de la descomposición en valores singulares (SVD).

Sea $F_d = U \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} V^T$ la SVD de F_d , entonces, R es una matriz diagonal y U y V son matrices ortonormales. Usando la SVD y sustituyendo en la Ec. 3.16 tenemos:

$$\tilde{x}(k+1) = \bar{A}\tilde{x}(k) + B\bar{u}(k) + \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} V^T f_d(k) \quad (3.17)$$

donde

$$\hat{x}(k) = U\tilde{x}(k) = U \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$\bar{A} = U^{-1}AU = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11}(k) & \bar{A}_{12}(k) \\ \bar{A}_{21}(k) & \bar{A}_{22}(k) \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

y

$$\bar{B} = U^{-1}B = \begin{bmatrix} \bar{B}_1(k) \\ \bar{B}_2(k) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Basado en la Ec. 3.16, la estimación de la magnitud de la falla en el actuador se define como:

$$\hat{f}_d(k) = VR^{-1} (\tilde{x}_1(k+1) - \bar{A}_{11}\tilde{x}_1(k) - \bar{A}_{12}\tilde{x}_2(k) - \bar{B}_1 u(k)) \quad (3.21)$$

De la Ec. 3.21 se puede observar que la estimación de la magnitud de la falla \hat{f}_d en el instante k depende del valor \tilde{x}_1 en el instante $k+1$. Para evitar este problema, el calculo de la estimación de la falla se retrasa un periodo de muestreo (Noura et al., 2009).

3.3. Sistema de control tolerante a fallas en actuadores

El sistema de control tolerante a fallas en actuadores está basado en la técnica de *compensación aditiva de fallas* (Noura et al. (2009); Picó (2015); Puig et al. (2004)), que consiste en calcular una nueva ley de control u_{add} y adiccionarla a la ley de control nominal con el fin de anular el efecto de la falla en el sistema de lazo cerrado, tal que el comportamiento del sistema

sea al mismo que se obtiene con el controlador nominal.

El efecto de la falla en el actuador sobre el sistema en lazo cerrado se obtiene al sustituir la ley de control de realimentación de estados, dado por la Ec. 2.41 en Ec. 2.106:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= (A - BK_x)x(k) - BK_z z(k) + F_a f_a(k) \\y(k) &= Cx(k)\end{aligned}\quad (3.22)$$

Por lo tanto, debe calcularse una nueva ley de control u_{add} y esta debe sumarse a la calculada por el controlador con el fin de compensar el efecto de la falla en el sistema. Entonces, la ley de control total aplicada al sistema viene dado por:

$$u(k) = -K_x x(k) - K_z z(k) + u_{add}(k) \quad (3.23)$$

Considerando la nueva ley de control, la ecuación en lazo cerrado se convierte en:

$$x(k+1) = (A - BK_x)x(k) - BK_z z(k) + F_a f_a(k) + Bu_{add}(k) \quad (3.24)$$

A partir de esta ecuación, la ley de control que se adiciona u_{add} debe ser calculada tal que el sistema en falla este tan cerca como sea posible al nominal. En otras palabras, u_{add} debe satisfacer:

$$Bu_{add}(k) + F_a f_a(k) = 0 \quad (3.25)$$

Usando la estimación de la falla \hat{f}_a , la solución de la Ec. 3.25 puede obtenerse mediante la Ec. 3.26 si la matriz B ($B \in \mathfrak{R}^{n \times m}$) es de rango fila completo:

$$u_{add}(k) = -B^{-1} F_a \hat{f}_a(k) \quad (3.26)$$

Observación 3.2. La matriz B es de rango fila completo si el número de variables de estado es menor o igual al número de entrada de control ($n \leq m$). Sin embargo, el caso donde $n < m$ no es muy común. En el caso donde $n = m$, la matriz B es cuadrada y es invertible (Noura et al., 2009).

Caso cuando la matriz B no es de rango fila completo

En el caso cuando la matriz B no es de rango fila completo, es decir, el número de entradas del sistema es menor al número de estados del sistema, se debe elegir mantener tantas salidas prioritarias como entradas de control disponibles en perjuicio de otras salidas secundarias. En este caso se dice que la planta opera en modo degradado. El sistema original dado por la Ec. 2.106 puede descomponerse en:

$$\begin{bmatrix} x_p(k+1) \\ x_s(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{pp} & A_{ps} \\ A_{sp} & A_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_p \\ B_s \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} F_{ap} \\ F_{as} \end{bmatrix} f_a(k) \quad (3.27)$$

donde el subíndice p representa las variables de salida prioritarias, mientras s corresponde a las variables de salida secundarias. Es natural seleccionar tantas variables prioritarias como

entradas de control, lo cual significa que la matriz B_p es cuadrada. De este modo, la matriz de ganancias de realimentación de estado K_x también se descompone en $K_x = \begin{bmatrix} K_p & K_s \end{bmatrix}$ y la ley de control es dada por:

$$u(k) = - \begin{bmatrix} K_p & K_s & K_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p(k) \\ x_s(k) \\ z(k) \end{bmatrix} + u_{add}(k) \quad (3.28)$$

Sustituyendo (Ec. 3.28) en (Ec. 3.27) obtenemos:

$$\begin{aligned} x_p(k+1) &= (A_{pp} - B_p K_p) x_p(k) - B_p K_z z(k) \\ &+ (A_{ps} - B_p K_s) x_s(k) + F_{ap} f_a(k) + B_p u_{add}(k) \end{aligned} \quad (3.29)$$

y

$$\begin{aligned} x_s(k+1) &= (A_{ss} - B_s K_s) x_s(k) - B_s K_z z(k) \\ &+ (A_{sp} - B_s K_p) x_p(k) + F_{as} f_a(k) + B_s u_{add}(k) \end{aligned} \quad (3.30)$$

El efecto de la falla debe eliminarse en las variables prioritarias. Por lo tanto, de la Ec. 3.29, esto se puede lograr calculando la ley de control aditiva u_{add} que satisface:

$$(A_{ps} - B_p K_s) x_s(k) + F_{ap} f_a(k) + B_p u_{add}(k) = 0 \quad (3.31)$$

Entonces, la solución u_{add} de la Ec. 3.31 se obtiene usando la falla estimada \hat{f}_a :

$$u_{add} = -B_p^{-1} [(A_{ps} - B_p K_s) x_s(k) + F_{ap} \hat{f}_a(k)] \quad (3.32)$$

Aunque las variables secundarias no son compensadas, estas deben mantenerse estables cuando ocurre la falla. Para examinar estas variables, reemplazamos la Ec. 3.32 en la Ec. 3.30, obteniendo:

$$\begin{aligned} x_s(k+1) &= (A_{ss} - B_s B_p^{-1} A_{ps}) x_s(k) - B_s K_z z(k) \\ &+ (A_{sp} - B_s K_p) x_p(k) + (F_{as} - B_s B_p^{-1} F_{ap}) \hat{f}_a(k) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Es fácil ver que las variables secundarias son estables si y solo si los eigenvalores de la matriz $(A_{ss} - B_s B_p^{-1} A_{ps})$ pertenecen al círculo unitario (Noura et al., 2009).

La descomposición en variables de salida prioritarias y secundarias se lleva a cabo fuera de línea. Por lo tanto, la condición de estabilidad de las variables de salida secundarias puede verificarse. Si no se satisface, este método no puede ser aplicado.

El esquema global del sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas en actuadores se muestra en la Fig. 3.3. El modulo de detección y aislamiento de fallas (FDI) consiste de generación de residuos, evaluación de residuos y toma de decisión. El modulo de estimación consiste de la estimación de la magnitud de la falla en el actuador. El modulo de compensación consiste del cálculo de la nueva ley de control capaz de reducir el efecto de la falla en el sistema una vez que la falla es detectada y aislada.

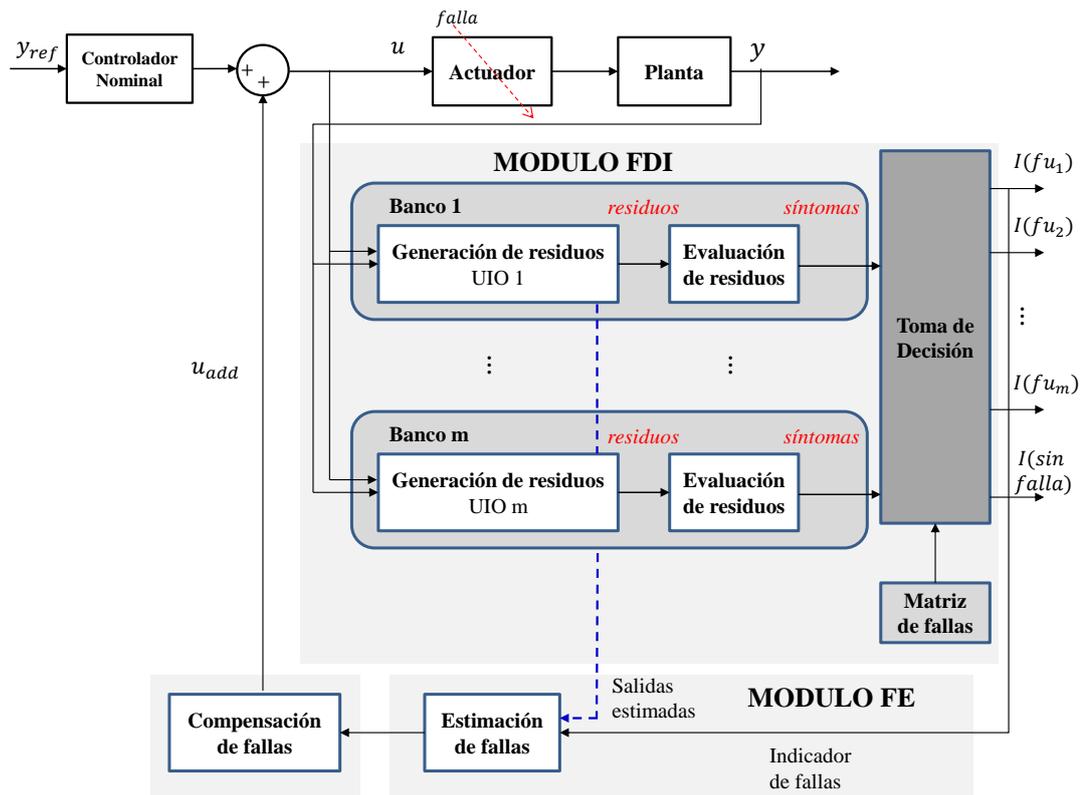


Figura 3.3: Esquema de diagnóstico y control tolerante a fallas en actuadores.

3.4. Simulación del sistema de control con y sin fallas

A continuación se simula la respuesta del sistema de lazo cerrado con y sin falla, con el objetivo de observar el efecto que provoca la falla en el sistema y evaluar el desempeño del sistema de control.

3.4.1. Control por realimentación de estados

Las señales de referencia corresponden a pequeños escalones de 25 % para los niveles de los tanques 1 y 2, los cuales excitan el sistema no lineal alrededor del punto de operación. Los diferentes cambios en las referencias tienen el objetivo de poder observar el efecto que tiene la falla en la respuesta de lazo cerrado y también la interacción entre las variables de entrada-salida. Además, se añadió ruido a las variables de salida con el fin que las simulaciones sean más reales. Este ruido tiene una magnitud adecuada para el sistema, media cero, y varianza igual a 0.1. En la planta real, si el ruido es alto, se debe filtrar la señal.

Respuesta del sistema libre de falla

En la Fig. 3.4 se representa la respuesta del sistema de lazo cerrado. Como se puede observar, el sistema de control por realimentación de estados ha sido diseñado correctamente ya que logra mantener los niveles de los tanques 1 y 2 en sus valores deseados. También se puede observar que el cambio de referencia para el nivel del tanque 1 afecta la dinámica del nivel del

tanque 2 y viceversa. Esto se debe a la interacción entre las variables de entrada-salida del sistema de cuatro tanques que es de naturaleza multivariable. Debido a esto, las entradas (señales de control) también son afectadas como se puede ver en la Fig. 3.5

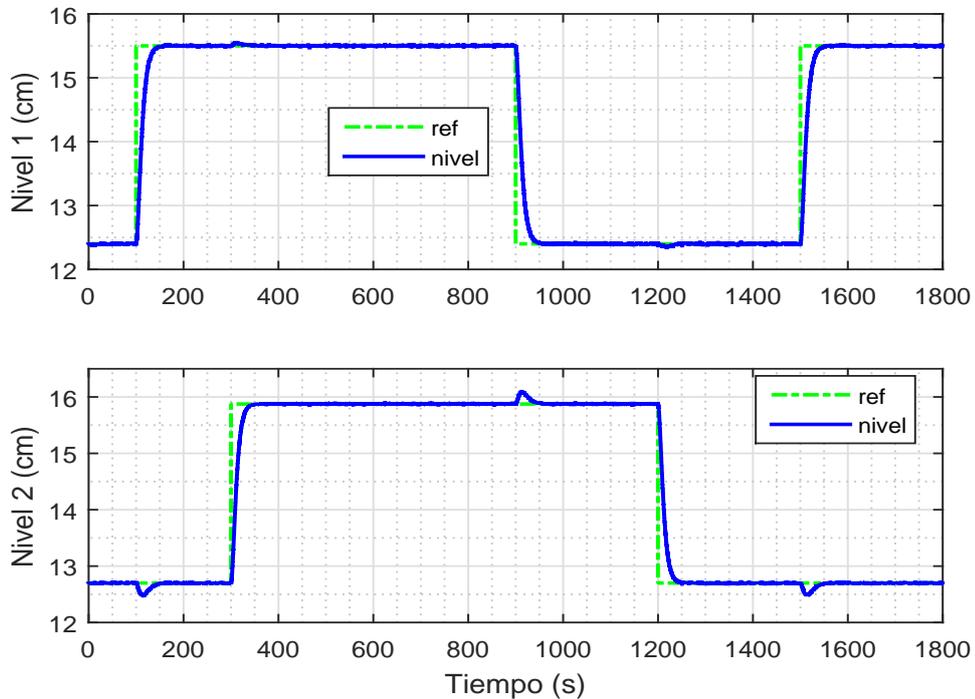


Figura 3.4: Salidas del sistema para el caso libre de falla (controlador basado en realimentación de estados).

Finalmente se muestran los niveles de los tanques superiores 3 y 4 en la Fig. 3.6. Aunque no sean variables controladas, siempre debe observarse sus valores y verificar que no superan su límite máximo para evitar sobrellenados. En nuestro caso, no se llegan a superar los límites máximos, y por lo tanto, en posteriores simulaciones los niveles 3 y 4 ya no se consideran.

Escenario de falla

Como ya se ha mencionado, la presente tesis trata con fallas parciales en actuadores conocidas como *pérdida de efectividad*, las cuales fueron modeladas en la sección 2.6.

Se simula una falla en el actuador 1 (bomba 1). La falla consiste de una pérdida de efectividad del actuador de 70% ($\alpha_1 = 0.3$) que aparece abruptamente en el instante de 400 s. Prácticamente, la entrada de control aplicada al sistema corresponde a la señal que envía el controlador multiplicada por una constante igual a 0.3.

$$U_{1,f} = \begin{cases} U_1 & \text{Si } t < 400, \\ 0.3U_1 & \text{Si } t \geq 400. \end{cases} \quad (3.34)$$

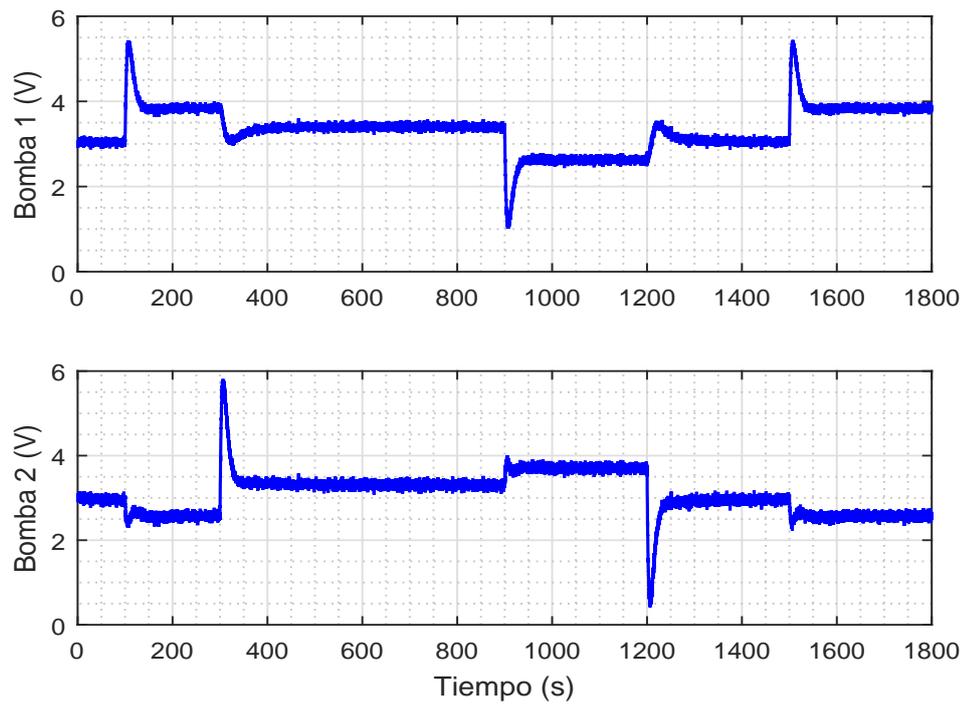


Figura 3.5: Entradas del sistema para el caso libre de falla.

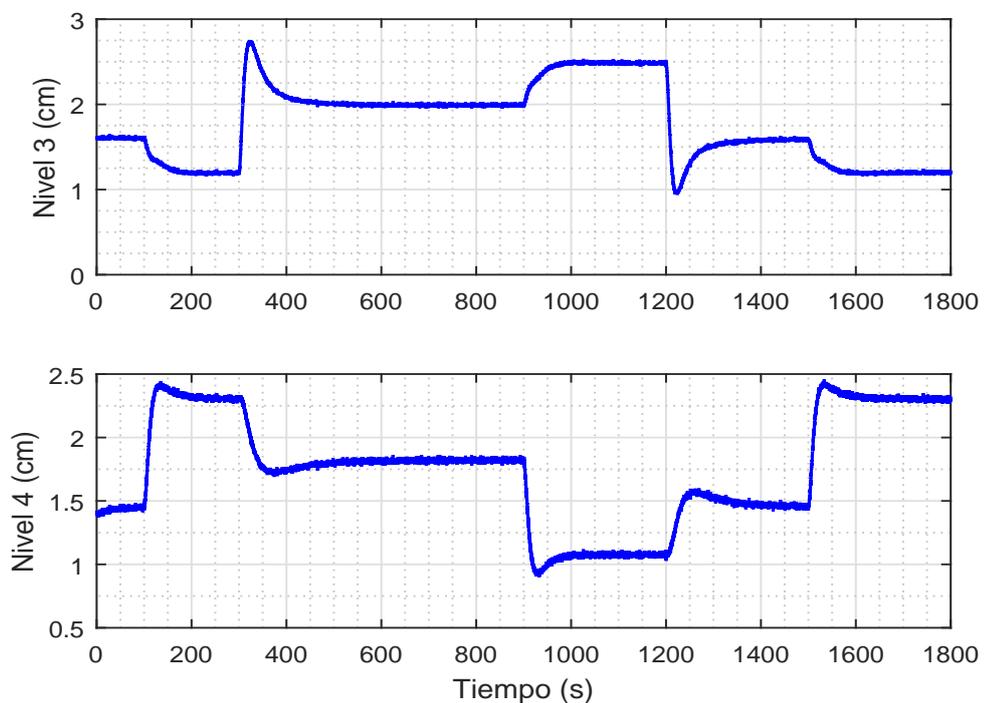


Figura 3.6: Salidas del sistema (no controladas) para el caso libre de falla.

Respuesta del sistema cuando ocurre una falla

En las Fig. 3.7 y Fig. 3.8 se muestra gráficamente el efecto de la falla en la respuesta del sistema de lazo cerrado y se compara con el caso sin falla.

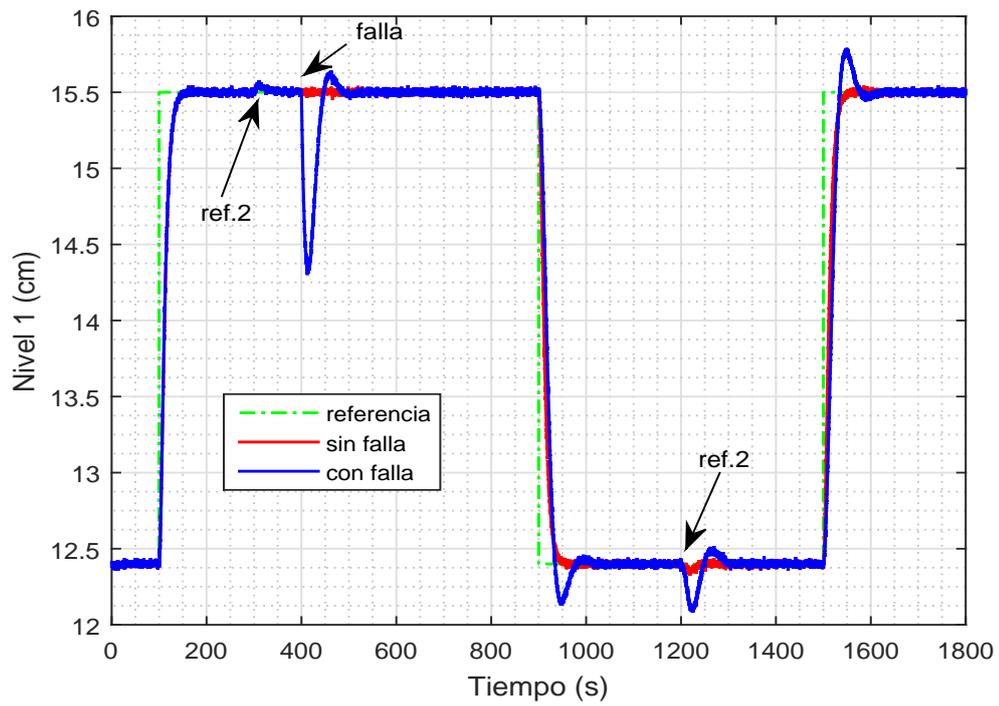


Figura 3.7: Nivel del tanque 1 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador basado en realimentación de estados).

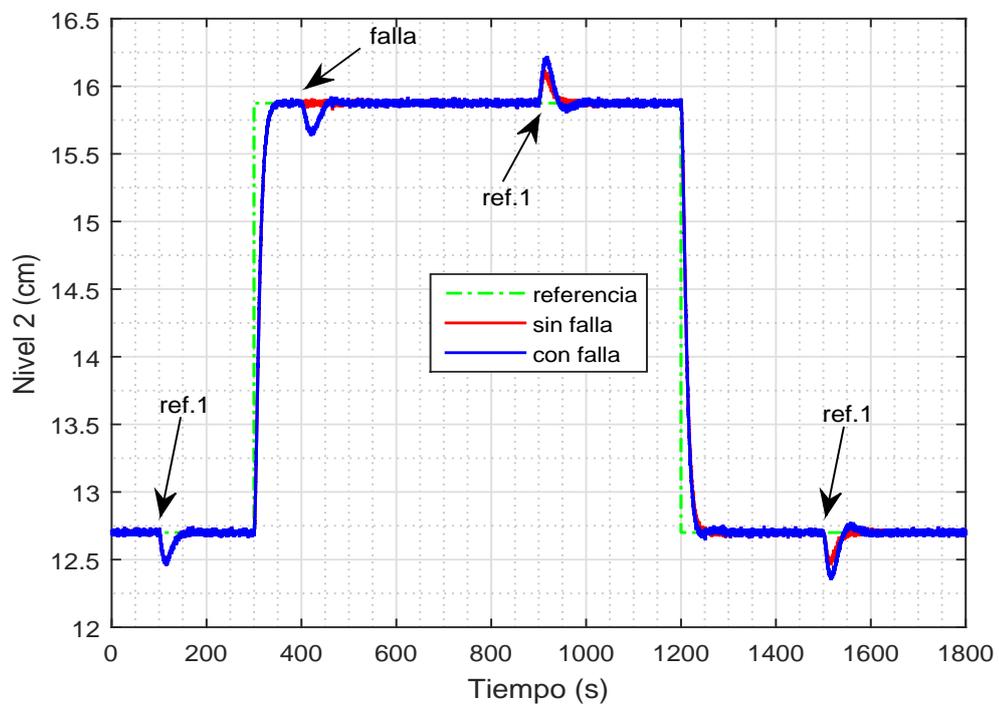


Figura 3.8: Nivel del tanque 2 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador basado en realimentación de estados).

Tabla 3.2: Desempeño del controlador por realimentación de estados con y sin falla.

ISE	Sin falla	Con falla
Nivel 1	2399.4	3499.2
Nivel 2	1603.3	1629.9

Tabla 3.3: Desempeño del controlador DMC con y sin falla.

ISE	Sin falla	Con falla
Nivel 1	1861.6	19312.6
Nivel 2	1527.8	4432.3

Como se puede ver en la Fig. 3.7 la falla provoca que el nivel en el tanque 1 se desvíe del valor de referencia, generando un sobreimpulso negativo. Ya que la falla en el actuador actúa sobre el sistema como una perturbación, el controlador nominal es capaz de hacer que el nivel de tanque 1 retorne a su valor de referencia, debido a la presencia de acción integral en el controlador. También el nivel del tanque 2 está siendo afectada por la falla en la bomba 1 como se observa en la Fig. 3.8, debido a la naturaleza multivariable de la planta, aunque en menor medida.

Se mide el desempeño del sistema de control con y sin falla a través del índice ISE, los cuales se muestran en la Tabla 3.2. Como se puede ver, la falla provoca que el desempeño del sistema de control se deteriore (aumenta el valor del índice ISE).

3.4.2. Control por matriz dinámica

Respuesta del sistema libre de fallas

En la Fig. 3.9 se muestra la respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC. Similarmente al controlador por realimentación de estados, el controlador DMC permite que las variables controladas (nivel de los tanques 1 y 2) sigan sus valores de referencia. También se observa que el cambio de referencia en un tanque afecta al otro, como resultado de la interacción de las variables de entrada-salida del sistema multivariable. Igualmente se observa en la Fig. 3.10 que las señales de control son afectadas.

Respuesta del sistema cuando ocurre una falla

En las Fig. 3.11 y 3.12 se presenta la respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC, cuando ocurre el mismo escenario de falla descrito en la sección anterior 3.4.1, es decir, un 70 % de pérdida de efectividad de la bomba 1. Como se puede observar, el desempeño del controlador DMC se deteriora bastante, e incluso peor que el sistema de control basado en realimentación de estados. Esto se debe a que cuando ocurre la falla, el modelo de respuesta ya no predice correctamente. Además, tanto el nivel del tanque 1 como del tanque 2 son afectados notoriamente, aunque este último en menor grado. El desempeño del controlador DMC con y sin falla se comparan y se muestran en la Tabla 3.3.

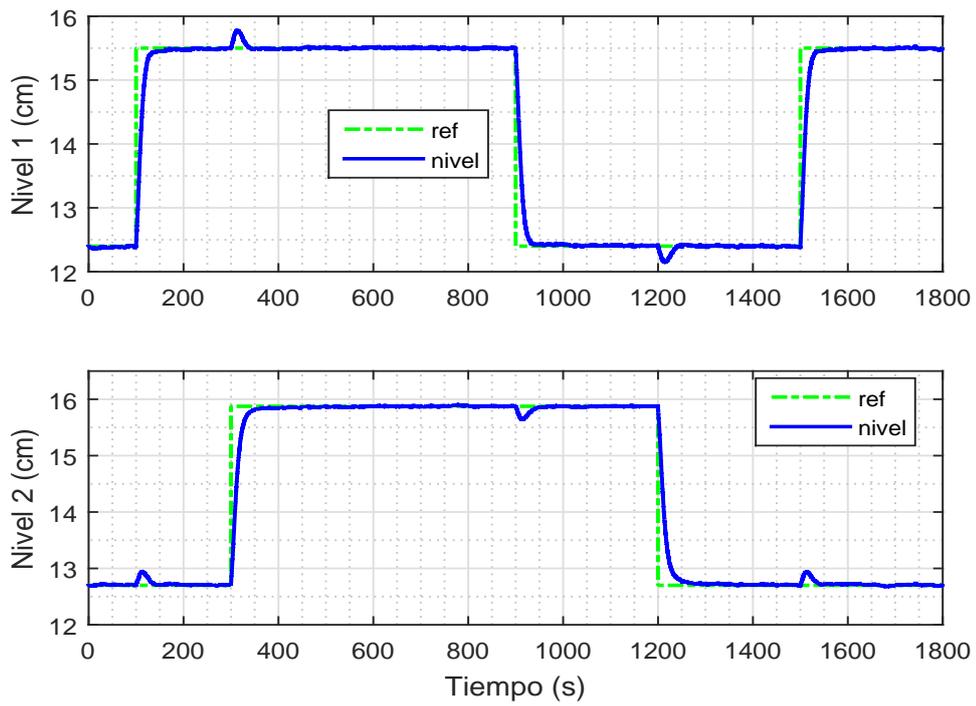


Figura 3.9: Salidas del sistema para el caso libre de falla (controlador DMC).

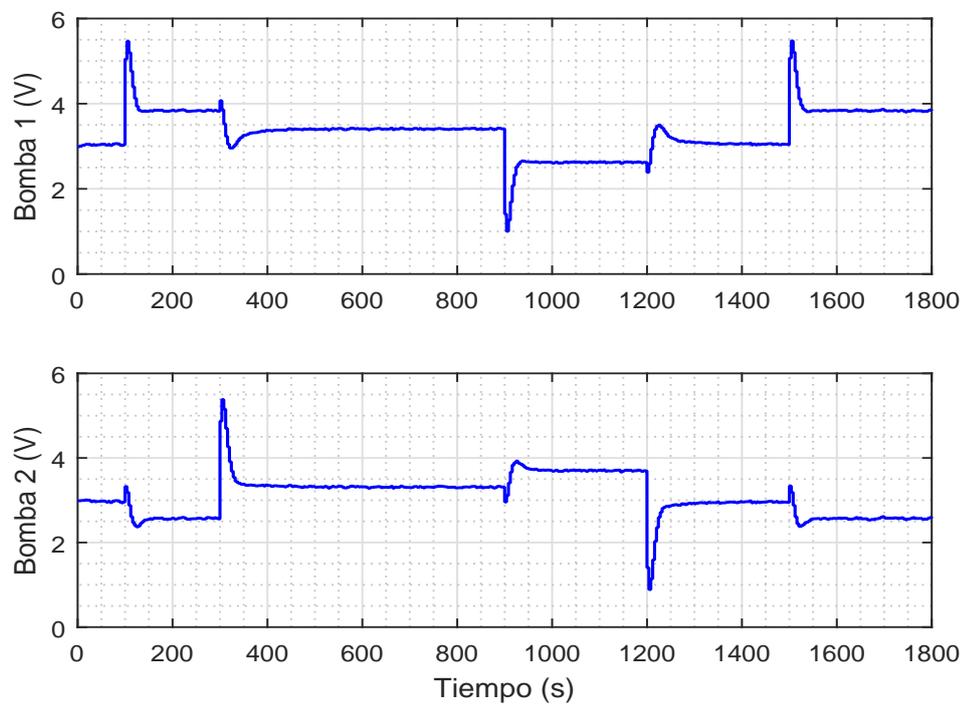


Figura 3.10: Entradas del sistema para el caso libre de falla (controlador DMC).

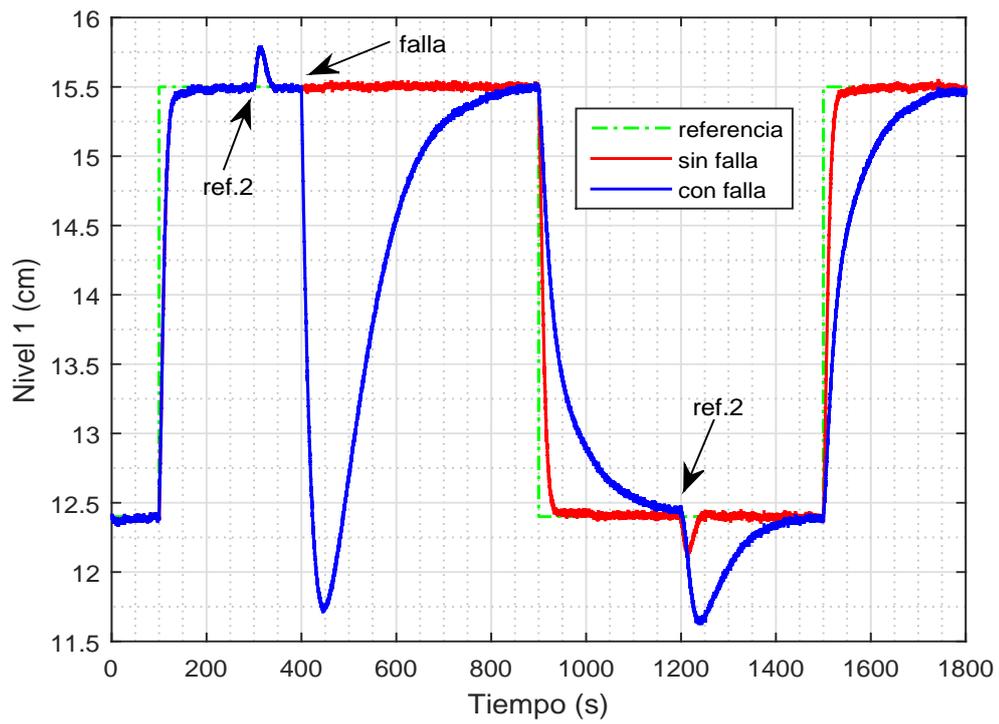


Figura 3.11: Nivel del tanque 1 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador DMC).

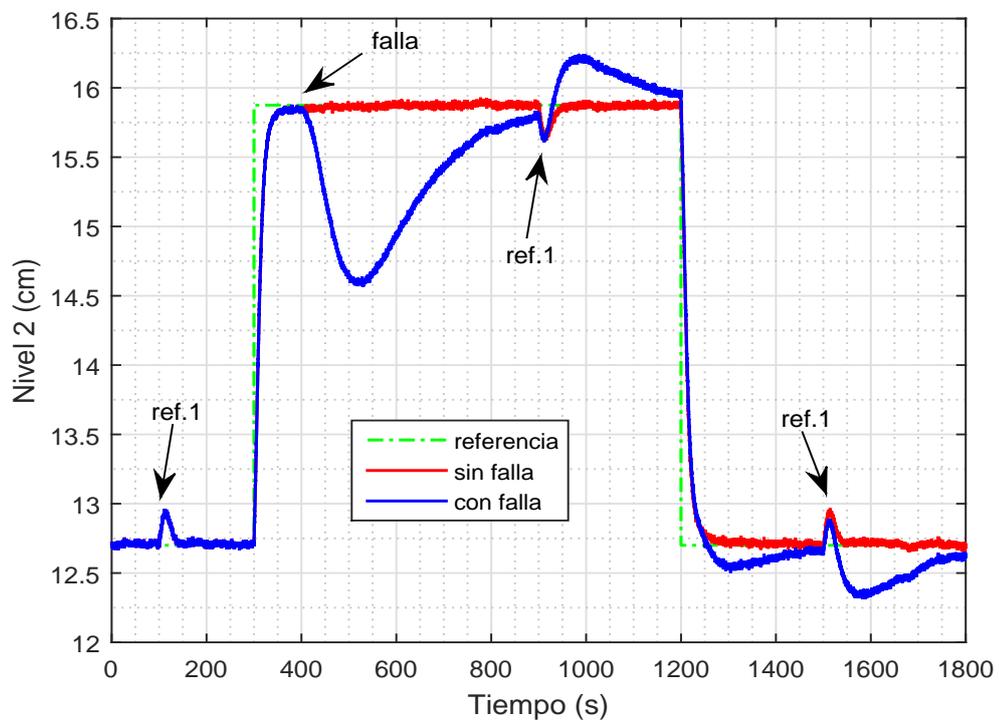


Figura 3.12: Nivel del tanque 2 cuando hay una falla en la bomba 1 (controlador DMC).

3.4.3. Conclusiones parciales

Para ambos controladores: basado en realimentación de estados y controlador DMC, resultó que en presencia de una falla parcial en la bomba 1, se deteriora el desempeño del sistema de control en lazo cerrado, el cual se cuantificó con el índice ISE, siendo mayor el impacto para el controlador DMC, a pesar de ser un controlador más avanzado. Esto se debe a que, en presencia de una falla, el modelo de respuesta paso no predice correctamente las variables de salida. Entonces, se demuestra la necesidad de diseñar un controlador tolerante a fallas que sea capaz de compensarlas manteniendo un desempeño aceptable, el cual es el objetivo de la presente tesis.

3.5. Simulación del sistema de diagnóstico de fallas

3.5.1. Detección y aislamiento de fallas (FDI)

Se diseña un banco de dos observadores de entrada desconocida (UIO), ya que solo son dos bombas, utilizando los polos normalizados de Bessel de cuarto orden s_4 (el sistema de cuatro tanques es de cuarto orden), dividido por el tiempo de establecimiento deseado del observador, el cual se elige como un quinto del tiempo de establecimiento del sistema de control, es decir, $T_{es,ob} = T_{es}/5 = 6s$ (ver Sección 2.4.2.2). Para esto, se utilizó la función `place()` de MATLAB y se creó una función que calcule las matrices y ganancias necesarias para el diseño del UIO de acuerdo a las Ec. 3.2 y 3.6.

Para el UIO n°1 se obtiene:

$$E = \begin{bmatrix} 0.9319 & 0.0790 & 0 & 0 \\ -0.0790 & 0.9319 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9116 & 0.0252 \\ 0 & 0 & -0.0252 & 0.9116 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 0.1231 & -0.0005 & 0 & -0.3286 \\ -0.0005 & 1 & 0 & -0.0002 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -0.3286 & -0.0002 & 0 & 0.8769 \end{bmatrix}$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} 0.0082 & -0.0790 & 0.0005 & -0.0213 \\ 0.0097 & 0.0669 & 0 & -0.0227 \\ 0.0083 & 0 & 0.0839 & -0.0221 \\ -0.0285 & 0 & -0.0237 & 0.0746 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0.8769 & 0.0005 & 0 & 0.3286 \\ 0.0005 & 0 & 0 & 0.0002 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.3286 & 0.0002 & 0 & 0.1231 \end{bmatrix}$$

Para el UIO n°2 se obtiene:

$$E = \begin{bmatrix} 0.9319 & 0.0790 & 0 & 0 \\ -0.0790 & 0.9319 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9116 & 0.0252 \\ 0 & 0 & -0.0252 & 0.9116 \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} 1 & -0.0010 & -0.0008 & 0 \\ -0.0011 & 0.3665 & -0.4819 & 0 \\ -0.0008 & -0.4819 & 0.6335 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_{12} = \begin{bmatrix} 0.0666 & -0.0290 & 0.0424 & 0 \\ 0.0789 & 0.0245 & -0.0307 & 0.0012 \\ -0.0001 & -0.0420 & 0.0532 & -0.0267 \\ 0 & -0.0121 & 0.0159 & 0.0851 \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} 0 & 0.0010 & 0.0008 & 0 \\ 0.0011 & 0.6335 & 0.4819 & 0 \\ 0.0008 & 0.4819 & 0.3665 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

El diseño del banco de observadores se realizó de tal manera que el observador UIO n°1 esta desacoplado de la falla parcial en el actuador 1 y por lo tanto solo puede detectar la falla en el actuador 2. Similarmente, el observador UIO n°2 esta desacoplado de la falla parcial en el actuador 2 y por lo tanto solo puede detectar la falla en el actuador 1. Se considera que no hay fallas simultáneas en ambos actuadores, ya que esta situación es poco probable que suceda.

En la Fig. 3.13 se muestra el esquema de detección y aislamiento de fallas construido en SIMULINK.

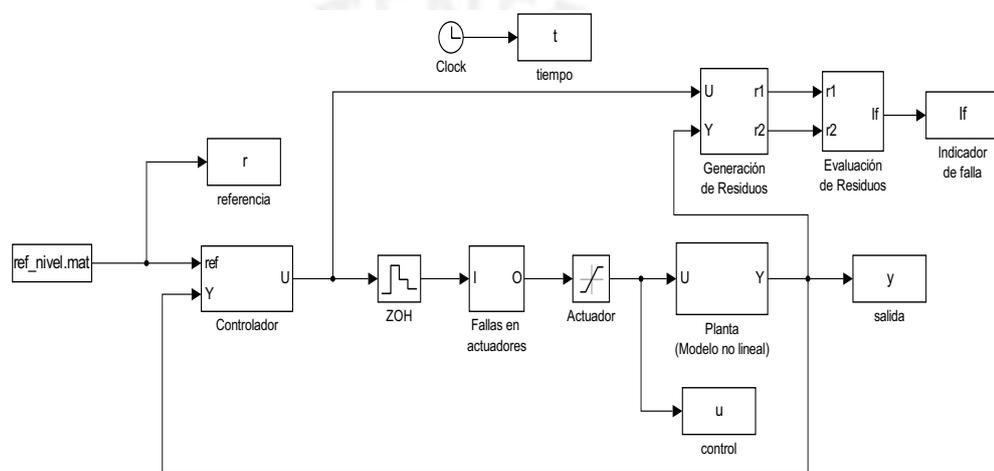


Figura 3.13: Diagrama del sistema FDI en SIMULINK.

La evaluación de residuos se realizó con el método del Valor de la Raíz Media Cuadrática o Valor RMS (Ec. 3.14) debido a su mayor robustez al ruido en comparación a los otros métodos. Se utiliza una *ventana* de tiempo de 40 muestras.

En las Fig. 3.14 y 3.15 se muestran los valores RMS para los residuos generados con el observador UIO n°1 y UIO n°2 para el controlador basado en realimentación de estados y controlador DMC, respectivamente (los primeros 10 s no se toman en cuenta, pues es el tiempo que demora en converger los valores RMS). Se considero la misma condición inicial para ambos UIO (en variables de desviación):

$$w_{(0)} = \begin{bmatrix} -1.0 & 1.0 & 0.3 & -0.4 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Para ambos controladores, según las Fig. 3.14 y 3.15, los valores RMS son cercanos a cero cuando no hay falla.

En la Fig. 3.16 se muestra los primeros 50 s de simulación con el fin de observar la convergencia de los valores RMS para el controlador por realimentación de estados. Similares

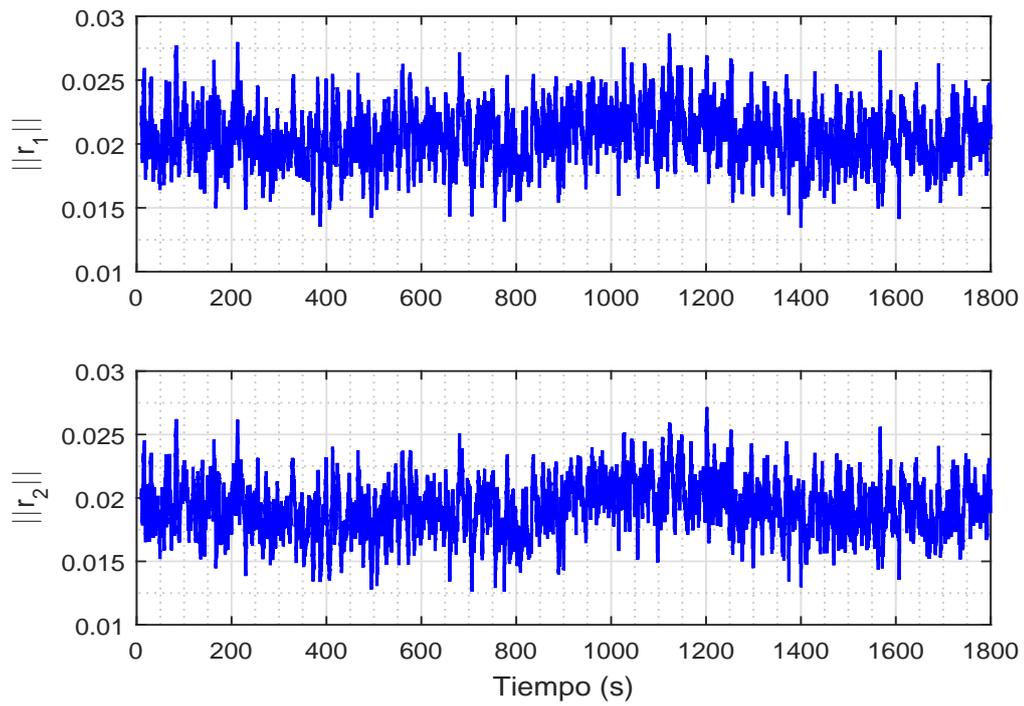


Figura 3.14: Evaluación de residuos para el sistema libre de fallas (controlador por realimentación de estados).

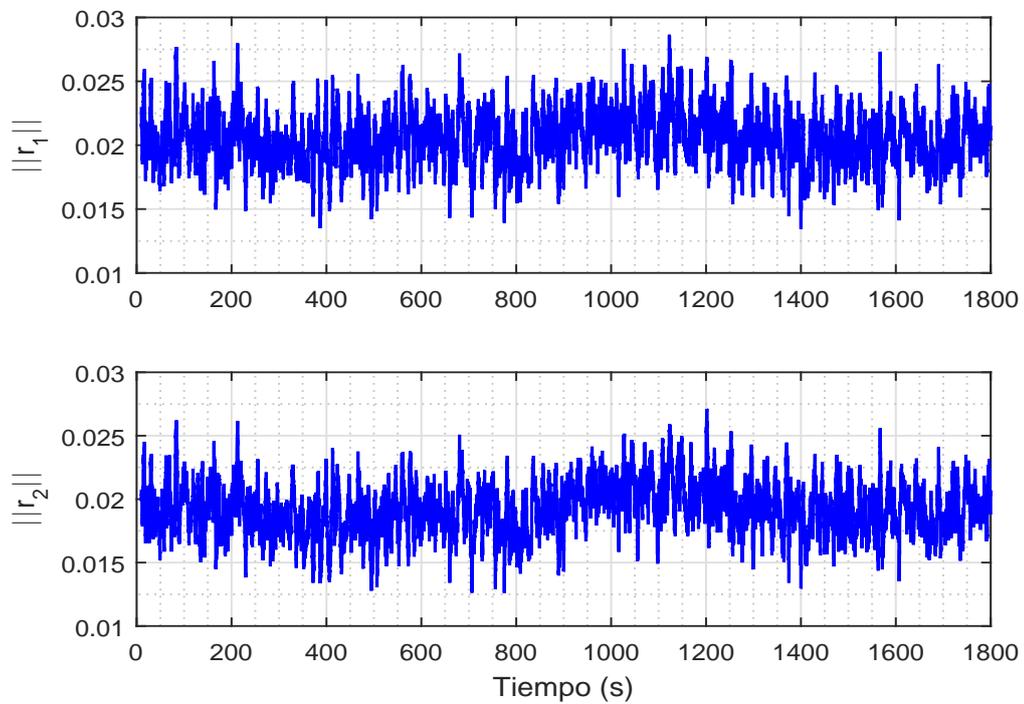


Figura 3.15: Evaluación de residuos para el sistema libre de fallas (controlador DMC).

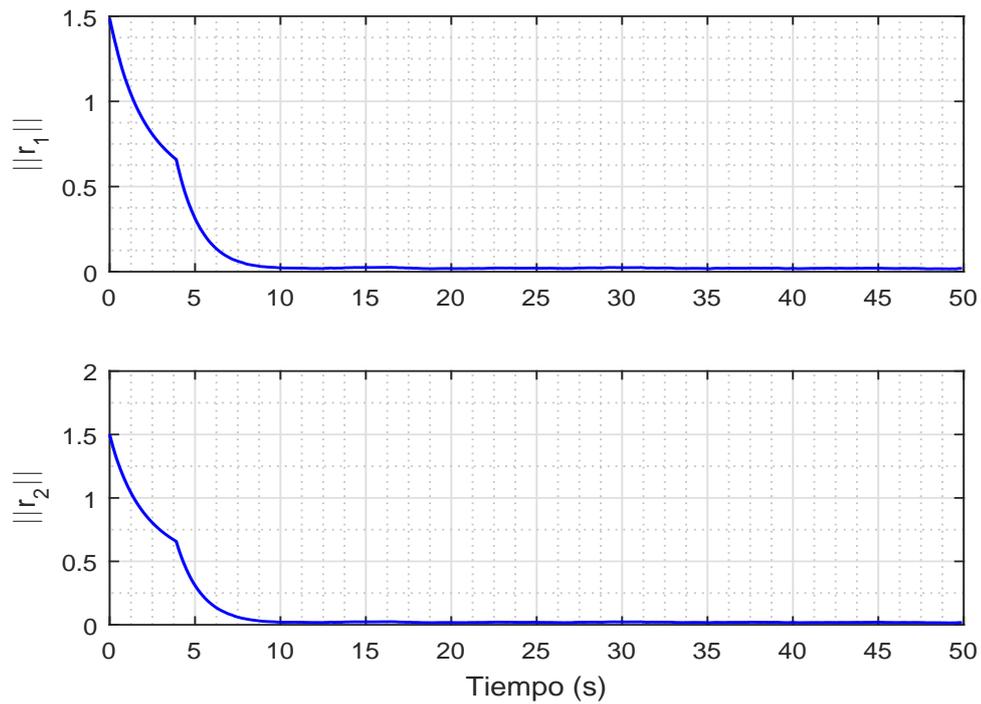


Figura 3.16: Convergencia de los valores RMS para el controlador por realimentación de estados.

resultados se obtienen para el controlador DMC (no se muestran).

Cálculo de los umbrales

A partir de las Fig. 3.14 y 3.15 se determinan los valores de los umbrales para una ventana de tiempo de 40 muestras, los cuales se eligieron como 10 % mayor al valor RMS máximo. Para ambos controladores se eligió los mismos valores. Los valores de los umbrales para diferentes ventanas de tiempo se muestran en la Tabla 3.4. Como se observa, mientras mayor la ventana de tiempo, menores son los umbrales. Sin embargo, no existe un gran diferencia entre los umbrales.

Tabla 3.4: Valores de los umbrales para el FDI.

Ventana	Umbral	Valor
20	1	0.0362
	2	0.0338
40	1	0.0315
	2	0.0298
60	1	0.0292
	2	0.0273
80	1	0.0284
	2	0.0271

En la práctica, los valores de los umbrales deben ser determinados experimentalmente. Si los valores de los umbrales elegidos son muy pequeños, se generan falsas alarmas en el sistema, y si son valores muy grandes, el tiempo de detección de la falla es mayor, y por lo tanto el sistema de control tolerante a fallas pierde eficacia, pues este actúa una vez que la falla es detectada. De ahí que los umbrales deben ser seleccionados cuidadosamente.

FDI cuando ocurre una falla

Para el FDI es común apoyarse de un *contador auxiliar* que indique cuanto tiempo o periodos de muestreo (en el caso discreto) ha estado el residuo (en este caso, el valor RMS) fuera de su comportamiento normal (Picó, 2015). De esta forma, se establece el tiempo o muestras que el residuo debe estar fuera del umbral para detectar la falla. Este contador tiene la ventaja de evitar que se generen falsas alarmas, pero con la desventaja de retrasar la detección de la falla.

En las Fig. 3.17 y Fig. 3.18 se presentan respectivamente la evaluación de residuos (valor RMS) para el controlador por realimentación de estados y controlador DMC, para el escenario de falla descrito en la sección 3.4.1 (falla ocurre a los 400 s). Las líneas de color rojo son los umbrales. El número de muestras del contador auxiliar se eligió igual a 10, equivalente a 1 s de retraso en la detección de la falla. Según las simulaciones este valor del contador auxiliar es suficiente para manejar el ruido del proceso. Sin embargo, en la planta real el contador auxiliar, al igual que los umbrales, deben determinarse experimentalmente con el fin de manejar el ruido y las perturbaciones. Recordar que si se incrementa el valor del contador auxiliar, la tasa de falsas alarmas disminuye, pero el tiempo de detección de fallas es mayor, lo cual tiene un impacto negativo en el desempeño del controlador tolerante a fallas (como se observará más adelante). Por lo tanto, el valor del contador auxiliar debe determinarse tratando de balancear ambos aspectos.

Como ya se había mencionado, el observador UIO n°1 genera un residuo r_1 insensible a la falla parcial en la bomba 1, por lo tanto, es de esperarse que el valor RMS de dicho residuo, $\|r_1\|$, no pueda detectar esta falla. Sin embargo, el otro observador UIO n°2 genera un residuo r_2 que si es sensible a la falla parcial en la bomba 1, por lo tanto, el valor RMS de este, $\|r_2\|$, logra detectar y aislar satisfactoriamente la falla (ver las Fig. 3.17 y Fig. 3.18).

En la Tabla 3.5 se muestra la evaluación del desempeño del sistema de diagnóstico de fallas en base a los índices de detección y aislamiento de fallas (FDT y FIT, ver Tabla 1.2). Para ambos controladores, por realimentación de estados y controlador DMC, la falla parcial en la bomba 1 se detecta y aísla en un intervalo de tiempo igual a 1.5 s (FDT y FIT son iguales), equivalente a 15 periodos de muestreo. En la Tabla 3.6 se muestra el desempeño del sistema de diagnóstico de fallas para diferentes magnitudes de fallas (pérdida de efectividad). Como se puede observar, mientras la magnitud de la falla es menor, el tiempo de detección es mayor. Ambos controladores tienen el mismo tiempo de detección.

3.5.2. Estimación de fallas (FE)

La estimación de fallas mediante observadores de entrada desconocida (UIO) se hace en base a la teoría desarrollada en la sección 3.2.3. En la Fig. 3.19 se muestra el esquema en

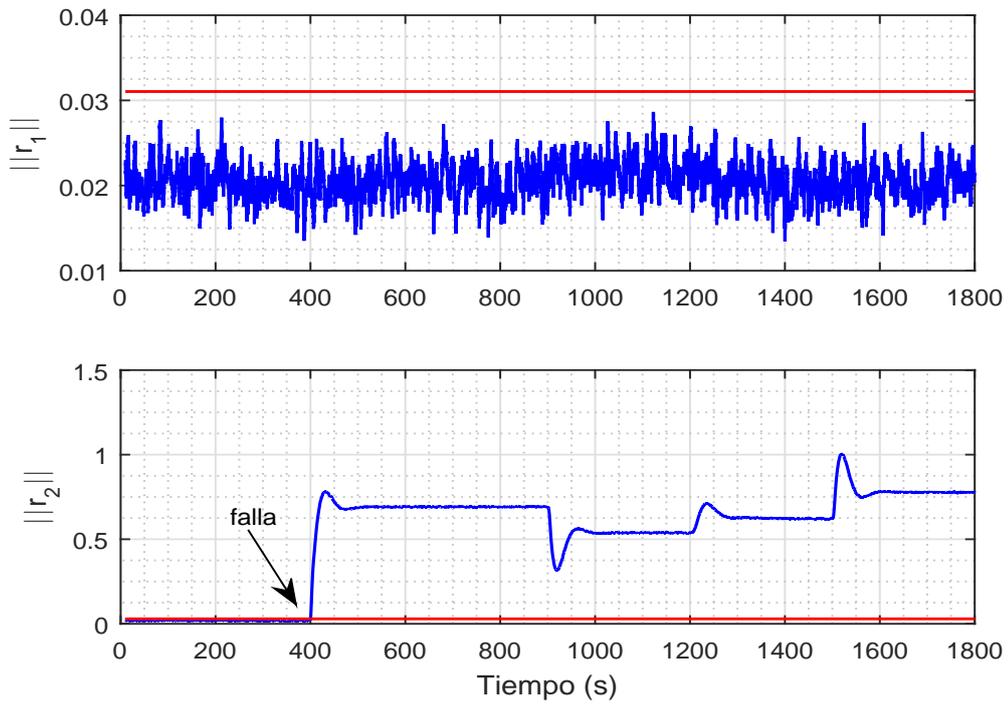


Figura 3.17: FDI cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados).

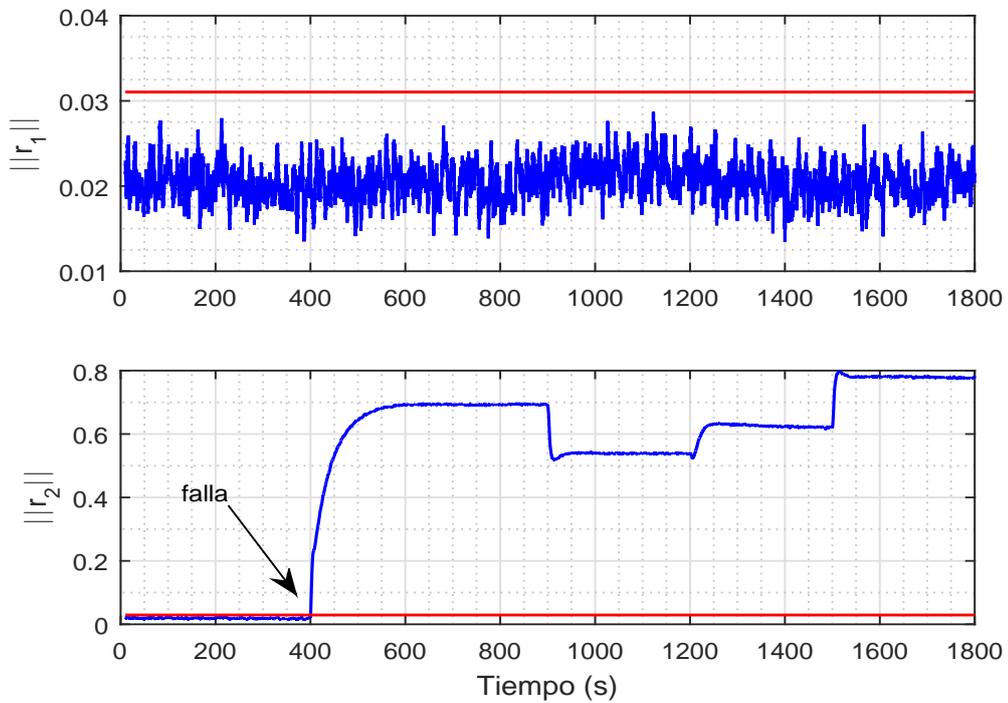


Figura 3.18: FDI cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC).

Tabla 3.5: Desempeño del sistema de diagnóstico de fallas.

Controlador	Tiempo de falla (s)	Tiempo de detección (s)	FDT (s)
Realimentación Estados	400	401.5	1.5
DMC	400	401.5	1.5

Tabla 3.6: Desempeño del sistema de diagnóstico de fallas para diferentes magnitudes de fallas.

Pérdida de efectividad	Tiempo de falla (s)	Tiempo de detección (s)	FDT (s)
10 % ($\alpha = 0.9$)	400	404.7	4.7
20 % ($\alpha = 0.8$)	400	402.6	2.6
30 % ($\alpha = 0.7$)	400	402.0	2.0
40 % ($\alpha = 0.6$)	400	401.7	1.7
50 % ($\alpha = 0.5$)	400	401.6	1.6
60 % ($\alpha = 0.4$)	400	401.5	1.5
70 % ($\alpha = 0.3$)	400	401.5	1.5
80 % ($\alpha = 0.2$)	400	401.5	1.5
90 % ($\alpha = 0.1$)	400	401.4	1.4

SIMULINK para el sistema de detección y aislamiento de fallas (FDI) junto con la estimación de fallas (FE).

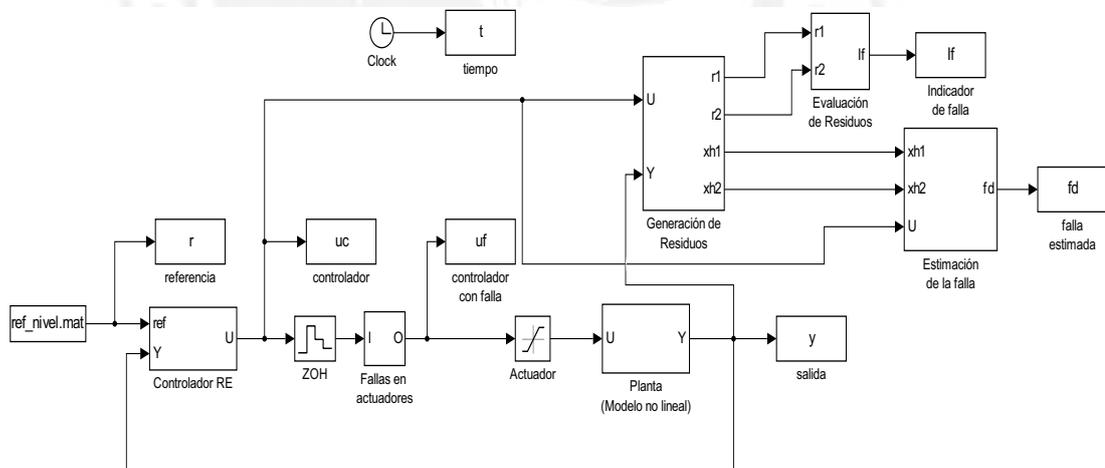


Figura 3.19: Detección y Diagnóstico de fallas (FDI/FE) en SIMULINK.

En las Fig. 3.20 y Fig. 3.21 se muestra la estimación de la falla parcial en la bomba 1 para el controlador por realimentación de estados y controlador DMC, respectivamente (el escenario de la falla se describe en la sección 3.4.1, donde la falla en la bomba 1 aparece a los 400 s, con una pérdida de efectividad de 70 %). Por lo tanto, se comprueba la eficacia del método de observadores de entrada desconocida para estimar la magnitud de dichas fallas.

Fue necesario incorporar un filtro pasa bajo de primer orden para la estimación de la falla que era sensible al ruido de los sensores. Esto es debido a que en la Ec. 3.21 para estimar la falla, \hat{f}_d , la ganancia (VR^{-1}) está en el orden de 100 y por tanto amplifica el ruido de las

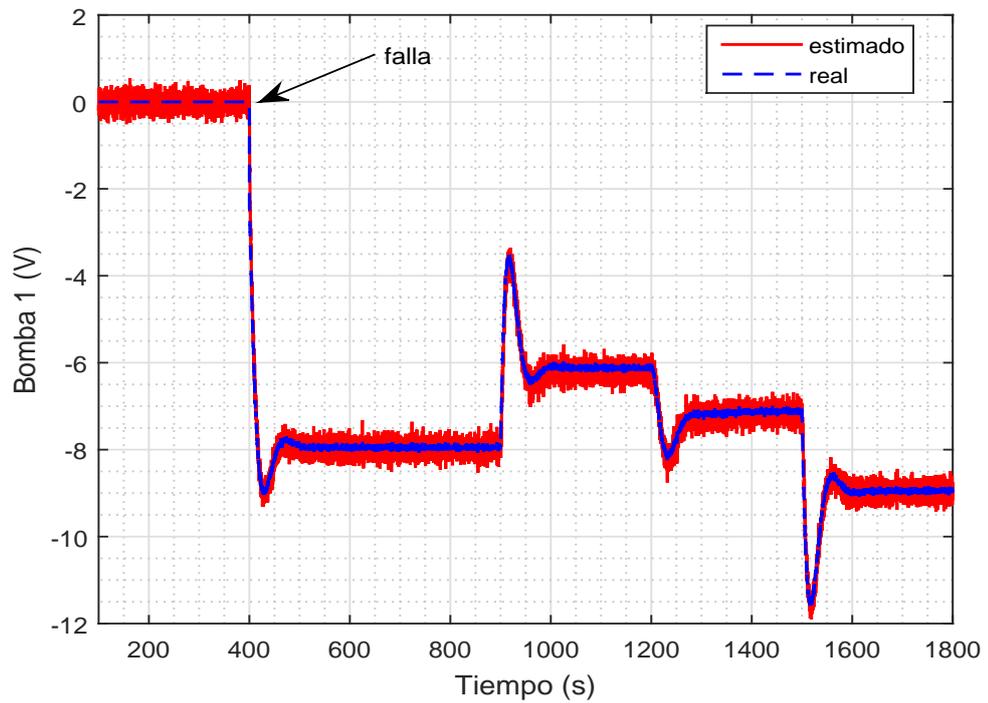


Figura 3.20: Estimación de falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados).

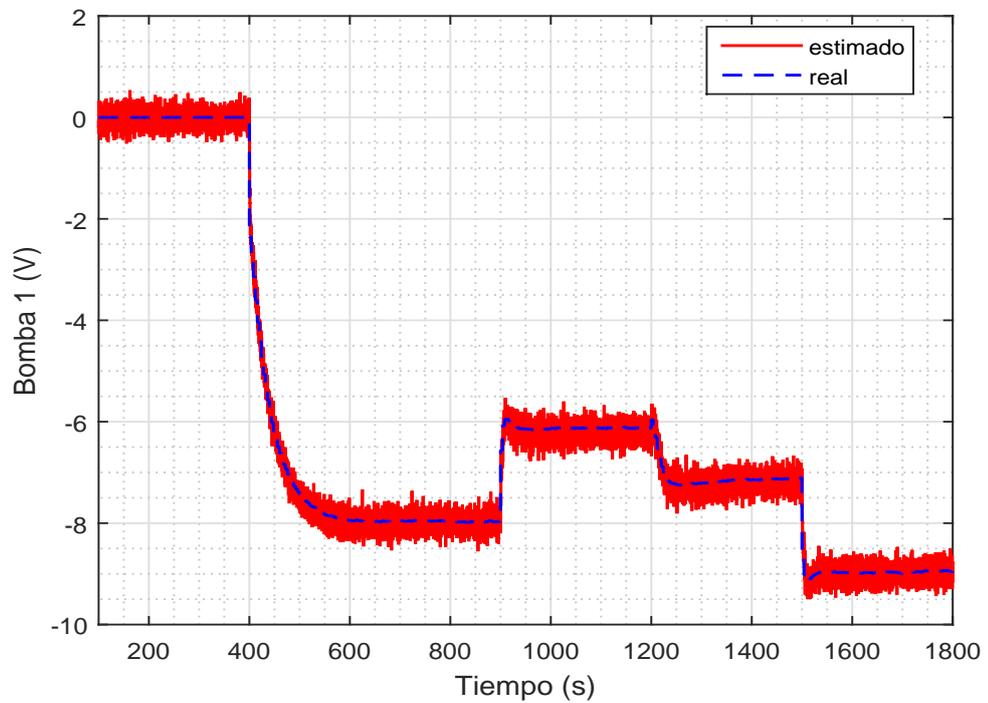


Figura 3.21: Estimación de falla en la bomba 1 (controlador DMC).

mediciones.

3.5.3. Conclusiones parciales

Para una falla parcial en la bomba 1 (una pérdida de efectividad de 70 %) se logró detectar y aislar la falla satisfactoriamente, después de 1.5 s, equivalente a 15 periodos de muestreo. Para esto se utilizó una ventana de muestras igual a 40 (para el cálculo del Valor RMS) y un contador auxiliar igual a 10. Igualmente, se estimó correctamente la magnitud de la falla en la bomba 1.

3.6. Simulación del sistema de control tolerante a fallas y comparación con el sistema de control

Finalmente, después de diseñar el sistema control y el sistema de diagnóstico de fallas (FDI/FE), se diseña el sistema de control tolerante a fallas (FTC). Su objetivo es calcular una ley de control adicional que permita compensar el efecto de la falla en el sistema usando la estimación en línea de la magnitud de la falla. Después que la falla es detectada y aislada, se calcula una acción de control adicional u_{add} en base a la Ec. 3.26 o 3.32 y se suma a la señal que envía el controlador u_{nom} (ya sea el controlador por realimentación de estados o el controlador DMC). La nueva ley de control que se aplica al sistema viene dada por:

$$U(k) = (u_{nom}(k) + u_{add}(k)) + U_0 \quad (3.36)$$

Una vez que la falla es aislada y estimada, se calcula la ley de control de compensación con el fin de reducir el efecto de la falla en el sistema. Con este método de acomodación de fallas, las salidas decrecen menos en comparación con el caso de un controlador sin compensación de fallas, como se pueden ver en las Fig. 3.22 y Fig. 3.23 para el controlador por realimentación de estados, y en las Fig. 3.27 y Fig. 3.28 para el controlador DMC (la falla en la bomba 1 ocurre a los 400 s, con un 70 % de pérdida de efectividad).

Haciendo un acercamiento a la respuesta de lazo cerrado cuando ocurre la falla, ver las Fig. 3.24 y Fig. 3.29, se observa que para el FTC las salidas alcanzan más rápido sus valores de referencia ya que la falla es estimada y la nueva ley de control es capaz de compensar el efecto de la falla rápidamente. Esto es debido a que la señal de control del FTC se incrementa de forma más rápida (ver las Fig. 3.25 y Fig. 3.26 para el controlador por realimentación de estados, y las Fig. 3.30 y Fig. 3.31 para el controlador DMC), permitiendo compensar la falla sobre las salidas controladas del sistema de manera más rápida.

Para comparar el rendimiento del controlador FTC con el controlador tradicional (sin compensación de fallas), se calcula el índice ISE (integral del error cuadrático) para ambas salidas controladas, nivel de los tanques 1 y 2, tanto para el sistema libre de fallas y cuando ocurre una falla en la bomba 1. El índice ISE se muestra en las Tablas 3.7 y 3.8 para el controlador por realimentación de estados y controlador DMC respectivamente.

En base a las Tablas 3.7 y 3.8 se demuestra que el FTC tiene un mejor desempeño con respecto al sistema de control tradicional (sin compensación de fallas), pues tiene un ISE menor

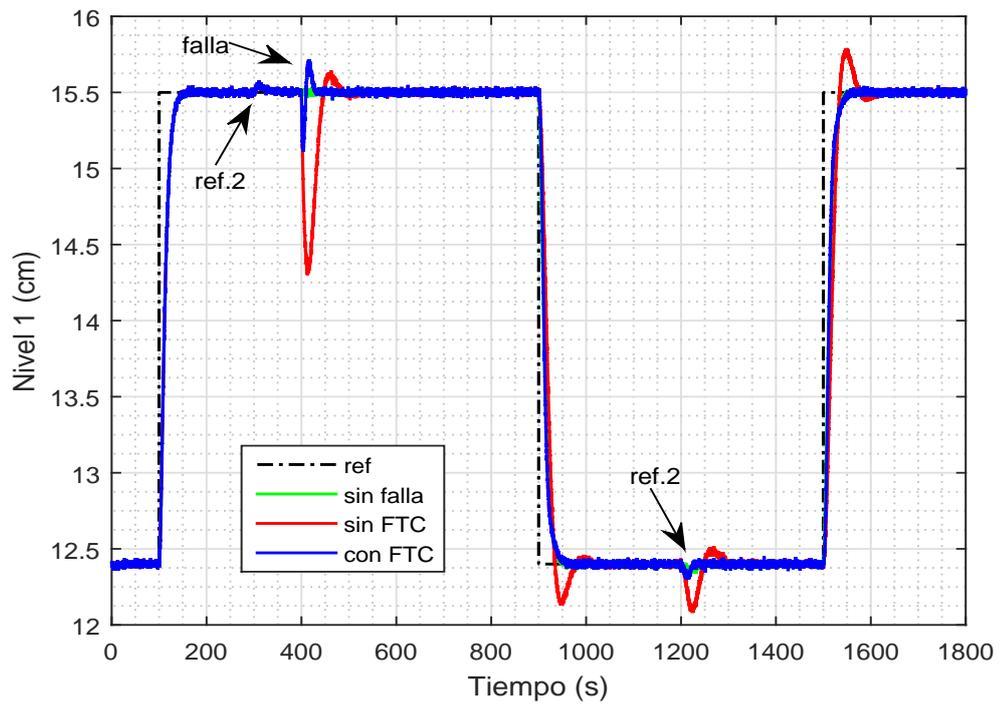


Figura 3.22: Nivel del tanque 1 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).

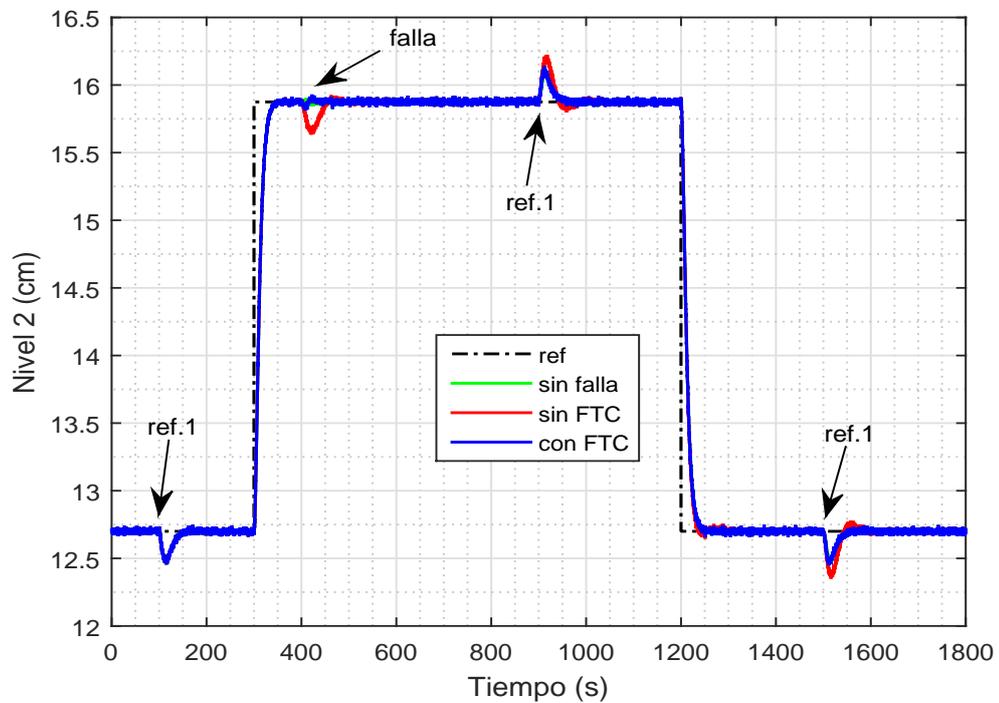


Figura 3.23: Nivel del tanque 2 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).

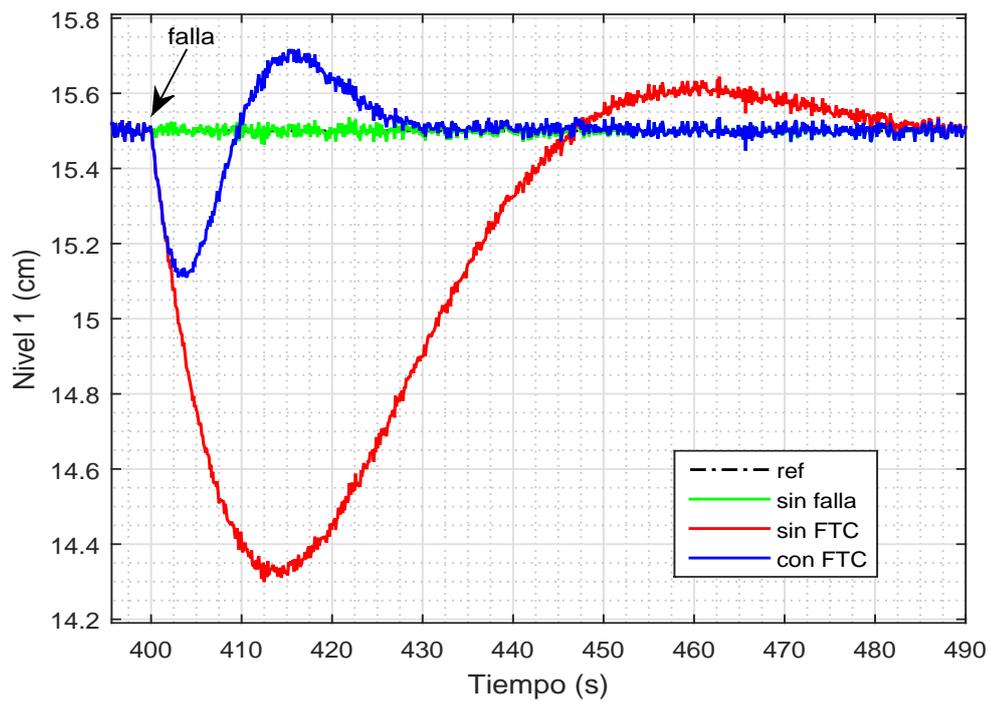


Figura 3.24: Nivel del tanque 1 cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).

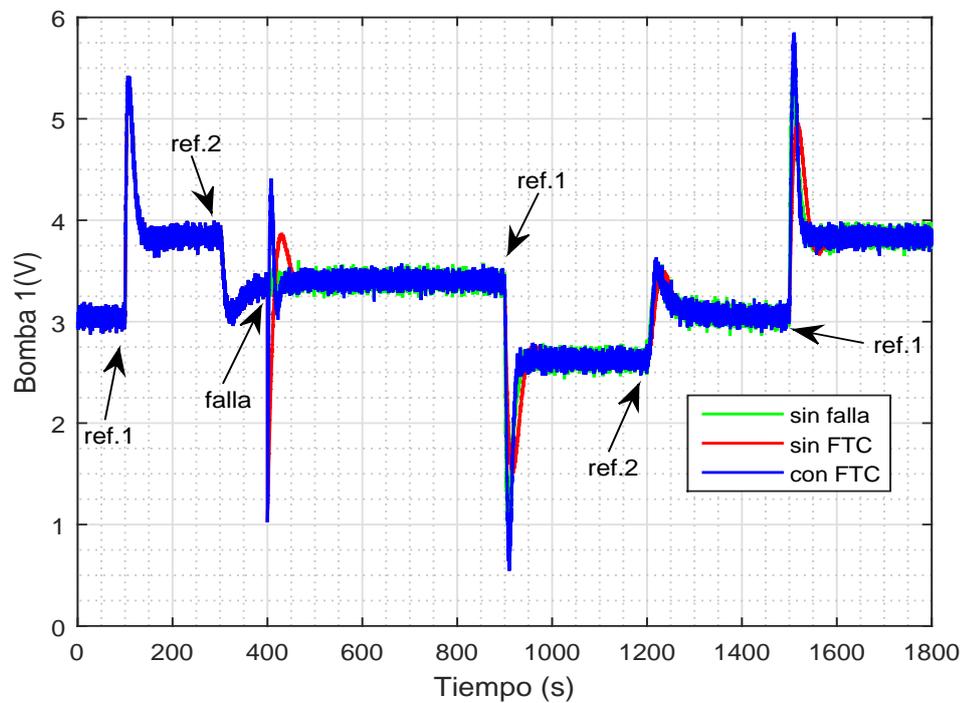


Figura 3.25: Entrada de control cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).

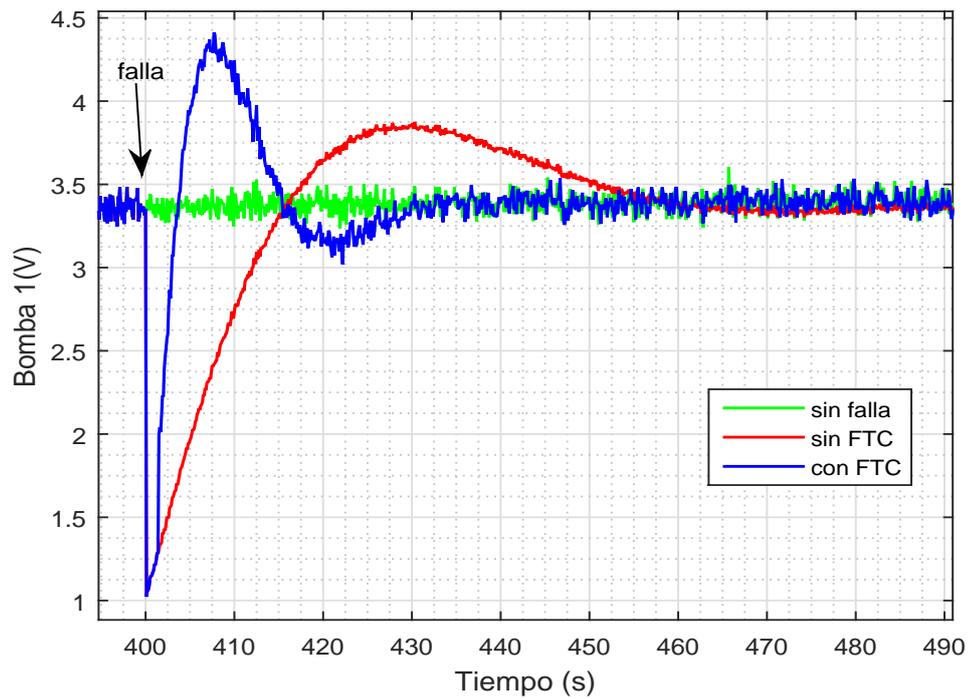


Figura 3.26: Entrada de control cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador por realimentación de estados con compensación de fallas).

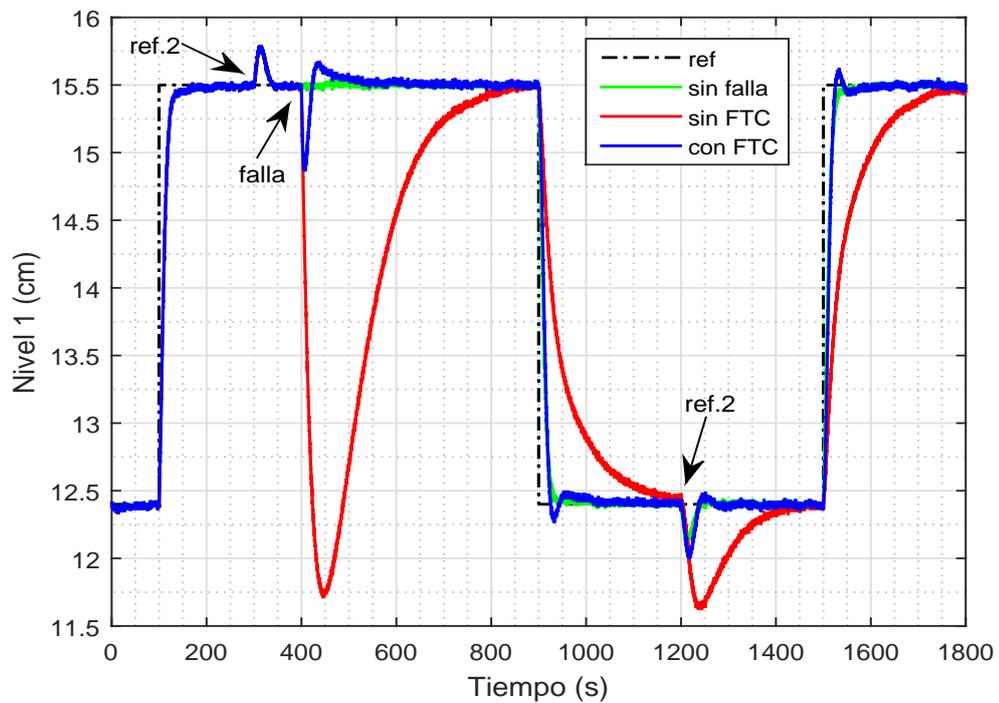


Figura 3.27: Nivel del tanque 1 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).

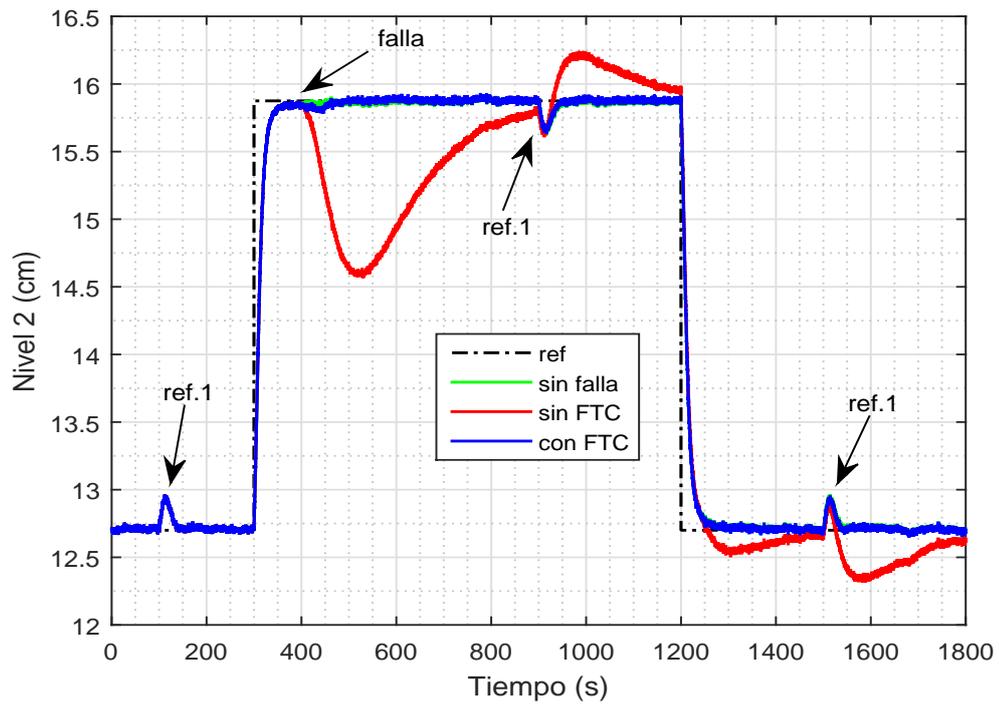


Figura 3.28: Nivel del tanque 2 cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).

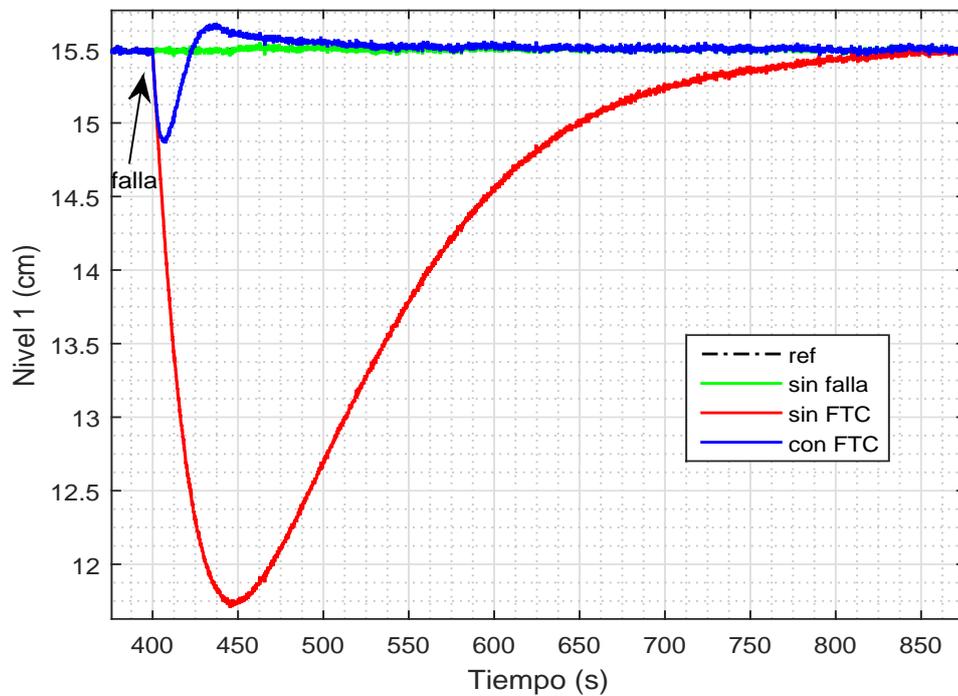


Figura 3.29: Nivel del tanque 1 cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).

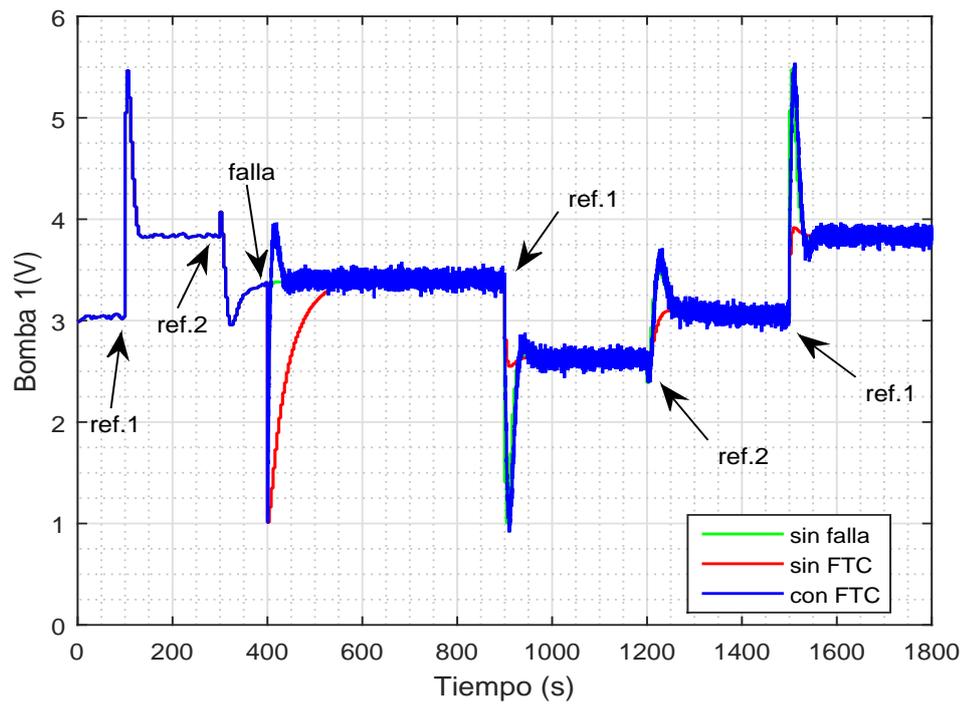


Figura 3.30: Entrada de control cuando ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).

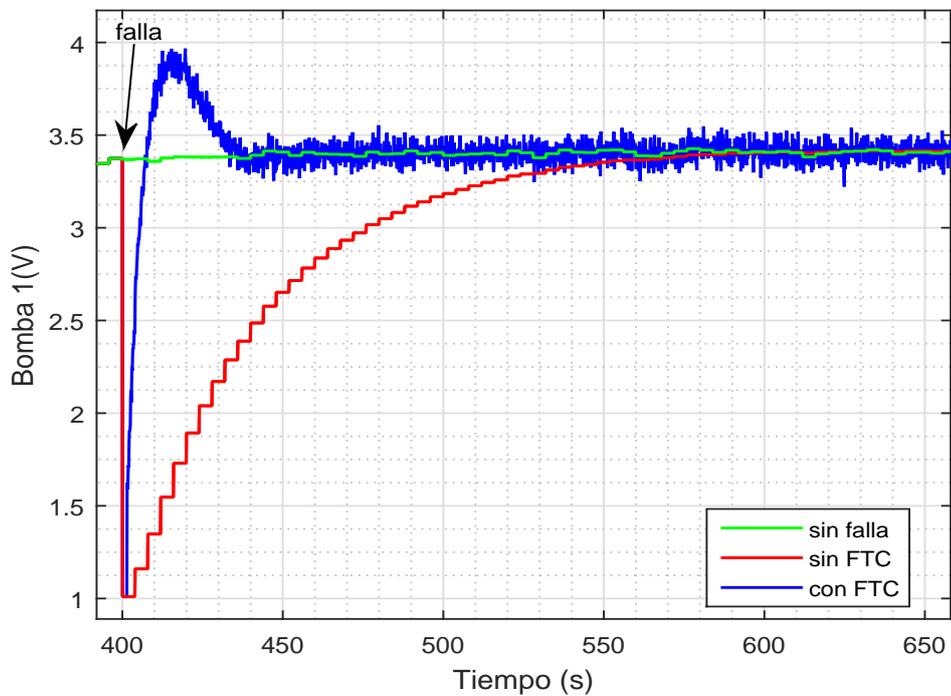


Figura 3.31: Entrada de control cerca al instante que ocurre una falla en la bomba 1 (controlador DMC con compensación de fallas).

Tabla 3.7: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE (control por realimentación de estados).

ISE	sin falla	sin FTC	con FTC
Nivel 1	2399.4	3499.2	2494.3
Nivel 2	1603.3	1629.9	1602.5

Tabla 3.8: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE (control DMC)

ISE	sin falla	sin FTC	con FTC
Nivel 1	1861.6	19312.6	2231.8
Nivel 2	1527.8	4432.3	1526.2

para ambas salidas controladas. Para evidenciar mejor esto, el índice ISE es normalizado con respecto al índice del sistema de control sin falla. Los resultados se pueden ver en las Tablas 3.9 y 3.10.

Cuando no hay compensación de fallas, el índice ISE para el controlador por realimentación de estados es 50 % mayor en comparación al caso sin falla. Por otro lado, para el controlador DMC, el índice ISE es 10 veces mayor (esto para el nivel del tanque 1). Sin embargo, cuando existe compensación de fallas, el índice ISE es solo 4 % mayor para el primer caso, y 20 % mayor para el segundo. De aquí, se puede observar que los controladores (por realimentación de estados y DMC) con compensación de fallas tienen un desempeño cercano al caso sin falla. También, se resalta la importancia que tiene la compensación de fallas para el controlador DMC, pues en presencia de una falla en el actuador su desempeño se deteriora drásticamente.

Tabla 3.9: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado (control por realimentación de estados).

ISE normalizado	sin falla	sin FTC	con FTC
Nivel 1	1	1.46	1.04
Nivel 2	1	1.02	1.00

Tabla 3.10: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado (control DMC).

ISE normalizado	sin falla	sin FTC	con FTC
Nivel 1	1	10.4	1.20
Nivel 2	1	2.90	1.00

Igualmente, se evaluó el desempeño del controlador con y sin compensación de fallas para diferentes magnitudes de falla en la bomba 1 (pérdida de efectividad), la cual se muestra en las Tablas 3.11 y 3.12. Comparando ambas tablas, se observa que para una misma magnitud de falla, el desempeño del controlador DMC se deteriora en mayor medida que el controlador por realimentación de estados. Para magnitudes de fallas pequeñas no sería necesario un controlador tolerante a fallas. Sin embargo, para magnitudes de fallas grandes se demuestra la

necesidad de utilizar un mecanismo de compensación de fallas en ambos controladores, debido a la disminución del rendimiento de los mismos. Esto en mayor grado para el controlador DMC.

Tabla 3.11: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado para diferentes magnitudes de falla (control por realimentación de estados).

Pérdida de efectividad	ISE normalizado	sin falla	sin FTC	con FTC
10 % ($\alpha = 0.9$)	Nivel 1	1	1.02	1.00
	Nivel 2	1	1.00	1.00
20 % ($\alpha = 0.8$)	Nivel 1	1	1.04	1.01
	Nivel 2	1	1.00	1.00
30 % ($\alpha = 0.7$)	Nivel 1	1	1.07	1.01
	Nivel 2	1	1.00	1.00
50 % ($\alpha = 0.5$)	Nivel 1	1	1.18	1.02
	Nivel 2	1	1.00	1.00
70 % ($\alpha = 0.3$)	Nivel 1	1	1.46	1.04
	Nivel 2	1	1.02	1.00
80 % ($\alpha = 0.2$)	Nivel 1	1	1.88	1.08
	Nivel 2	1	1.04	1.00

Tabla 3.12: Desempeño del controlador con y sin compensación de fallas mediante el índice ISE normalizado para diferentes magnitudes de falla (control DMC).

Pérdida de efectividad	ISE normalizado	sin falla	sin FTC	con FTC
10 % ($\alpha = 0.9$)	Nivel 1	1	1.10	1.00
	Nivel 2	1	1.01	1.00
20 % ($\alpha = 0.8$)	Nivel 1	1	1.29	1.03
	Nivel 2	1	1.03	1.00
30 % ($\alpha = 0.7$)	Nivel 1	1	1.63	1.04
	Nivel 2	1	1.07	1.00
50 % ($\alpha = 0.5$)	Nivel 1	1	3.38	1.09
	Nivel 2	1	1.38	1.00
70 % ($\alpha = 0.3$)	Nivel 1	1	10.4	1.20
	Nivel 2	1	2.90	1.00
80 % ($\alpha = 0.2$)	Nivel 1	1	22.6	1.36
	Nivel 2	1	5.95	1.00

Para evaluar el desempeño del controlador tolerante a fallas (FTC) con respecto al tiempo de detección de fallas, se varía el *contador auxiliar*. Como ya se ha mencionado, este contador permite disminuir las falsas alarmas, aunque el tiempo de detección de la falla es mayor. Por ejemplo, si el contador auxiliar es igual a 10, equivale a 1 s de retraso en la detección de la falla. En la Tabla 3.13 se muestra el desempeño del controlador FTC para diferentes valores

del contador auxiliar (ISE normalizado con respecto al caso sin falla) para el nivel del tanque 1, ya que el nivel del tanque 2 no es afectado notoriamente. De aquí tenemos que conforme el tiempo de detección de la falla es mayor, el desempeño del controlador FTC disminuye (mayor índice ISE). Sin embargo, el desempeño del controlador FTC sigue siendo superior al controlador sin FTC.

Tabla 3.13: Desempeño del controlador FTC con respecto al tiempo de detección de fallas (Índice ISE normalizado).

Índice ISE normalizado (Nivel 1)					
Contador auxiliar	10	50	100	150	200
Controlador RE con FTC	1.04	1.06	1.10	1.15	1.21
Controlador DMC con FTC	1.20	1.26	1.42	1.65	1.95

El diagrama en SIMULINK del sistema de control tolerante a fallas parciales en actuadores se puede ver en la Fig. 3.32. En este diagrama se pueden observar los bloques correspondientes a la generación de residuos, evaluación de residuos, estimación de fallas y compensación de fallas, además del controlador (RE o DMC) y la planta (modelo no lineal). El contenido de cada bloque se muestra en el anexo.

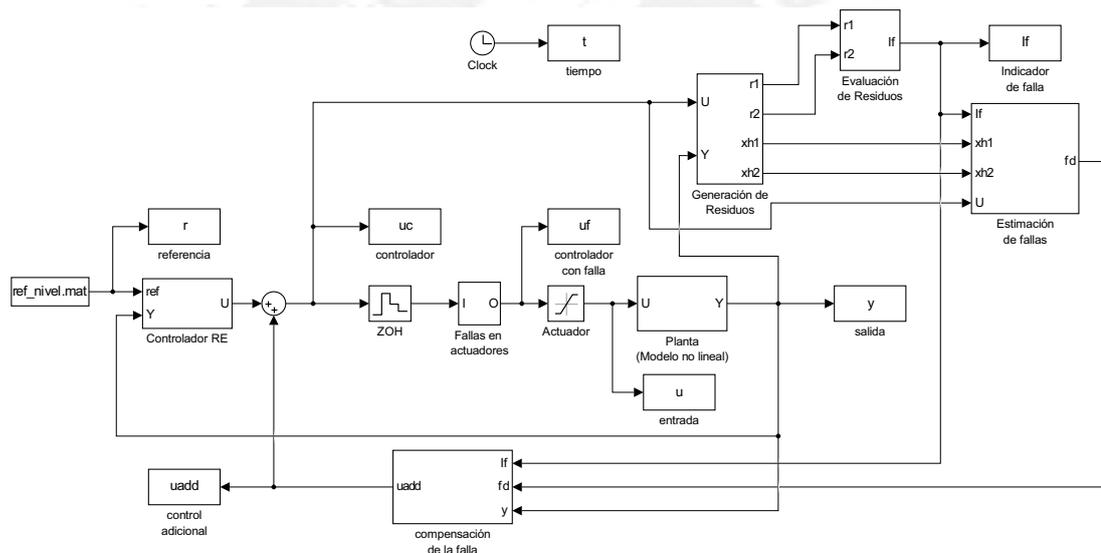


Figura 3.32: Sistema de control tolerante a fallas en SIMULINK.

Finalmente, es importante mencionar que el sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas parciales diseñado para el proceso de cuatro tanques acoplados se basa en el modelo lineal de la planta; por lo tanto, solo es válido en un rango de operación cercano al punto de operación de linealización.

3.7. Conclusiones parciales

- Se desarrolló la teoría correspondiente a la detección, aislamiento y estimación de fallas parciales en actuadores en base a la técnica de observadores de entrada desconocida

(UIO). Se presentaron las ecuaciones de diseño de este observador; así como, condiciones necesarias y suficientes para su existencia. También, se describieron algunos métodos para la evaluación de residuos.

- Para la acomodación de fallas parciales en actuadores, se desarrolló la técnica de compensación aditiva de fallas, la cual básicamente calcula una señal de control de compensación que se adiciona a la señal que envía el controlador.
- Se demostró, mediante las simulaciones, que el desempeño de ambos controladores (por realimentación de estados y DMC) se deteriora drásticamente en presencia de una falla parcial en la bomba 1, con una respuesta más lenta, con mayores sobreimpulsos, y con un mayor valor del índice ISE (integral del error cuadrático). El impacto es significativamente mayor para el controlador DMC.
- Se logró detectar y aislar la falla parcial en la bomba 1 satisfactoriamente (70 % de pérdida de efectividad), después de 1.5 s, equivalente a 15 periodos de muestreo. Igualmente, se estimó correctamente la magnitud de la falla en la bomba 1.
- Cuando hay compensación de fallas, la respuesta del sistema mejora de forma significativa, siendo más rápida y con menores sobreimpulsos, teniendo un comportamiento cercano al caso sin falla. Esto se demostró cuantitativamente utilizando el índice de desempeño ISE, el cual tiene valores próximos al sistema libre de fallas.
- Se evaluaron diferentes magnitudes de fallas en los actuadores (pérdida de efectividad). Para magnitudes de fallas pequeñas (50 % para el controlador por realimentación de estados, y 10 % para el controlador DMC) no sería necesario un controlador tolerante a fallas, debido a que el rendimiento del sistema de control no es impactado significativamente. Sin embargo, para magnitudes de fallas mayores es notoria la necesidad de incorporar un mecanismo de compensación.
- Las simulaciones demuestran que el desempeño del controlador tolerante a fallas se deteriora (mayor índice ISE normalizado) si el tiempo de detección de la falla es mayor. De aquí la importancia del diseño de un sistema de diagnóstico de fallas que detecte, y aisle la falla en el menor tiempo posible.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta la propuesta de implementación práctica del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores (bombas) de la planta de cuatro tanques acoplados. Se describe el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para detectar, aislar y estimar fallas en tiempo real; así también, el mecanismo de compensación de fallas. Después, este algoritmo será implementado en el software RSLogix 5000. Por último, se desarrolla una interfaz gráfica en el FactoryTalk View de Rockwell Automation, que posibilitará el monitoreo de las variables controladas (nivel de los tanques inferiores) y el diagnóstico de fallas parciales en los actuadores.

4.2. Diagrama de Flujo

Un diagrama de flujo simple del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en los actuadores se presenta en la Fig. 4.1. Este diagrama contiene los siguientes bloques:

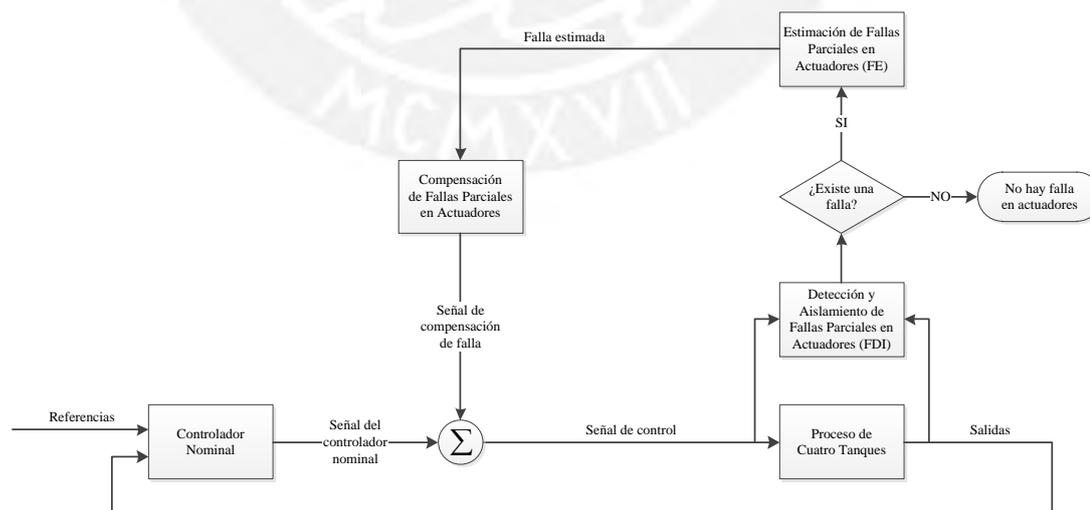


Figura 4.1: Diagrama de flujo del sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores.

- *Controlador nominal*: aplica el algoritmo de control dado por la Ec. 2.41 en el caso del

controlador basado en realimentación de estados. Para el controlador DMC multivariable, la ley de control es en base a la Ec. 2.85.

- *Detección y Aislamiento de Fallas*: se generan residuos mediante el observador de entrada desconocida (UIO) dado por la Ec. 3.2. Luego, se evalúan estos residuos utilizando el Valor de la raíz de la media cuadrática (Valor RMS) en base a la Ec. 3.14. Si el Valor RMS es mayor a su valor *umbral* o límite, una falla es detectada. El diagrama de flujo para este bloque se puede observar en la Fig. 4.2. Como el sistema de cuatro tanques tiene dos actuadores, es necesario dos UIO para aislar las fallas.
- *Estimación de fallas*: en base a las variables estimadas por el UIO, utiliza la Ec. 3.21 para estimar la magnitud de la falla.
- *Compensación de fallas*: compensa la falla parcial en el actuador en base al cálculo de una acción de control adicional que se suma a la señal que envía el controlador nominal. Esta dado por la Ec. 3.32, ya que el número de entradas de control es menor a las variables de estado. En caso contrario, se aplicaría la Ec. 3.26.

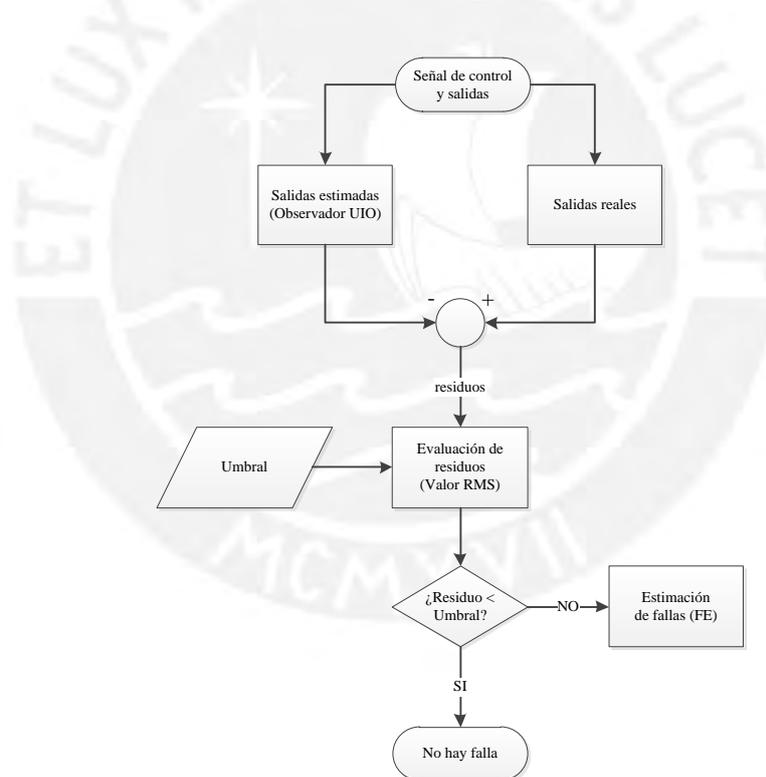


Figura 4.2: Diagrama de flujo para la detección y aislamiento de fallas parciales en actuadores.

4.3. Implementación en RSLogix 5000

El software RSLogix 5000 tiene un emulador de PLC Allen Bradley llamado RSLogix Emulate 5000, el cual permite experimentar y depurar los programas en un entorno seguro y controlado sin invertir en controladores físicos y módulos de E/S. Además, permite probar aplicaciones HMI sin usar un controlador real.

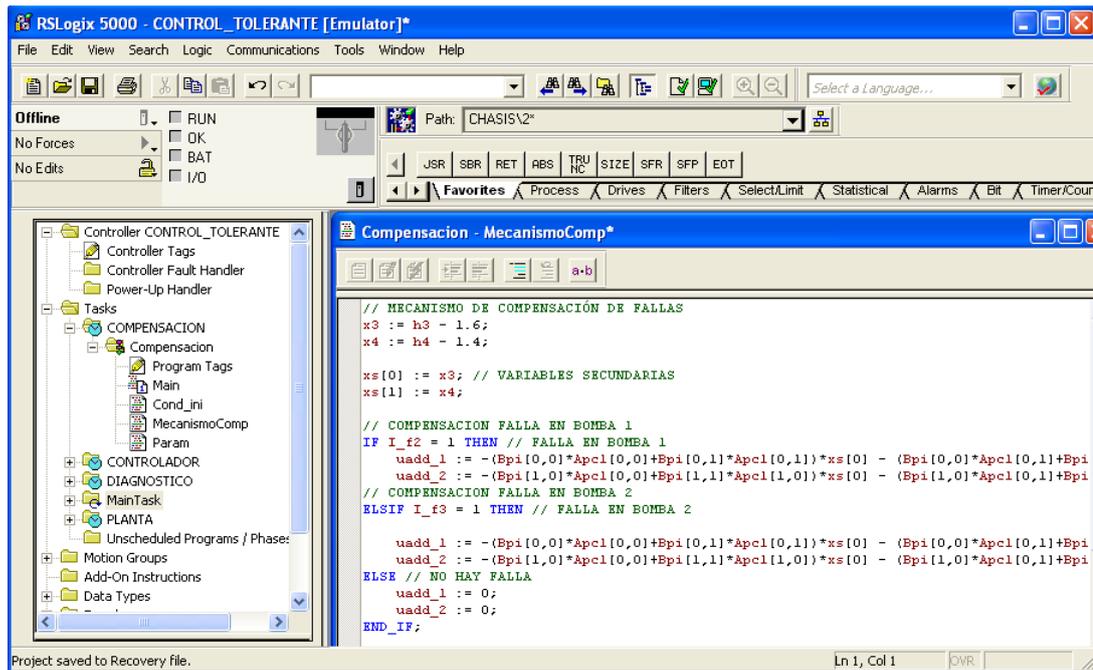


Figura 4.3: Interfaz del software RSLogix 5000.

Se realizaron las pruebas de implementación del método propuesto de diagnóstico y control tolerante de fallas parciales en actuadores en el software RSLogix 5000, cuya interfaz se muestra en la Fig. 4.3. El nombre del proyecto se puede observar en la parte superior y se llama “CONTROL_TOLERANTE”. Se crearon las siguientes tareas del tipo periódicas: “COMPENSACIÓN”, “CONTROLADOR”, “DIAGNÓSTICO” y “PLANTA”.

Una tarea periódica tiene la característica de realizar una determinada función en un intervalo o periodo específico (por ejemplo, 10 ms, su valor por defecto). En un proyecto con varias tareas, es inevitable que una tarea interrumpirá a otra en un determinado tiempo del ciclo. Para tratar con esto, a cada tarea se le asigna una determinada prioridad mediante un número, donde 1 es la mayor prioridad y 15 la menor. Al trabajar con varias tareas, se debe tener cuidado cuando se asignan las prioridades y periodos. Si dos tareas tienen la misma prioridad, el controlador alterna entre cada tarea y ejecuta cada tarea durante 1 ms (para mayor información se pueden consultar los manuales de Rockwell Automation). En las propiedades de la tarea, en la etiqueta “Monitor” se puede observar la cantidad de superposiciones (*overlap*) de la tarea y su tiempo de *scan*.

Por defecto, al crear un nuevo proyecto, se crea una tarea continua de nombre “MainTask”. Una tarea continua se ejecuta todo el tiempo y es útil para algunos tipos de aplicaciones. En un proyecto, sólo se puede crear una tarea continua. Además, esta tarea tiene la menor prioridad de todas las tareas, por lo tanto, se ve interrumpida por una tarea tipo periódica o tipo evento. Esta última tarea se ejecuta sobre la base de un evento, por ejemplo, una alarma.

La Fig. 4.4 muestra un diagrama de tiempos para tres tareas. La tarea principal (*Main Task*) es continua (en gris). Siempre está funcionando si las otras dos no lo están. La tarea 2 (en blanco) es una tarea periódica. Se ejecuta a intervalos de tiempo específicos. La tarea principal (continua) deja de ejecutarse y se ejecuta la tarea 2 (periódica) de mayor prioridad. La tarea

3 (en negro) es basada en eventos. Se ejecuta cuando se produce un evento específico. Es importante mencionar que sólo se puede ejecutar una tarea a la vez (Stenerson, 2009).

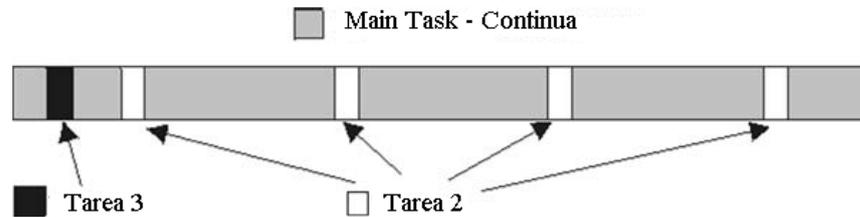


Figura 4.4: Ejecución de tareas tipo continua, periódica y basada en eventos.

Una tarea puede dividirse en uno o más programas, cada uno de ellos con sus propios *tags* (datos). Si se requiere que un tag sea accesible por todos los programas, debe definirse en el tag del controlador (*Controller Tags*) o si esta limitado a un programa en específico, debe definirse como tag del programa (*Program Tags*). Cada programa también tiene una o más rutinas. La lógica o el algoritmo de una determinada aplicación se crean en las rutinas. Las rutinas se organizan en una rutina principal y subrutinas adicionales. Una rutina es un conjunto de instrucciones lógicas escritas en un lenguaje de programación. En el RSLogix 5000 los lenguajes permitidos son: diagrama de tipo escalera, diagrama de función de bloques y texto estructurado. Sin embargo, en esta tesis se utiliza en su totalidad texto estructurado ya que es de fácil programación (parecido al lenguaje C) y puede trabajar con vectores y matrices.

La tarea “PLANTA” simula el sistema de cuatro tanques acoplados (rutina *CuatroTanques*), mediante la discretización del modelo no lineal (Ec. 2.14) utilizando el método de Euler. Esta tarea tiene un periodo de 20 ms, el cual es menor que las otras tareas con el fin de disminuir el error de discretización. En la planta real, esta tarea debe ser reemplazada por una tarea de lectura de datos a partir de los sensores de nivel de los tanques y escritura de las señales de control.

La tarea “CONTROLADOR” ejecuta el algoritmo del controlador nominal (mediante la rutina *RealimEstados* para el controlador por realimentación de estados, y mediante la rutina *DMC* para el controlador DMC). Por otro lado, la tarea “DIAGNÓSTICO” se encarga de la detección y aislamientos de fallas, así como, de la estimación de fallas (rutina *UIO*). Finalmente, la tarea “COMPENSACIÓN” lleva a cabo el mecanismo de compensación de fallas (rutina *MecanismoComp*). Todas estas tareas se ejecutaron con un periodo igual a 100 ms (0.1 s), el cual fue utilizado en las simulaciones realizadas en el capítulo anterior (con la excepción de la tarea “CONTROLADOR” cuando implementa el algoritmo del controlador DMC, el cual tiene un periodo de 4000 ms, es decir, 4 s). Al descargar el programa en el PLC virtual (RSLogix Emulate 5000) se observa que no existe superposición de tareas y que el tiempo de *scan* de las tareas están en el orden de los 1-2 ms (con excepción de la tarea “CONTROLADOR” cuando implementa el algoritmo del controlador DMC, el cual tiene un tiempo de *scan* entre 30-40 ms).

La estructura de los programas y las rutinas de todas las tareas se muestran en la Fig. 4.5. Todos los programas tienen las siguientes rutinas comunes:

- *Main*: es la rutina principal y tiene propósito de controlar la ejecución del programa y

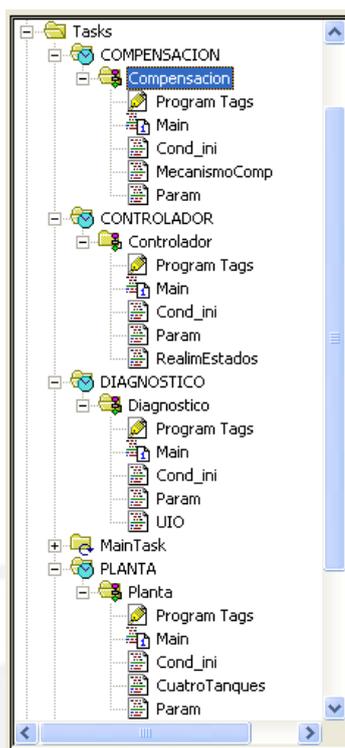


Figura 4.5: Estructura del programa del PLC en RSLogix 5000.

llamar a las subrutinas cuando sea necesario.

- *Cond_ini*: esta rutina se encarga de declarar e inicializar las variables necesarias para la ejecución del programa. Por ejemplo, condiciones iniciales de la planta, del vector integrador, condición inicial de los observadores, etc. Esta rutina solo se ejecuta durante la primera ejecución de la tarea por medio de la bandera (flag) *First Scan*. Esta llama a la rutina *Param*.
- *Param*: por un motivo de orden, esta rutina contiene los parámetros que necesitan las tareas para su ejecución. Por ejemplo, parametros del modelo de la planta, ganancias del controlador, ganancias del observador, etc.

4.4. Interfaz con FactoryTalk View

En la Fig. 4.6 se muestra la interfaz gráfica desarrollada en el software FactoryTalk View. Este software permite la conexión con RSLogix de una manera sencilla. Se implementaron gráficos representativos de la planta, los cuales facilitan la visualización de las variables de interés, y se vincularon con los *tags* empleados en la programación del controlador.

Se creó una ventana en la que se realizó el diagrama funcional de la planta de cuatro tanques acoplados, mostrado en la Fig. 4.7. Se incorporó un selector para el cambio del modo del controlador de automático a manual.

También se crearon ventanas adicionales para: el monitoreo de las variables controladas (nivel de los tanques inferiores 1 y 2) y variables manipuladas o señales de control (voltaje que se aplica a las bombas 1 y 2), la detección y aislamiento de fallas (mediante la comparación de

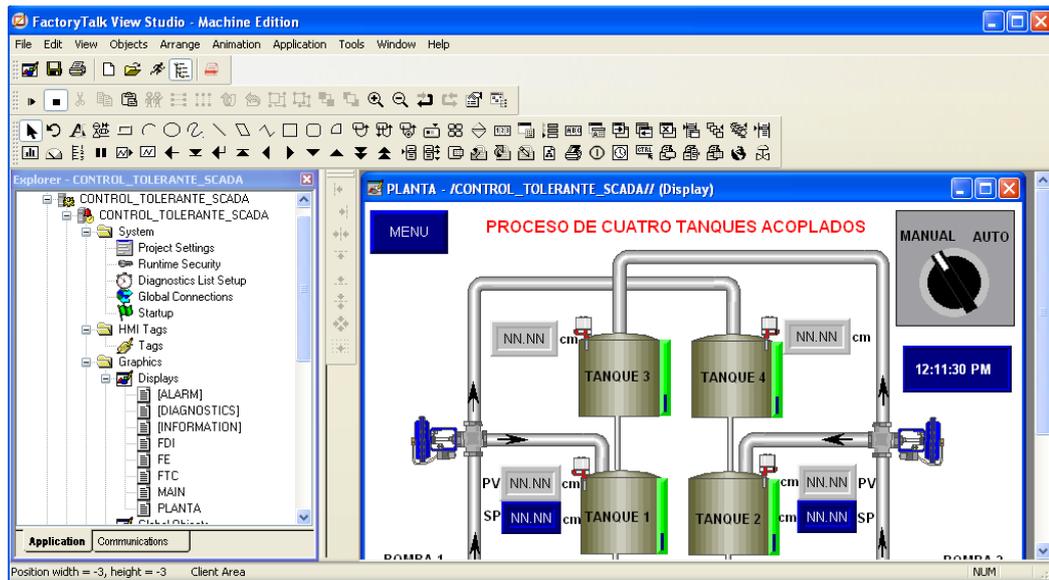


Figura 4.6: Interfaz del software FactoryTalk View Studio ME.

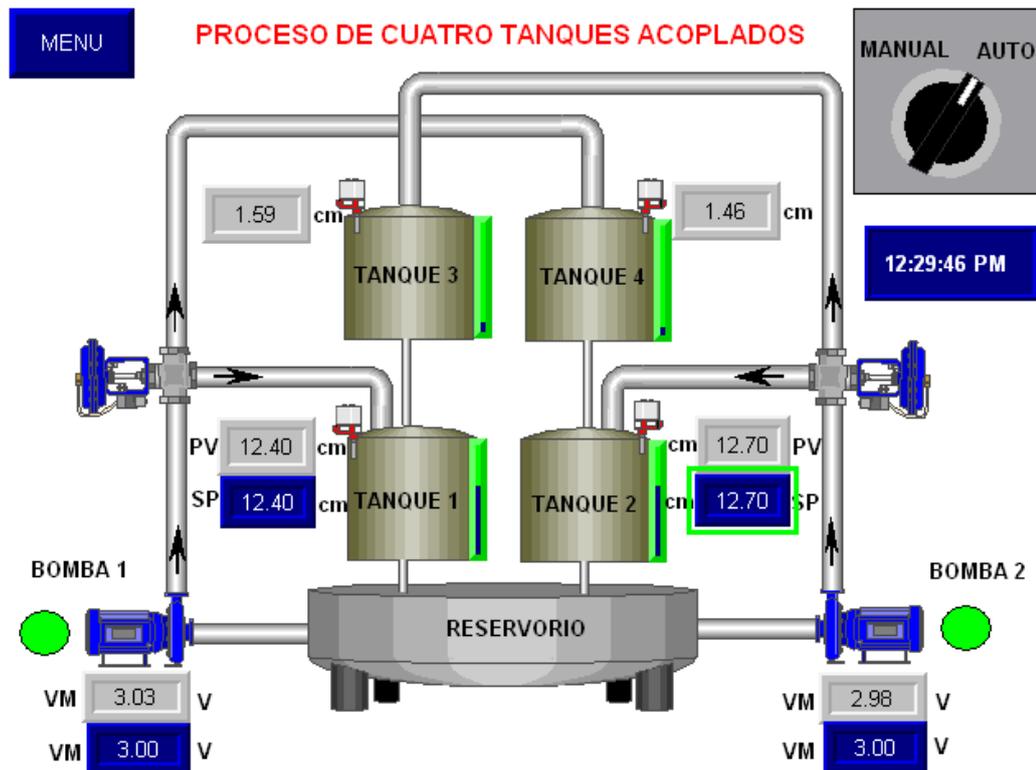


Figura 4.7: Diagrama funcional de la planta de cuatro tanques acoplados.

los residuos con sus valores umbrales) y la estimación de fallas. Estas ventanas se muestran en la siguiente sección.

4.4.1. Resultados de simulación de fallas

Se simuló el mismo escenario de falla desarrollado en el capítulo anterior, es decir, una pérdida de efectividad del actuador 1 (bomba 1) de 70 % ($\alpha_1 = 0.3$). Esto significa, que la

señal de control es multiplicada por una constante igual a 0.3.

Primero se simuló la respuesta del sistema con el controlador nominal (sin compensación de fallas), la cual se muestra en la Fig. 4.8 para el controlador por realimentación de estados, y en la Fig. 4.9 para el controlador DMC. En ambas figuras se muestran las variables controladas (el nivel de los tanques 1 y 2), y las variables manipuladas o entradas de control (voltajes que se aplican a las bombas 1 y 2). Además, se muestran los puntos de consigna o referencia, y un selector que permite cambiar el tipo de controlador (de un controlador nominal o clásico, que no considera compensación de fallas, a un controlador tolerante a fallas o FTC).

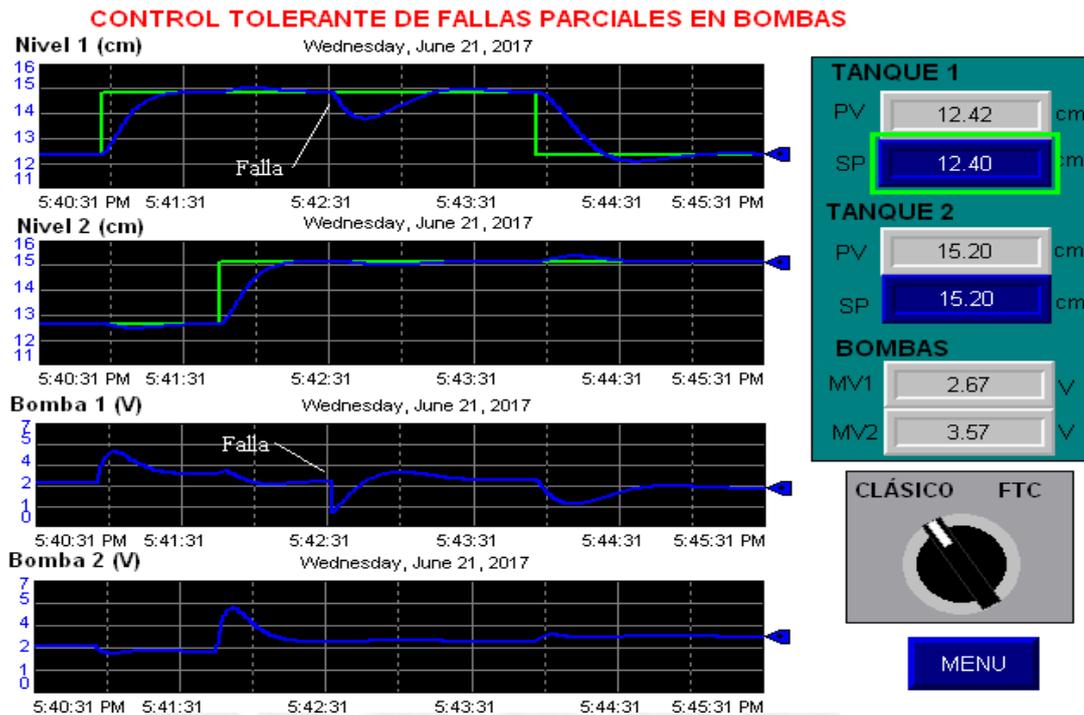


Figura 4.8: Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador basado en realimentación de estados en el software FactoryTalk View para una falla en la bomba 1.

Como se puede observar, cuando ocurre la falla parcial en la bomba 1, la respuesta del sistema para ambos controladores se deteriora, volviéndose más lenta y con sobreimpulsos (esto en mayor grado para el controlador DMC en comparación al controlador por realimentación de estados).

A continuación, se simula la respuesta del sistema con el controlador tolerante de fallas (controlador nominal con compensación de fallas). En la Fig. 4.10 se muestra la respuesta del sistema para el controlador por realimentación de estados, y en la Fig. 4.11 para el controlador DMC. En ambas figuras, se puede observar que la falla es compensada rápidamente y la respuesta no se ve afectada notoriamente como en el caso anterior. Esto es debido a que la señal de control que se envía a la bomba 1 reacciona más rápido para el controlador tolerante de fallas en comparación del controlador nominal (que no considera ningún mecanismo de compensación). Estos resultados son similares a los obtenidos en el capítulo anterior con MATLAB.

En las Fig. 4.12 y Fig. 4.13 se muestra la ventana correspondiente a la detección y aislamiento de fallas (FDI) en las bombas para el controlador por realimentación de estados y controlador DMC respectivamente. En esta ventana se observa la evolución temporal de los

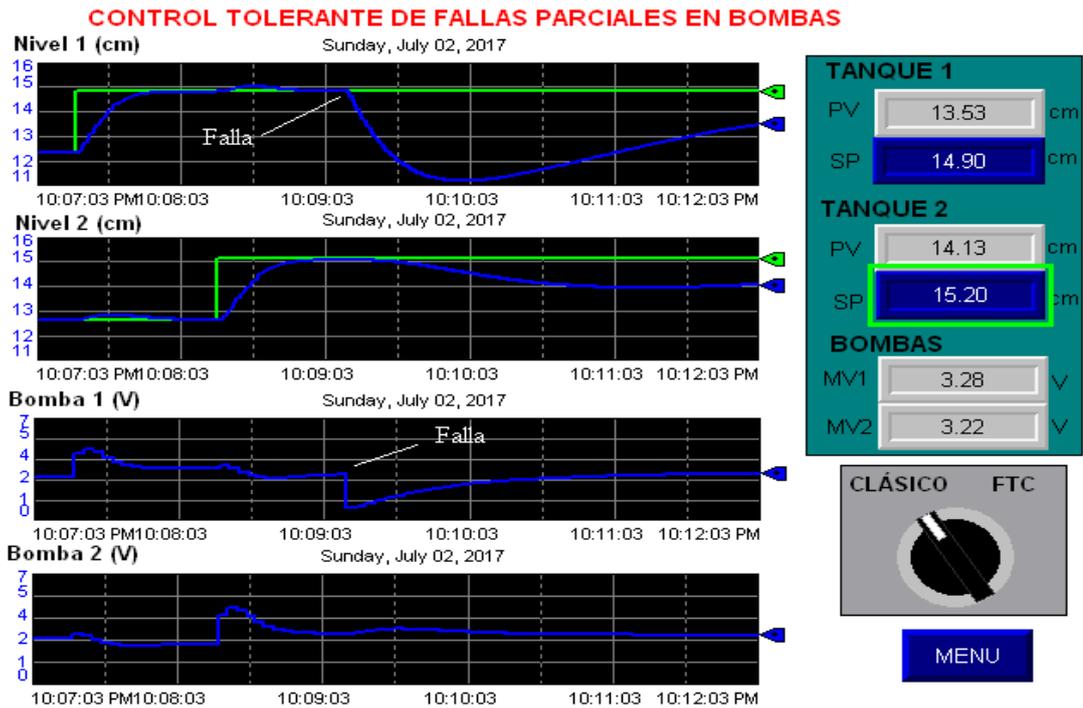


Figura 4.9: Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC en el software FactoryTalk View para una falla en la bomba 1.

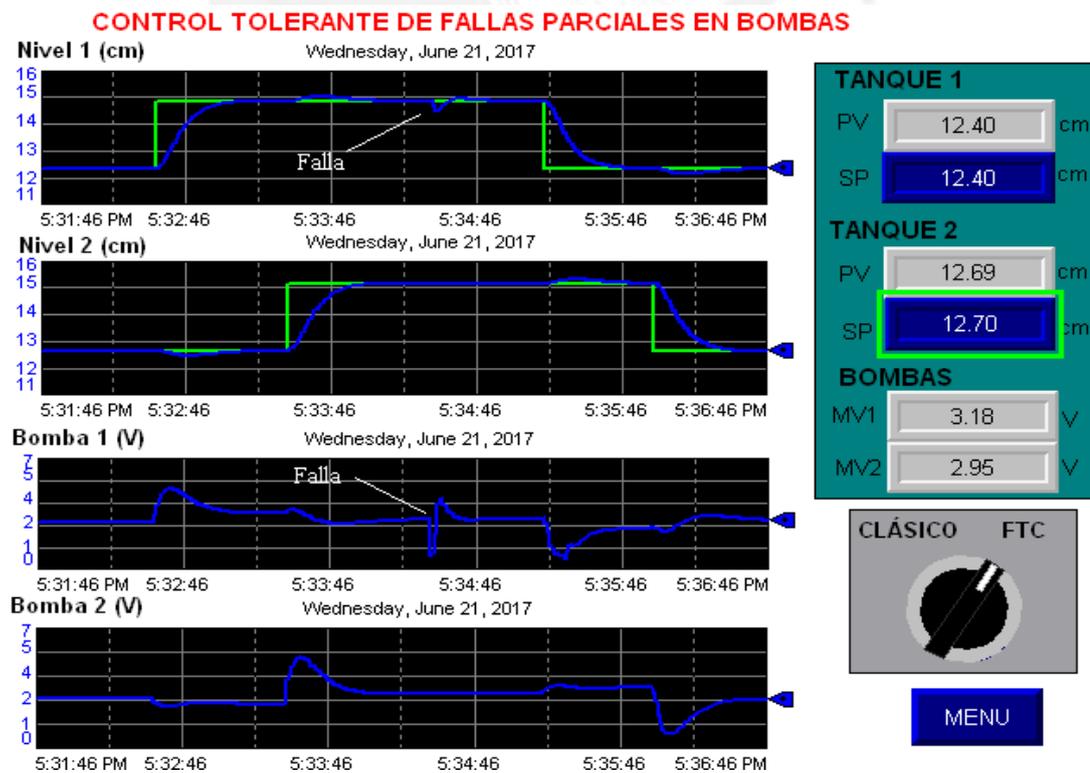


Figura 4.10: Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador por realimentación de estados con compensación de fallas en el software FactoryTalk View.

CONTROL TOLERANTE DE FALLAS PARCIALES EN BOMBAS

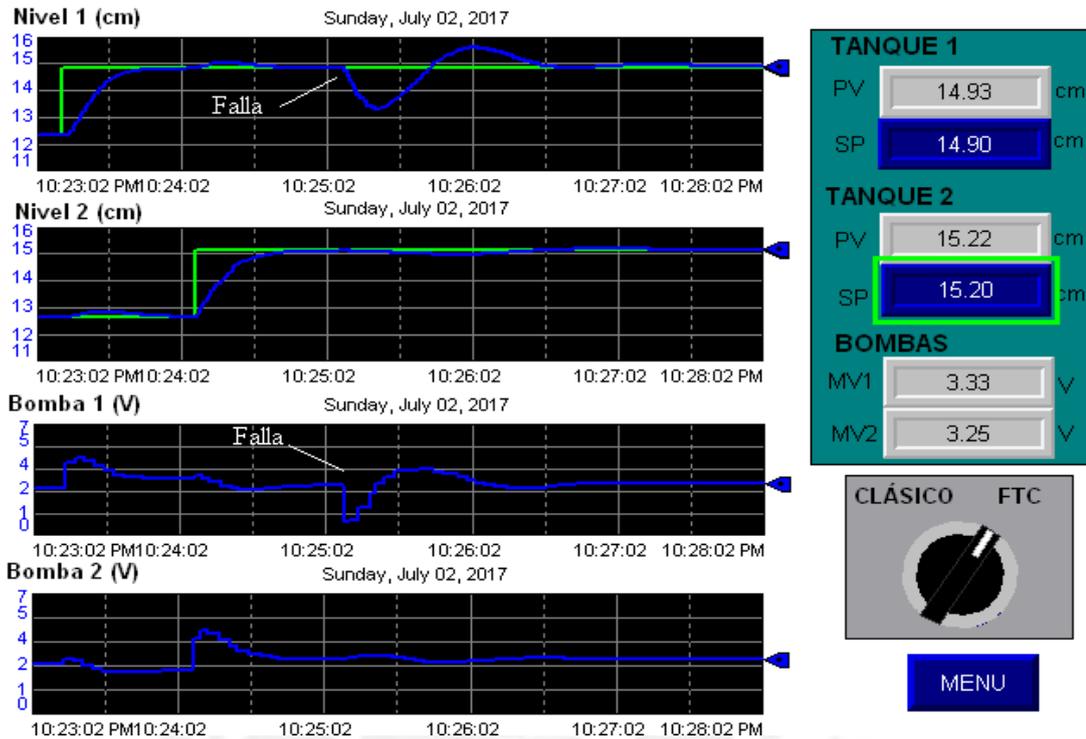


Figura 4.11: Respuesta del sistema de lazo cerrado con el controlador DMC con compensación de fallas en el software FactoryTalk View.

residuos (Valores RMS) y se comparan con sus valores umbrales (límites). Para la planta real los valores de los umbrales deben determinarse experimentalmente. Recordar que de acuerdo a la metodología desarrollada en el capítulo anterior, los residuos para una determinada bomba es insensible a una falla en la misma, pero sensible a una falla en la otra bomba.

En las Fig. 4.12 y Fig. 4.13 se observa que el residuo de la bomba 2 supera su valor umbral; por lo tanto, se detecta la falla en la bomba 1, mientras que el otro residuo de la bomba 1 se mantiene por debajo de su valor umbral, es decir, no hay falla en la bomba 2. Es importante mencionar que para el desarrollo del sistema FDI se asumió que no hay fallas simultáneas en ambas bombas, debido a la baja probabilidad que suceda. En el software FactoryTalk View también se configuró para que se envíen alarmas cuando se detecten fallas en las bombas.

En las Fig. 4.14 y Fig. 4.15 se muestra la ventana correspondiente a la estimación de fallas en las bombas. Como se puede observar, se logra estimar la magnitud de la falla en la bomba 1 correctamente. La estimación de la magnitud de la falla es necesario para poder calcular la acción de control de compensación.

Los resultados de la simulación concuerdan a los obtenidos con MATLAB en el capítulo anterior. La única diferencia fue que en la simulaciones con el software RSLogix 5000 no se pudo incorporar ruido en las mediciones.

DETECCIÓN Y AISLAMIENTO DE FALLAS PARCIALES EN BOMBAS

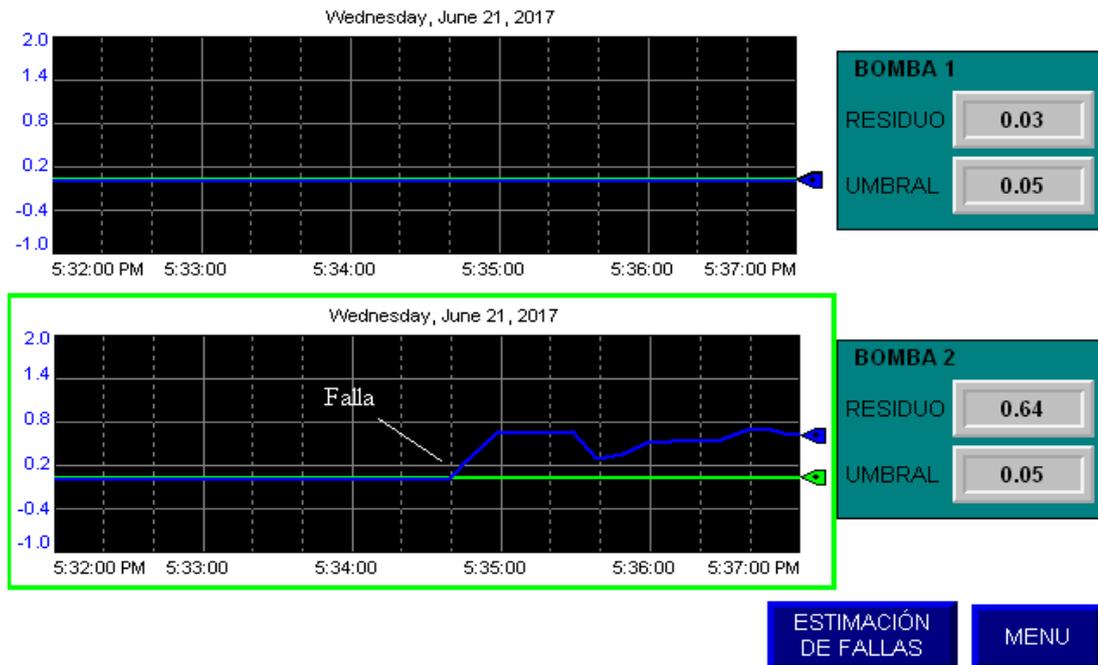


Figura 4.12: Detección y aislamiento de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador por realimentación de estados).

DETECCIÓN Y AISLAMIENTO DE FALLAS PARCIALES EN BOMBAS

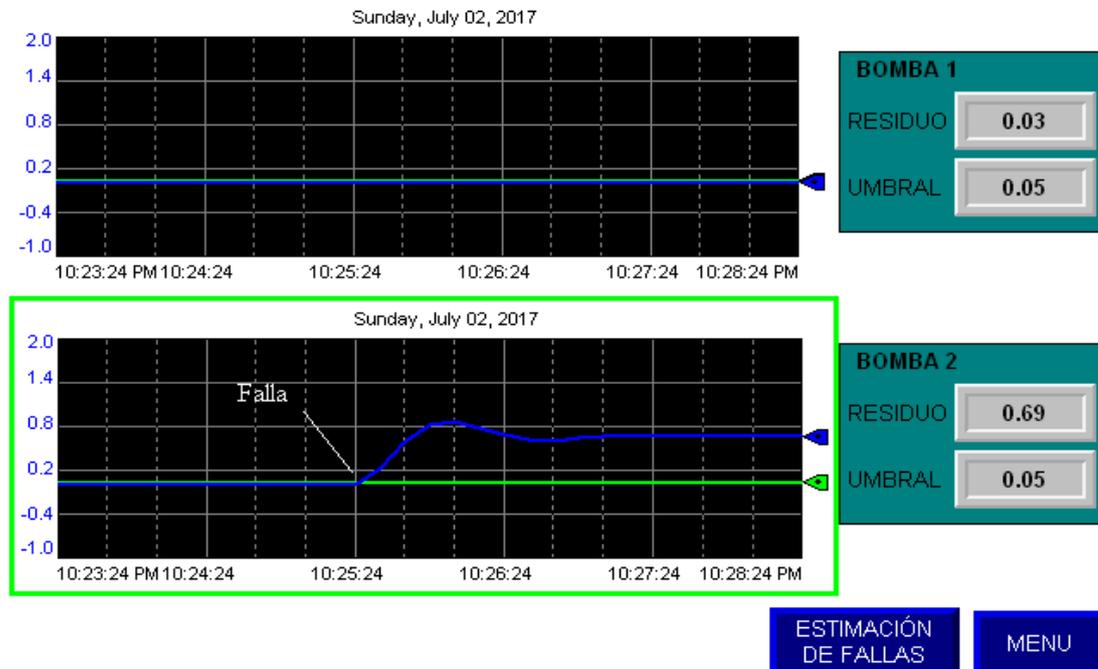


Figura 4.13: Detección y aislamiento de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador DMC).

ESTIMACION DE FALLAS PARCIALES EN BOMBAS

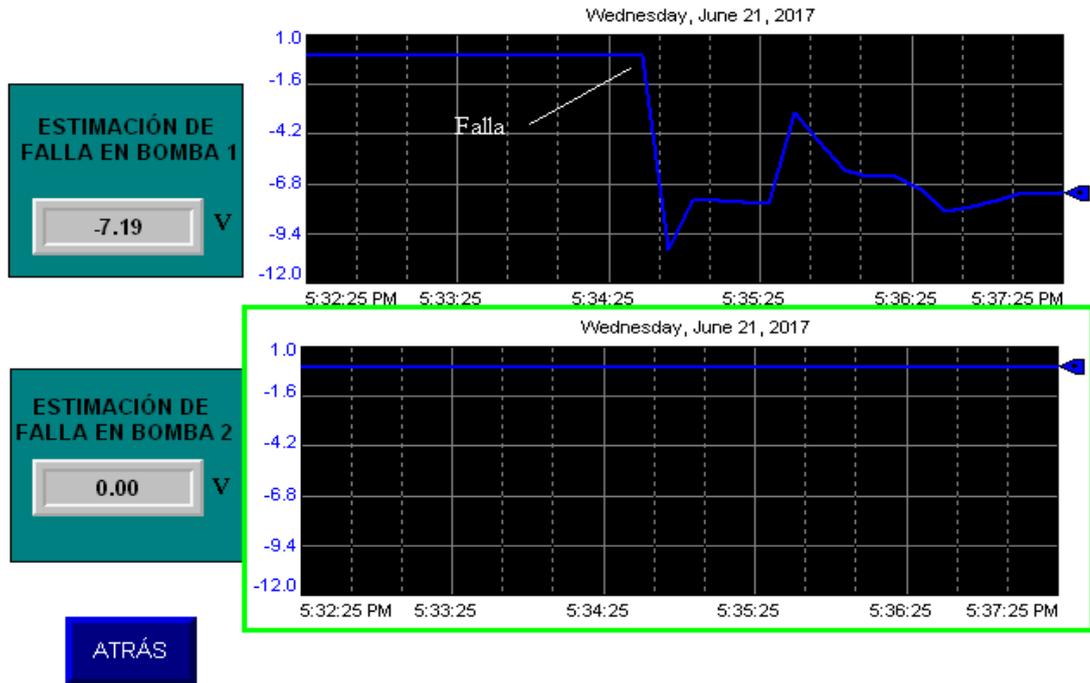


Figura 4.14: Estimación de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador por realimentación de estados).

ESTIMACION DE FALLAS PARCIALES EN BOMBAS

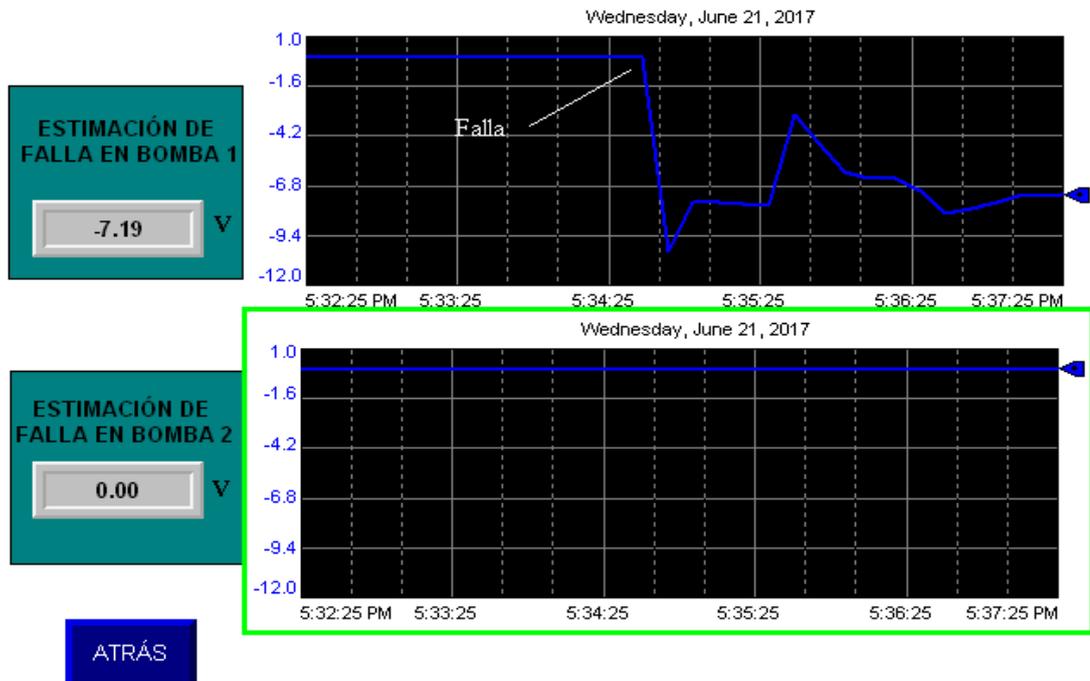


Figura 4.15: Estimación de fallas de las bombas en el software FactoryTalk View (controlador DMC).

4.5. Conclusiones parciales

- Se realizó una propuesta de implementación práctica del sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas parciales en actuadores (bombas). Para esto, se programaron los algoritmos respectivos en el software RSLogix 5000, utilizando como lenguaje de programación el Texto Estructurado, y luego se simularon en un emulador de PLC de Allen Bradley llamado RSLogix Emulate 5000. Los resultados obtenidos son similares a las simulaciones en SIMULINK.
- El software FactoryTalk View fue utilizado para desarrollar una interfaz gráfica, tal que permita monitorear las variables controladas y diagnosticar fallas parciales en las bombas.



CONCLUSIONES GENERALES

- Se diseñó un sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas parciales en actuadores el cual permite mantener el desempeño del sistema de control aun en presencia de estas fallas.
- Se estudió y analizó el estado de arte para el diagnóstico y control tolerante de fallas en sistema hidráulicos, principalmente en tanques. Este incluye una clasificación general de las distintas metodologías, tipos de fallas, y una revisión de los principales artículos de los últimos años.
- Se obtuvo el modelo no lineal del proceso de cuatro tanques acoplados a partir de las ecuaciones de balance de materia y Bernoulli para cada tanque. Luego, utilizando la aproximación de Taylor, se linealizó el sistema alrededor del punto de operación de estado estacionario, y se obtuvo el modelo lineal del proceso.
- Se diseñaron los controladores: por realimentación de estados (RE) y por matriz dinámica (DMC), los cuales se desempeñan correctamente y cumplen con las especificaciones deseadas cuando no hay fallas parciales en los actuadores. Se comprobó que en presencia de estas fallas el desempeño de los controladores se deteriora, siendo el impacto mayor para el controlador DMC. Esto se cuantificó utilizando el índice de desempeño ISE (integral del error cuadrático).
- El sistema de diagnóstico de fallas parciales en actuadores, diseñado a partir de observadores de entrada desconocida (UIO), logró detectar, aislar, y estimar las fallas satisfactoriamente.
- El desempeño del controlador tolerante a fallas (FTC) diseñado se comparó con el controlador sin compensación de fallas. Se demostró que el desempeño del FTC es superior, y el valor del ISE es cercano al que se obtiene cuando no hay fallas en el sistema. También se demostró que el desempeño del FTC se deteriora si el tiempo de detección de la falla es mayor.
- La propuesta de implementación del sistema de diagnóstico y control tolerante a fallas parciales en actuadores en tiempo real con el software RSLogix 5000 de Rockwell Automation, dio resultados similares a los obtenidos en Simulink. Además, se realizó satisfactoriamente la comunicación con el software FactoryTalk View y se pudo monitorear las variables de interés del proceso desde la interfaz de usuario construida.

RECOMENDACIONES

- Para la planta piloto de cuatro tanques, dependiendo de su configuración, obtener su modelo matemático mediante las ecuaciones de balance de masa y Bernoulli, de forma similar a como se realizó para el sistema de Johansson (2000). Después, se debe validar el modelo con datos adquiridos de la planta real.
- Aplicar el sistema de diagnóstico y control tolerante de fallas diseñado a la planta piloto de cuatro tanques acoplados. Para esto, se tendría que reemplazar la rutina donde se simuló el comportamiento dinámico de la planta por un rutina de lectura de datos, a partir de los sensores de nivel de los tanques y escritura de las señales de control.
- Comparar el mecanismo de compensación de fallas diseñado en la planta piloto con otras técnicas encontradas en la literatura, con el propósito de determinar ventajas y desventajas de los mismos.
- Estudiar la extensión de los técnicas aplicadas para el diagnóstico y control tolerante de fallas a sistemas no lineales, con el fin de aumentar el rango de operación de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

- Alipouri, Y. y Poshtan, J. (2013). Optimal controller design using discrete linear model for a four tank benchmark process. *ISA transactions*, 52(5):644–651.
- Alvarado, I., Limon, D., De La Peña, D. M., Maestre, J., Ridao, M., Scheu, H., Marquardt, W., Negenborn, R., De Schutter, B., Valencia, F., et al. (2011). A comparative analysis of distributed mpc techniques applied to the hd-mpc four-tank benchmark. *Journal of Process Control*, 21(5):800–815.
- Anzures-Marin, J., Pitalua-Diaz, N., Cuevas-Silva, O., y Villar-García, J. (2008). Unknown inputs observers design for fault detection in a two-tank hydraulic system. In *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, 2008. CERMA'08*, pages 373–378. IEEE.
- Arici, M. y Kara, T. (2016). Adaptive fault tolerant control for liquid tank process. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*.
- Bao-Cang, D. y Baocang, D. (2010). *Modern predictive control*. CRC Press, USA.
- Bequette, B. W. (1998). *Process Dynamics: Modeling, Analysis and Simulation*. Prentice hall PTR Upper Saddle River, NJ.
- Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J., y Staroswiecki, M. (2016). *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.
- Buciakowski, M., de Rozprza-Faygel, M., Ochalek, J., y Witczak, M. (2014). Actuator fault diagnosis and fault-tolerant control: application to the quadruple-tank process. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 570, page 082002. IOP Publishing.
- Camacho, E. F. y Bordons, C. (2007). *Model Predictive control*. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer-Verlag London, 2 edition.
- Casavola, A., Famularo, D., Franze, G., y Furfaro, A. (2010). A fault-tolerant real-time supervisory scheme for an interconnected four-tank system. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 6210–6215. IEEE.
- Castelló, R. C., Puig, V., y Blesa, J. (2016). Introducción a la diagnosis de fallos basada en modelos mediante aprendizaje basado en proyectos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 13(2):186–195.
- Chen, J. y Patton, R. J. (1999). *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems*, volume 3. Springer Science & Business Media.

- Cutler, C. R. y Ramaker, B. L. (1980). Dynamic matrix control - a computer control algorithm. In *Joint automatic control conference*, number 17, page 72.
- d'Azzo, J. J. y Houpis, C. D. (1995). *Linear control system analysis and design: conventional and modern*. McGraw-Hill Higher Education.
- Ding, S. (2008). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer Science & Business Media, 1 edition.
- Ding, S. (2013). *Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools*. Springer, 2 edition.
- Dorf, R. C., Bishop, R. H., Canto, S. D., Canto, R. D., y Dormido, S. (2005). *Sistemas de control moderno*. Pearson Prentice Hall.
- Edwards, C., Lombaerts, T., y Smaili, H. (2010). Fault tolerant flight control. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 399.
- Garriga, J. L. y Soroush, M. (2010). Model predictive control tuning methods: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(8):3505–3515.
- Gertler, J. (1998). *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. CRC press.
- Gharaee, Z. y Shoorehdeli, M. A. (2015). An observer based fault detection and isolation in quadruple-tank process. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2015 27th Chinese*, pages 2437–2442. IEEE.
- Goodwin, G. C., Graebe, S. F., y Salgado, M. E. (2001). *Control system design*. Upper Saddle River.
- Hajiani, P. y Poshtan, J. (2011). Fault-tolerant tracking control for a four-tank system benchmark via eigenstructure assignment and parameter estimation. In *Control, Instrumentation and Automation (ICCIA), 2011 2nd International Conference on*, pages 502–506. IEEE.
- Hameed, I., Elmadbouly, E. I., y Abdo, M. I. (2015). Sensor and actuator fault-hiding reconfigurable control design for a four-tank system benchmark. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 11(2):679–690.
- Hou, M. y Muller, P. (1994). Disturbance decoupled observer design: A unified viewpoint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 39(6):1338–1341.
- Indriawati, K., Agustinah, T., y Jazidie, A. (2013). Reconfigurable fault-tolerant control of linear system with actuator and sensor faults. In *Control System, Computing and Engineering (ICCSCE), 2013 IEEE International Conference on*, pages 22–27. IEEE.
- Jayaprakash, J. y Kumar, M. H. (2014). State variable analysis of four tank system. In *Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014 International Conference on*, pages 1–8. IEEE.

- Johansson, K. H. (2000). The quadruple-tank process: A multivariable laboratory process with an adjustable zero. *IEEE Transactions on control systems technology*, 8(3):456–465.
- Kamel, M., Chadli, M., Chaabane, M., El Hajjaji, A., y Chaari, A. (2009). Fault detection and isolation for a lipschitz nonlinear system: Application to a bank of tanks. In *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on*, pages 377–382. IEEE.
- Kautsky, J., Nichols, N. K., y Van Dooren, P. (1985). Robust pole assignment in linear state feedback. *International Journal of control*, 41(5):1129–1155.
- Khedher, A., Othman, K. B., y Benrejeb, M. (2011). Active fault tolerant control (ftc) design for takagi-sugeno fuzzy systems with weighting functions depending on the ftc. *International Journal of Computer Science Issues*, 8(3):1.
- Kiran, K. L., Selvaraj, S., Lee, J., y Hua, C. (2012). Application of fault monitoring and diagnostic techniques and their challenges in petrochemical industries. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(15):702–707.
- Korbicz, J. y Witczak, M. (2007). An extended unknown input observer-based approach to fault diagnosis of a two-tank system. *IFAC Proceedings Volumes*, 40(12):922–927.
- Kousar, F., Abid, M., y Khan, A. Q. (2012). Sensor fault detection in coupled liquid tanks system. In *Frontiers of Information Technology (FIT), 2012 10th International Conference on*, pages 318–324. IEEE.
- Lakhmani, P., Valluru, J., Chandrasekaran, G., y Patwardhan, S. C. (2016). Application of a moving window parameter estimator for leak identification in the quadruple tank system. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1):629–634.
- Ljung, L. (1999). *System identification: Theory for the User*. Prentice Hall, New Jersey, 2nd edition.
- Luyben, W. L. (1990). *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. McGraw-Hill Higher Education.
- Luzar, M. (2016). Fault-tolerant control and diagnosis for a non-linear system with an unknown input observer. In *Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), 2016 21st International Conference on*, pages 871–876. IEEE.
- Maalej, I., Abid, D. B. H., Rekik, C., y Derbel, N. (2014). Fuzzy augmented state kalman observer for fault and state estimation. In *Systems, Signals & Devices (SSD), 2014 11th International Multi-Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- Mahmoud, M. S. y Xia, Y. (2013). *Analysis and synthesis of fault-tolerant control systems*. John Wiley & Sons.
- Marín, J. A. y Díaz, N. P. (2009). Detección y aislamiento robusto de fallas mediante observadores con entradas desconocidas. *DYNA*, 76(158):209–217.

- Mendonça, L. F., Sousa, J., y da Costa, J. S. (2012). Fault tolerant control using a fuzzy predictive approach. *Expert Systems with Applications*, 39(12):10630–10638.
- Nagarajan, S., Kayalvizhi, S., y Karthikeyan, B. (2016). Neural network based intelligent sensor fault detection in a three tanks interacting level process. In *Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference on*, pages 2429–2434. IEEE.
- Noura, H., Theilliol, D., Ponsart, J.-C., y Chamseddine, A. (2009). *Fault-tolerant control systems: Design and practical applications*. Springer Science & Business Media.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Prentice-Hall Hispanoamericana, 3ra. ed. edition.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Education, Madrid, 5ta. ed. edition.
- Orani, N., Pisano, A., y Usai, E. (2009). Fault detection and reconstruction for a three-tank system via high-order sliding-mode observer. In *Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC), 2009 IEEE*, pages 1714–1719. IEEE.
- Patton, R. J. (2015). Fault-tolerant control. *Encyclopedia of systems and control*, pages 422–428.
- Picó, M. F. (2015). Diseño de controladores tolerante a fallas aplicados a procesos de la industria química. Tesis de maestría, Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Prajapati, A. K. y Roy, B. (2016). Multi-fault diagnosis in three coupled tank system using unknown input observer. *IFAC-PapersOnLine*, 49(1):47–52.
- 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.
- Reverter, C. M., Ibarrola, J., y Cano-Izquierdo, J.-M. (2014). Tuning rules for a quick start up in dynamic matrix control. *ISA transactions*, 53(2):612–627.
- Rodrigues, M., Theilliol, D., Adam-Medina, M., y Sauter, D. (2008). A fault detection and isolation scheme for industrial systems based on multiple operating models. *Control Engineering Practice*, 16(2):225–239.
- Rodríguez-Mariano, A., Reynoso-Meza, G., Páramo-Calderón, D., Chávez-Conde, E., García-Alvarado, M., y Carrillo-Ahumada, J. (2015). Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de cholette mediante técnicas de decisión multi-criterio. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(1):167–204.
- Said, S. H. y M'Sahli, F. (2008). A set of observers design to a quadruple tank process. In *Control Applications, 2008. CCA 2008. IEEE International Conference on*, pages 954–959. IEEE.

- Seborg, D. E., Mellichamp, D. A., Edgar, T. F., y Doyle III, F. J. (2010). *Process dynamics and control*. John Wiley & Sons, 3rd edition.
- Shridhar, R. y Cooper, D. J. (1998). A tuning strategy for unconstrained multivariable model predictive control. *Industrial & engineering chemistry research*, 37(10):4003–4016.
- Smith, C. A. y Corripio, A. B. (2006). *Control automático de procesos: teoría y práctica*. Limusa.
- Sobhani, M. H. y Poshtan, J. (2012). Fault detection and isolation using unknown input observers with structured residual generation. *International Journal of Instrumentation and Control Systems*, 2(2):1–12.
- Sotomayor, O. A. y Odloak, D. (2005). Observer-based fault diagnosis in chemical plants. *Chemical Engineering Journal*, 112(1):93–108.
- Stenerson, J. (2009). *Programmable Logic Controllers with ControlLogix*. Cengage Learning.
- Sun, X. (2013). Unknown input observer approaches to robust fault diagnosis. Master's thesis, University of Hull, UK.
- Sutha, S., Lakshmi, P., y Sankaranarayanan, S. (2015). Fractional-order sliding mode controller design for a modified quadruple tank process via multi-level switching. *Computers & Electrical Engineering*, 45:10–21.
- Tahraoui, S., Meghabbar, A., Bellaouar, A., y Boubekeur, D. (2015). Actuators fault detection using unknown input observer in hydraulic system. In *Control, Engineering & Information Technology (CEIT), 2015 3rd International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- Theilliol, D., Noura, H., y Ponsart, J.-C. (2002). Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy. *ISA transactions*, 41(3):365–382.
- Vaccaro, R. J. (2014). An optimization approach to the pole-placement design of robust linear multivariable control systems. In *American Control Conference (ACC), 2014*, pages 4298–4305. IEEE.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Kavuri, S. N., y Yin, K. (2003a). A review of process fault detection and diagnosis: Part iii: Process history based methods. *Computers & chemical engineering*, 27(3):327–346.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., Yin, K., y Kavuri, S. N. (2003b). A review of process fault detection and diagnosis: Part i: Quantitative model-based methods. *Computers & chemical engineering*, 27(3):293–311.
- Witczak, M. (2014). Fault diagnosis and fault-tolerant control strategies for non-linear systems. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 266.
- Xue, D., Chen, Y., y Atherton, D. P. (2007). *Linear feedback control: analysis and design with MATLAB*. SIAM.

- Zarei, J. y Poshtan, J. (2010). Design of nonlinear unknown input observer for process fault detection. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(22):11443–11452.
- Zhang, K., Jiang, B., y Shi, P. (2012). *Observer-based fault estimation and accomodation for dynamic systems*, volume 436. Springer.
- Zhang, Y. y Jiang, J. (2008). Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems. *Annual reviews in control*, 32(2):229–252.

