



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

TESIS PRESENTADA COMO PARTE DE LOS REQUISITOS DE LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL PARA LA OBTENCIÓN DEL
GRADO ACADÉMICO DE

Magister en Tecnología Química

EN EL CAMPO DE: **Control Óptimo de Procesos**

TÍTULO DE LA TESIS:

**Diseño de Controladores Tolerante a Fallas
Aplicados a Procesos de la Industria Química**

INSTITUCIÓN DONDE SE REALIZÓ:

Departamento de Ingeniería Química – FIQ – UNL
Cátedra de Instrumentación y Control de Procesos

AUTOR: Ing. Martín F. Picó

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Eduardo Adam

MIEMBROS DEL JURADO:

Dra. Marta S. Basualdo

Dr. Jorge R. Vega

Dr. Ernesto C. Martinez

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2015

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) por haberme incentivado a finalizar esta tesis, apoyándome con la Becas Bicentenario de Investigación y Posgrado para docentes e investigadores, y a la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional del Litoral (UNL), por brindarme un lugar de trabajo para poder desarrollar y concluir el presente trabajo.

Especialmente quiero agradecer a mi director Dr. Eduardo Adam, por su constante orientación, empeño y dedicación a lo largo de todo esta tesis, y por la infinidad de horas dedicadas al intercambio constructivo de ideas. Sin su apoyo no hubiera sido posible concluir este trabajo.

Por último quiero agradecer a mis colegas y compañeros de cátedra de Instrumentación y Control de Procesos (ICP), por permitirme compartir un espacio de desarrollo profesional y académico, brindándome su amistad y compañerismo.

Martín F. Picó.

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Valor científico-técnico de la tesis	1
1.1.1. Áreas de aplicación y antecedentes del FTC	2
1.1.2. Antecedentes de la FDD	6
1.2. Motivaciones	7
1.3. Estructura de la Tesis	10
2. Nociones y conceptos preliminares	11
2.1. Clasificación de los FTCS	11
2.1.1. PFTCS	11
2.1.2. AFTCS	13
2.2. Estructura general de los AFTCS.	14
2.3. Terminología	16
2.4. Clasificación de fallas.	18
2.4.1. Tipos de fallas y perturbaciones.	19
2.5. Representación de las fallas	20
2.5.1. Fallas y perturbaciones multiplicativas	21
2.5.2. Fallas Aditivas	22
2.6. Conceptos de redundancia y vector de paridad	24
2.6.1. Redundancia Física.	25
2.6.2. Redundancia Analítica	25
3. Fund. de la Ident. de Sist.	29
3.1. Introducción	29
3.2. Identificación de sistemas	30
3.2.1. Sistemas dinámicos y modelización matemática.	31
3.2.2. Representación discreta de sistemas continuos	32
3.3. Ecuación en diferencias lineales con coeficientes constantes.	33
3.3.1. Operador desplazamiento	34
3.4. Identificación de procesos con modelos autorregresivos	34
3.4.1. Principales modelos discretos	34
3.4.2. Estimación de Parámetros	36
3.5. Aplicación experimental	36

3.5.1. Sistema experimental de laboratorio	37
3.5.2. Hipótesis de modelado	38
3.5.3. Modelo no lineal y lineal	38
3.5.4. Válvulas de control	39
3.5.5. Obtención de constantes y punto de operación	40
3.6. Conclusiones	44
4. Detección y Diagnóstico de Fallas	47
4.1. Introducción	47
4.2. Generación de Residuos	49
4.2.1. Generador de Residuos Genérico	50
4.3. Métodos basados en ecuaciones de paridad	52
4.3.1. Ecuaciones de Paridad en el dominio frecuencial	52
4.3.2. Residuos Estructurales	54
4.3.3. Ecuaciones de paridad en espacio de estados	54
4.3.4. Ejemplo Motor de DC	58
4.4. Residuos direccionales con GPV	61
4.4.1. Factorización Estable	61
4.4.2. Factorización Estable en espacio de estados	62
4.4.3. Generación de residuos direccionales	63
4.4.4. Aislación de fallas usando residuos direccionales	65
4.4.5. Resumen del método con GPV	66
4.4.6. Ejemplo del método con GPV	66
4.5. Detección de fallas con Observadores	69
4.5.1. Observadores de estado	71
4.5.2. Aislación de fallas con observadores de estado	73
4.5.3. Filtro de detección de fallas - FDF	74
4.5.4. Configuraciones de observadores simples	76
4.5.5. Bancos de Observadores	78
4.5.6. Observadores de Diagnóstico u Observador Funcional	80
4.5.7. Observadores de entrada desconocida	83
4.5.8. Diseño de residuos robustos mediante observadores de entrada desconocida	85
4.6. Ejemplo: reactor tanque agitado CSTR	87
4.6.1. Introducción al problema del reactor CSTR	87
4.6.2. Planteo del problema del reactor CSTR	88
4.6.3. Diseño y cálculos	90
4.6.4. Simulación Numérica	92
4.7. Comentarios finales sobre observadores y ecuaciones de paridad	95
4.8. Conclusiones	96

5. Evaluación de residuos y diagnóstico	103
5.1. Evaluación de residuos	103
5.1.1. Definición de la función $T(t)$	104
5.2. Aislación de fallas	105
5.2.1. Residuos Estructurales	105
5.2.2. Residuos Direccionales	106
5.3. Matriz de incidencia en diagnóstico de residuos estructurales	106
5.3.1. Consideraciones sobre diagnosticabilidad	107
5.4. Conclusiones	108
6. Adaptación y compensación de fallas	111
6.1. Introducción	111
6.2. Adaptación y compensación de fallas.	112
6.2.1. Adaptación de fallas en los sensores.	112
6.2.2. Adaptación de fallas en los actuadores.	114
6.3. Aplicaciones a los modelos estudiados	114
6.3.1. Tres tanques con interconexión	114
6.3.2. CSTR	119
6.4. Conclusiones	123
7. Conclusiones	125
7.1. Resumen de la Tesis	125
7.2. Conclusiones de la Tesis	126
7.3. Alcances y Futuros Desarrollos	127
A. Conceptos básicos utilizados	129
A.1. Principio de los mínimos cuadrados	129
A.2. Identificación de Sistema Discretos por Mínimos Cuadrados	130
A.3. Observadores de estado	131
B. Demostraciones y procedimientos	135
B.1. Manera recursiva de calcular la matriz de parámetros $\hat{\theta}$.	135
B.2. Procedimiento para obtener el Filtro de Beard and Jones	136
C. Artículos Publicados	137

Índice de figuras

1.1. Clasificación de los métodos de FDD. Marcados los métodos que se estudian en la presente tesis.	8
1.2. Esquema genérico del un AFTCS.	9
2.1. Estrategias de Control Tolerante a Fallas, de acuerdo a la severidad de las Fallas [52].	12
2.2. Estructura general de los FTCS.	15
2.3. Tipos de fallas:(a)Abrupta. (b)Incipiente.	19
2.4. Tipos de fallas.(c)Intermitente.(d)Derivas.	20
2.5. Sistema con fallas aditivas (f_u y f_y) y multiplicativas ($\Delta\Sigma$).	21
2.6. Sistema con fallas aditivas en todos sus transductores.	24
3.1. Diagrama para la identificación de sistemas basado en los trabajos de Söderström y Stoica [68] y Ljung [35].	31
3.2. Sistema de tanques presente en el laboratorio.	37
3.3. Diagrama esquématico del sistema de tres tanques.	37
3.4. Servotor neumático de válvula de control.	40
3.5. a. Curva inherente. b. Curva instalada de la válvula de control.	41
3.6. Caudal real vs % de apertura de la válvula de control.	42
3.7. Curva de la válvula de control. Caudal vs. presión neumática.	42
3.8. Datos del Tanque 1 relevados en la experiencia de laboratorio.	43
3.9. Identificación del primer tanque.	44
3.10. Validación del primer tanque.	44
4.1. Descripción esquemática de los generadores de residuos basados en modelo.	49
4.2. Generador de Residuos Genérico	51
4.3. Estructura general de un generador de residuos.	51
4.4. Generación de residuos con ecuaciones de paridad con funciones de transferencia para polinomio de error.	53
4.5. MotorDC de Laboratorio. Yamamoto YA-070.	58
4.6. Residuos estructurales para una falla en el sensor de velocidad. -5% en $t = 3[s]$ y -10% en $t = 6[s]$	59

4.7. Residuos estructurales para una falla en el voltaje del actuador. +5 % en $t = 5[s]$.	60
4.8. Residuos estructurales para una falla en el transductor de corriente. -5 % en $t = 8[s]$ y -10 % en $t = 12[s]$.	60
4.9. GPV para una falla en el sensor de velocidad. -5 % at $t = 3[s]$ and -10 % at $t = 6[s]$.	67
4.10. GPV para una falla en el Voltaje aplicado en +5 % at $t = 5[s]$.	68
4.11. GPV para una falla en el sensor de corriente. -5 % at $t = 8[s]$ and -10 % at $t = 12[s]$.	69
4.12. Observador de orden completo.	70
4.13. Proceso y Observador de Estado de Orden completo.	72
4.14. Observador con medición más fiable.	77
4.15. Banco de observadores e inferidor u observadores dedicados.	77
4.16. Redundancia de hardware junto a redundancia analítica.	78
4.17. Banco de observadores u observadores dedicados. Para todas las entradas y una salida. Para una entrada y todas las salidas.	79
4.18. Banco de observadores u observadores dedicados. Para todas las entradas, y todas las salidas menos una. Para todas las entradas menos una, y todas las salidas.	81
4.19. Proceso y Observador de Salida.	82
4.20. Proceso y Observador de Entrada Desconocida.	85
4.21. Diagrama ilustrativo del CSTR y el sistema de control implementado.	88
4.22. Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5 % at $t = 30[\text{min}]$.	93
4.23. Caudal refrigerante manipulado y concentración.	93
4.24. Residuos ante falla en el sensor de temperatura	97
4.25. Volumen real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5 % de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V .	98
4.26. Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5 % de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V .	98
4.27. Residuos ante falla en el sensor de volumen	99
4.28. Caudal de refrigeración q_c y temperatura del reactor T con falla en el caudal de -10 % en $t = 20[\text{min}]$.	100
4.29. Residuos del banco de UIO para una falla ocurrida en el $f_{qc} = -10\%$ en $t = 20[\text{min}]$.	100
4.30. Estimación de la falla en caudal de refrigerante (f_{qc}) expresada como desviación del estado estacionario.	101
5.1. Método de los dos umbrales fijos.	104

5.2. Residuos direccionales para el ejemplo del motor-DC. Gráficas de $ GPV $, $\sphericalangle(GPV, f_{Ua})$, $\sphericalangle(GPV, f_{Ia})$ y $\sphericalangle(GPV, f_w)$	107
6.1. Esquema general de Diagnóstico de Fallas y la Adaptación.	113
6.2. Diagrama esquemático del sistema de tres tanques con los lazos de control.	115
6.3. Nivel del Tanque 1 con falla en el caudal de entrada q_1	116
6.4. Zoom en nivel del tanque 1 con falla en el caudal de entrada q_1	117
6.5. Flujo de entrada q_1 con falla en la válvula 1.	117
6.6. Dinámica del nivel del Tanque 2 con falla en el caudal de entrada q_1 con la ley de control clásica(CC), y con la corrección de fallas(CF).	118
6.7. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$	119
6.8. Temperatura real sin FTC, medida, consigna y con el Control Tolerante a Falla. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5% at $t = 30[\text{min}]$	120
6.9. Concentración ante falla del 5% en $t = 30[\text{min}]$ en el sensor de T con y sin FTC. Caudal manipulado q_c con y sin FTC.	121
6.10. Residuos r_T, r_V y r_{Ca} , ante una falla en el sensor de temperatura.	122
6.11. Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en Volumen en $t = 5[\text{min}]$ y cambio en consigna en Temperatura en $t = 15[\text{min}]$. Degradación de 5% de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V con y sin FTC.	123
6.12. Temperatura ante degradación de 5% de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V con y sin FTC. Caudal manipulado q_c con y sin FTC.	124
A.1. Proceso y Observador de Estado de Orden completo.	133

Indice de tablas

3.1. Datos del sistema de tres tanques experimental de laboratorio	43
3.2. Parámetros del experimental de laboratorio	44
3.3. Modelos y % de correspondencia	45
4.1. Parametros del motor DC de Laboratorio	58
4.2. Signos de los residuos para diferentes fallas aditivas en el motor- DC.	59
4.3. Parámetros del Reactor	90
4.4. Signos de los residuos para diferentes tipos de fallas aditivas en el CSTR con observadores generalizados.	91
4.5. Signos de los residuos para diferentes tipos de fallas aditivas en el CSTR con DO.	92
5.1. Ejemplo de patrón de residuos para diferentes tipos de fallas aditivas, con \pm se indica el signo de la falla y el consecuente signo del residuo.	105
5.2. Ejemplo de patrón de residuos direccionales.	106
6.1. Norma 2 del error en el tracking	118
6.2. Norma 2 del error en el tracking, normalizada con la $\ e_{li}\ _2$ en CC.	118

Resumen

El desempeño de un Sistema de Control a lazo cerrado puede ser alterado por una falla en uno de sus componentes, y en algunos casos puede llevar al mismo a la inestabilidad, produciendo grandes daños. El objetivo del control tolerante a fallas (FTC) es prevenir el deterioro del sistema, desarrollando un controlador que tenga la capacidad de *corregir* de algún modo las fallas ocurridas.

Los sistemas de control tolerante a fallas activos (AFTCS) poseen básicamente dos sub-sistemas: un módulo de diagnóstico y detección de fallas (FDD) y otro que denominamos de *corrección*. Utilizamos el término *corrección* de forma genérica, de manera de englobar con el mismo diversos términos que se encuentran en la literatura para hacer referencia a este sub-módulo, como lo son: adaptación, compensación, re-configuración, y/o re-estructuración, dependiendo del autor y de la estrategia adoptada.

En esta tesis se realiza un análisis de las distintas estrategias de ambos sub-módulos. Haremos énfasis en la detección y aislación de fallas, ya que es un importante campo de investigación en procesos industriales debido a las mejoras que esta disciplina otorga en términos de seguridad y fiabilidad de los procesos.

A lo largo de la tesis se trabaja en detección de fallas con métodos *basados en modelo*, que buscan de una u otra manera generar residuos que demuestren las discrepancias entre el sistema real y algún modelo que se dispone del mismo. Existen varios esquemas de generación de residuos basados en modelos, mayormente técnicas que implican el uso de observadores, que se estudian en la presente tesis (Frank, 1990; Patton y Chen, 1997; Isermann, 2006; entre otros).

Como se acaba de mencionar, en todos los casos consideraremos que se dispone un modelo medianamente validado del sistema, por tal motivo se desarrolla un capítulo con los fundamentos de la identificación de sistemas, con el cual se identifica con precisión una sistema de tanques con interacción disponible en el laboratorio.

Luego, se presentan distintos esquemas de FDD basados en modelos: residuos estructurales determinados por medio de ecuaciones de paridad, residuos direccionales provenientes de factorización estable, y diversos tipos de obser-

vadores y bancos de observadores (Funcionales o de Diagnóstico, de Entrada Desconocida, etc.)

Las diferentes estrategias de detección y aislación se ejemplificarán con diversos sistemas: un motor de corriente continua (DC-motor), un tanque continuo agitado (CSTR) y un sistema de tres tanques con interacción, el cual es un *benchmark* del diagnóstico y detección de fallas. Para este último, se posee equipamiento e instrumental para trabajar con el mismo de manera experimental en la cátedra de Instrumentación y Control de Procesos ¹.

Finalmente, se muestran distintas alternativas para la corrección de las fallas: compensación de la acción de control y reconfiguración del lazo de control, realizándose comentarios sobre futuras líneas de investigación.

¹ICP - Cátedra de Instrumentación y Control de Procesos- FIQ -UNL

Capítulo 1

Introducción

En los Sistemas de Control convencionales, los controladores son diseñados para situaciones en que el sistema se desempeña libre de fallas, sin considerar que estas puedan llegar a ocurrir. Lo cierto es que en la práctica, los dispositivos que conforman un lazo de control pueden resultar averiados parcialmente, quedando fuera de servicio o empobreciendo el desempeño del sistema de control.

La presencia de un evento en un sistema de control realimentado convencional, como el mal funcionamiento de un elemento de control final, elementos de medición u otros componentes del sistema, puede ocasionar que el mismo resulte con una *performance* insatisfactoria, o lo que es peor, llevar el sistema a la inestabilidad. Por tal motivo, es que en la actualidad se intenta incrementar la seguridad de las plantas modernas, acudiendo a sofisticados sistemas de control.

1.1. Valor científico-técnico de la tesis

Para superar las debilidades antes expuestas, se han desarrollados nuevos enfoques para diseñar sistemas de control, con el propósito de tolerar el mal funcionamiento de algunos componentes, mientras se mantienen las propiedades deseadas de estabilidad y desempeño. Esto es particularmente importante en sistemas donde la seguridad es crítica, tales como aviones, plantas nucleares, o plantas químicas que procesan materiales peligrosos. Claramente, en estos sistemas, la consecuencia de una falla menor en un componente puede llevar a escenarios catastróficos. Por lo tanto, las demandas de fiabilidad, seguridad y tolerancia a fallas son generalmente altas.

Por los motivos expuestos anteriormente, se hace necesario diseñar sistemas de control que sean capaces de tolerar fallas potenciales en sus sistemas de manera de mejorar la fiabilidad, proveyendo la *performance* deseada. Estos tipos de sistemas de control son conocidos en la literatura, como Sistemas

de Control Tolerantes a Fallas (FTCS¹).

Los FTCS son sistemas de control que poseen la capacidad de adaptar su estructura o acondicionar algunos de sus parámetros automáticamente, ante alguna falla en sus componentes, tolerando el mal funcionamiento de los mismos, mientras mantiene propiedades aceptables en su *performance* y estabilidad ([82], [14]).

Un FTCS puede ser comandado ya sea para realizar el apagado completo de la planta de una manera segura, o para continuar la operación con una degradación tolerable en la *performance*. En general, deberá ser diseñado para adaptarse a las fallas en una fase temprana de su desarrollo, tal que una falla menor en un sub-sistema no impacte en el sistema, transformándose en una falla de mayor envergadura.

En esta tesis se abordará el problema de diseño de controladores tolerante a fallas en sistemas típicos de la industria de procesos, los que generalmente son no lineales, variantes en el tiempo y tienen límites en sus estados. Se presentarán diferentes técnicas de detección y diagnóstico de fallas y estrategias de recuperación, mediante el uso de herramientas matemáticas modernas, capaces de lograr que el sistema o proceso químico presente una *performance* aceptable, cumpliendo con las condiciones dinámicas especificadas, y respetando restricciones operativas, a pesar de las incertidumbres presentes y fallas acontecidas.

En esta tesis se describirán distintas técnicas de FTCS, las cuales pueden llevar a mejores soluciones que las *ad-hoc* ingenieriles basadas en el conocimiento del proceso y la experiencia. Un gran conjunto de ellas utiliza la redundancia analítica como mecanismos de detección y diagnóstico de las fallas, y representan el estudio central de esta tesis. Este tipo de redundancia resulta ser más económica que duplicar los componentes vulnerables dentro de un sistema. Los FTCS no necesitan duplicar ningún componente pero sí ajustar o re-estructurar los controladores luego que una falla ocurre. ([6], [40]).

Por lo tanto el objetivo de esta tesis es conocer, dominar y utilizar las técnicas de diseño de controladores tolerante a falla con fines prácticos, para así poder implementarlas en procesos típicos de la tecnología química como los son los sistemas hidráulicos, reactores, columnas de destilación, entre otros.

1.1.1. Áreas de aplicación y antecedentes del FTC

Las áreas de aplicación donde se utiliza los controladores para FTCS son variadas. Por un lado encontramos los que se denominan sistemas *críticos a la seguridad* (reactores nucleares, plantas químicas y alimenticias, aviones, sistemas de misiles guiados), los sistemas de *costo-crítico* (estructuras

¹Por su denominación en inglés *Fault Tolerant Control Systems*.

espaciales, vehículos espaciales, vehículos submarinos autómatas) y los sistemas *críticos por su volumen* (procesos de ensamblaje automotriz, redes de comunicaciones móviles, autopistas automatizadas) [40].

Históricamente y desde el punto de vista de aplicaciones prácticas, la disciplina tuvo aportes significativos motivada por los diseños de sistemas de control para vuelos de aviación ([71], entre otros). El objetivo fue proveer capacidad de *auto-reparación* con el fin de garantizar un aterrizaje seguro ante un evento de fallas severas en un avión ([10], [17], entre otros). A continuación se presentan los acontecimientos más significativos ocurridos en la aeronáutica y la industria, que desencadenaron un estudio más profundo del control tolerante a fallas y el inicio de otras disciplinas no tan duras, pero no menos importantes como lo es el HAZOP².

Accidentes aeronáuticos

Los esfuerzos por conseguir sistemas de control de vuelos tolerante a fallas fueron estimulados parcialmente por dos accidentes de aviones comerciales en los finales de la década del 70'.

- En el caso del vuelo Delta Flight 1080 (12 de Abril 1977), estudiado por McMahan [43], el timón se quedó atascado a 19° en lo alto, y el piloto no recibió ninguna indicación de mal funcionamiento. Afortunadamente, el piloto re-configuro satisfactoriamente los elementos de control restantes y aterrizó el avión de forma segura, basada en su experiencia y conocimientos a cerca de la actuación redundante en los aviones L-1011.
- En otro accidente involucrado en American Airlines DC-10 estrellado en Chicago (Flight 191, del 25 de Mayo de 1979), sucedió que el piloto tuvo solo 15 segundos para reaccionar antes de que el avión se estrellara. Subsecuentes investigaciones concluyeron que el accidente pudo ser evitado (Montoya *et al.*, [48]).

Estos son 2 ejemplos de accidentes de aviones fueron los que mostraron la gran necesidad de implementar sistemas de control de vuelo tolerante a fallas, proveyéndoles a los pilotos una adaptación automática ante una falla, tanto para vuelos civiles como militares. Otros acontecimientos más próximos en el tiempo, que han sido documentados son,

- un estudio (Maciejowski *et al.*, [39]), otorga más evidencia a la necesidad del uso de FTCS, mostrando que el accidente fatal de EL AL Flight 1862 de un avión de cargas Boeing 747-200 (4 de Octubre de 1992) pudo ser evitado.

²*Hazard and Operability Study*

- otro ejemplo a citar en este caso en la industria aeroespacial es el caso del cohete Ariane 5, el cual explotó el 4 de Junio de 1996, 37 segundos luego del despegue. La causa fue una excepción en el software dentro de la IRU (Unidad de Referencia Inercial), la cual provee la información de posición y trayectoria para el sistema de control. La excepción causó que la información de la posición sea reemplazada por alguna información de diagnóstico que el sistema de control no fue diseñado para entender [41] [31].

En el libro editado por Edwards *et al.* [16], se puede encontrar un interesante compendio actualizado sobre el estado del arte, la descripción de los *benchmark* más utilizados, y los diferentes métodos de diseño de FTC que se usan en la industria aeronáutica y aeroespacial.

Accidentes industriales

Contemporáneamente, en industrias *críticamente seguras*, los intereses en diagnosticar y diseñar sistemas de control tolerante a fallas han sido intensificados luego de distintos accidentes. Estas significaron, no sólo una tragedia para los trabajadores involucrados sino para la comunidad circundante y el daño ecológico causado. Entre ellas destacamos,

- el sucedido en la planta nuclear de Three Mile Island, (Pensilvania, Estados Unidos, 18 de marzo de 1979). La central experimentó una serie de fallos y errores que provocaron que empezara a perder agua de refrigeración del circuito primario y, en consecuencia, que se produjera un aumento peligroso de la temperatura del combustible de uranio. Aunque el reactor paró automáticamente, un intenso calor residual permaneció en el núcleo y las barras de combustible comenzaron a derretirse, produciéndose una fusión severa de su núcleo [55], [67].
- el segundo de mayor repercusión mundial, la tragedia en la planta nuclear de Chernobyl (26 de Abril de 1986), donde ocurrió una gran explosión seguida de la fundición del reactor No. 4. La principal causa de la tragedia fue la tecnología obsoleta utilizada y la falta de un procedimiento de manejo de fallas.

Pero sin lugar a dudas, el más siniestro desastre industrial, con la mayor cantidad de pérdidas humanas, fue el acontecido en la planta química perteneciente a *Union Carbide* en Bhopal, India el 03 de diciembre de 1984. En el accidente fue pasado por alto un procedimiento de seguridad (cerrar manualmente una válvula) y un proceso rutinario de lavado de tuberías, en el cual se obstruyó una de los drenajes de salidas, ocasionó la tragedia ([15], [64]). El agua entró en contacto con Isocianato de Metilo (MIC - reactivo que usaban para la producción de fertilizantes), generando una reacción exotérmica. En

pocos minutos 42 toneladas evaporados del producto fueron esparcidos a la atmósfera. La nube formada fue mas pesada que el aire, esparciéndose por la ciudad. El hecho ocurrió por la noche ocasionando que la tragedia fuese aún mayor. Más de 20.000 vidas se perdieron en los días sucesivos.

Por todos los antecedentes de accidentes aeronáuticos, plantas químicas y nucleares citados anteriormente, el problema del FTC comenzó a tener mayor atención en un amplio rango de comunidades académicas e industriales, debido a que las demandas de seguridad y fiabilidad fueron incrementadas con respecto a aquella que los sistemas de control convencionales podían ofrecer.

Las aplicaciones no sólo incluyen a la industria aeronáutica, plantas químicas y nucleares, sino también automotrices, siderúrgicas, manufactureras, entre otros procesos.

Antecedentes en la comunidad científica

Una amplia lista de desarrollos de técnicas de FTC para los diversas aplicaciones en ingeniería, puede ser consultada, por ejemplo, en los trabajo de Isermann, [26], [24], y Frank [18], entre otros. Recientemente, una muy interesante revisión bibliográfica fue realizada por Zhang y Jiang [82], y varios libros sobre FTC fueron publicados por Mahmoud [40], Blanke [6], Noura [52] y Edwards [16].

En general, los FTCS pueden ser clasificados en dos tipos: pasivos (PFTCS³) y activos (AFTCS⁴). En los pasivos, los controladores son fijos y son diseñados para ser robustos contra ciertas clases de fallas presumidas [17]. Este enfoque tiene limitadas sus capacidades de tolerar fallas. En la literatura a los PFTCS también se los conoce como *sistemas de control confiable* o *sistemas de control con integridad*. Pudiendo encontrar interesantes publicaciones del mismo en ([34], [27], [23], [33], entre otros).

En contraste con los PFTCS, los AFTCS reaccionan activamente ante las fallas de componentes del sistema mediante la reconfiguración de las acciones de control tal que la estabilidad y el desempeño del sistema completo puede ser mantenida dentro de rangos aceptables. En algunas circunstancias, una pequeña degradación de la performance puede ser aceptada como lo indican [7] [57] y [72]. Los AFTCS también son mencionados por algunos investigadores como, *sistemas de control auto-reparadores* ([10] y [17]), *reconfigurables* [46], *restructurables* [36] o *auto-diseñados* [47].

En los sistemas de control tolerante a fallas activos se considera indispensable disponer de un algoritmo de Detección y Diagnostico de Fallas (FDD)⁵, para identificar los cambios producidos por estas y re-configurar la nueva ley de control.

³Del Inglés *Passive Fault Tolerant Control Systems*, respectivamente.

⁴Del Inglés *Active Fault Tolerant Control Systems*, respectivamente.

⁵Por su denominación en inglés *Fault Detection and Diagnosis*.

Desde el punto de vista de la funcionalidad en el manejo de las fallas, los AFTCS fueron también denominados por otros investigadores como esquema de *detección de fallas, identificación y adaptación* ([3], [50], [73], [62] y [78], entre otros). En tales sistemas de control, el controlador compensa el efecto de alguna de las fallas a través de una ley de control pre-calculada ([42], [46], [65] y [80], entre otros) o por al sintetizar on-line de una nueva ([36], [57] y [81]). Ambas aproximaciones dependen profundamente del comportamiento en tiempo real del módulo de FDD, para dar la información más actualizada acerca del verdadero estado del sistema.

1.1.2. Antecedentes de la FDD

Generalmente, al subsistema de FDD también se lo suele citar como módulo de Detección y Aislación de Fallas (FDI⁶), si bien existe una pequeña diferencia que se aclarará en los capítulos sucesivos. La FDI ha sido un importante campo de investigación de la comunidad de ingeniería de control en las últimas tres décadas. Este interés está basado en las mejoras en términos de seguridad, fiabilidad y costo de operación de la planta que se desean alcanzar. También varios libros han sido editados recientemente que tratan el FDD, como son los de Isermann [25], y Ding [14].

Los continuos y crecientes avances en el control de procesos ha traído como consecuencia la implementación de plantas más complejas, que manejan mayor volumen de datos, incrementando la necesidad de una alta *performance* de los sistemas de monitoreo y detección de fallas. Como resultado, la Detección y Aislación de Fallas ha surgido como un punto crítico para las mejoras en las operaciones de las plantas y la reducción de pérdidas económicas.

En general esta disciplina se clasifica en tres grandes grupos: en los métodos basados en modelos cuantitativos, métodos basados en modelos cualitativos, y métodos basados en la historia del proceso. Una gran variedad de distintas metodologías han sido desarrolladas en los últimos años, como puede verse en los trabajos de Venkatasubramanian *et al.* ([74], [75] y [76]). Ellas tratan de detectar las fallas lo más rápidamente posible y bajar la tasa de falsas alarmas o pérdidas de detección de fallas durante el periodo de aislamiento, ante la presencia de ruido y perturbaciones. El adecuado uso de cada técnica depende de las características de la planta y la disponibilidad del modelo de la misma.

Si bien existen trabajos que han desarrollado diferentes técnicas teniendo en cuenta una aplicación en particular, en general se encuentran que las aplicaciones a sistemas de diagnóstico basados en modelo, han sido utilizadas para sistemas mecánicos, eléctricos y aeroespaciales; mientras que las técnicas basadas en datos han sido dominantes en procesos petroquímicos y químicos

⁶Por su denominación en inglés *Fault Detection and Isolation*.

debido a la poca disponibilidad o complejidad del modelo y las inherentes naturaleza no-lineal del proceso.

En esta tesis se estudiarán las metodologías correspondientes al primero grupo, es decir se centrará en lo métodos basados en modelos cuantitativos o denominado de manera más simple como *métodos basados en modelo*, debido a la solidez teórica que ofrece la *teoría de control lineal moderno* ([69], [66], entre otros) y de la inmediata aplicación de los resultados de los mismos al FTC. Asimismo se plantea como hipótesis que se conoce *a priori* las ecuaciones y parámetros que caracterizan la planta en estudio. En el Cap.3, se presentará una breve revisión de la *Identificación de Sistemas*, ya que los proceso de diagnóstico de fallas estudiados en el Cap.4 se necesita un modelo fehaciente del sistema.

En la Fig. 1.1 se observar un árbol de clasificación de todas estas metodologías, estando ligeramente sombreadas las que se exponen en esta tesis.

1.2. Motivaciones

El punto más importante en un sistema de control tolerante a fallas es el de diseñar un controlador con una adecuada estructura para lograr estabilidad y desempeño satisfactorio, no únicamente cuando todos los componentes están funcionando normalmente, sino también en casos donde hay mal funcionamiento de actuadores, sensores u otros componentes del sistema.

La implementación de un AFTCS conlleva al menos el desarrollo de una en una serie de módulos: un módulo de detección y aislación en línea de fallas, una toma de decisión en tiempo real, y un control reconfigurable. La estructura genérica mínima de un FTCS se observa en la Fig. 1.2

El FTC activo es una disciplina compleja, que cubre un amplio rango de áreas de investigación, como sistemas estocásticos, estadística, análisis de riesgo, confiabilidad, procesamiento de señales, control de procesos y modelos dinámicos.

Debido a la complejidad de los problemas, es que dentro de los FTCS, muchas de las investigaciones en Diagnóstico y Detección de Fallas (FDD) y Control Reconfigurable (RC⁷) han sido realizadas como dos entidades separadas. Mas específicamente, muchas de las técnicas de FDD/FDI son desarrolladas como una herramienta de diagnóstico o monitoreo, en lugar de ser parte de una técnica integral de los FTCS. Entonces, algunos métodos existentes en FDD pueden no satisfacer las necesidades de un control reconfigurable.

Por el otro lado, muchas de las investigaciones en FTC son llevadas a cabo

⁷del Inglés *Reconfigurable Control*

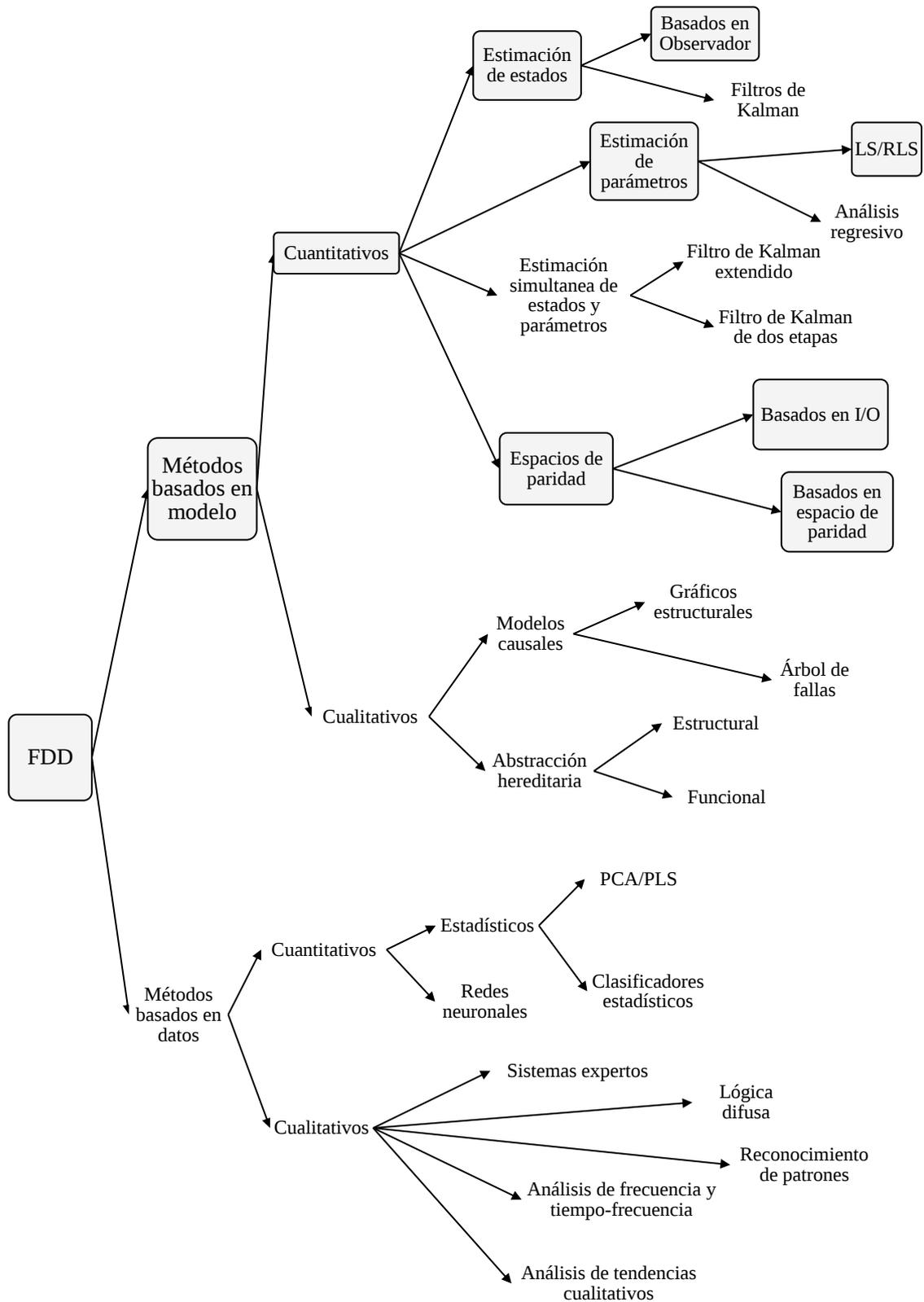


Figura 1.1: Clasificación de los métodos de FDD. Marcados los métodos que se estudian en la presente tesis.

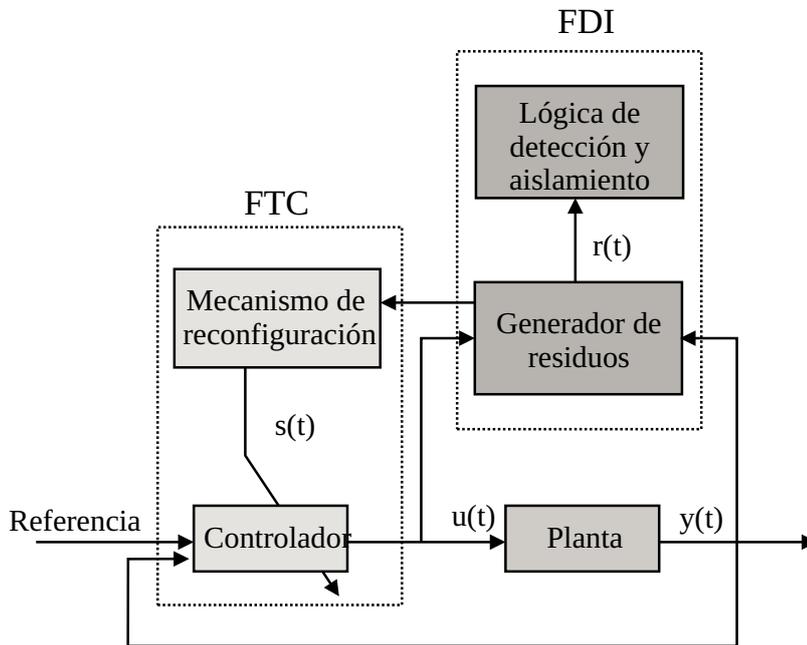


Figura 1.2: Esquema genérico del un AFTCS.

asumiendo que se dispone de un perfecto sistema FDD/FDI. Por lo tanto, se realizará un análisis sobre el diseño de la estructura del sistema en general y la interacción entre los módulos de FDD y RC, dentro de este diseño.

Resumiendo, las grandes hipótesis presentes en la literatura y que en la práctica pocas veces pueden cumplirse son:

- Al diseñar un FTCS, se pre-asume que se posee un módulo FDD perfecto.
- Al diseñar el módulo FDD, se considera que se puede modelar al sistema con fallas.

En este contexto, surgen y se plantean algunas preguntas:

- ¿Desde el punto de vista del diseño de RC, cuáles son las necesidades y requerimientos al FDD?
- ¿Qué información puede ser proveída por las técnicas existentes de FDD en el diseño general del FTCS?
- ¿Cómo se puede analizar sistemáticamente la interacción entre FDD y RC?
- ¿Cómo diseñar los módulos de FDD y RC de una manera integral para aplicaciones on-line y en tiempo real?

Todas estas preguntas no se van resolver completamente en el desarrollo de esta tesis, pero son las líneas abiertas y las áreas de investigación para futuros desarrollos y trabajos, constituyendo la motivación para estudiar estos tipos de sistemas.

1.3. Estructura de la Tesis

Este trabajo continua de la siguiente manera,

- En el Capítulo [2](#), se presenta una introducción a la temática, con algunas definiciones utilizadas, un esquema general de un control tolerante a fallas, clasificaciones de fallas, sus representaciones temporales y definiciones correspondientes a los tipos de redundancia que podemos implementar en un proceso.
- En el Capítulo [3](#), se dedica un capítulo a los fundamentos de la Identificación de Sistemas, herramientas matemáticas necesarias para una correcta utilización de los diferentes métodos de Detección y Diagnóstico de Fallas, y utilizado para identificar los sistemas de tanques que se dispone en laboratorio.
- El Capítulo [4](#), es el mas importante y el mayor aporte de esta Tesis, ya que se hace un exhaustivo análisis de los diferentes metodologías en Detección, Aislación y Diagnóstico de Fallas.
- En el Capítulo [5](#), se dará mas formalidad a lo que refiere a la evaluación de residuos, necesario para realizar una correcta detección y evitar los errores por falsas detecciones.
- En el Capítulo [6](#), se muestra la estrategia de adaptación, re-acomodación y re-estructuración del sistema de control tolerante a fallas, ante fallas abruptas en sensores y actuadores de las diversas plantas estudiadas en este trabajo.
- Finalmente en el Capítulo [7](#), se exponen las conclusiones y futuros trabajos a llevar adelante en esta línea de investigación.

Capítulo 2

Nociones y conceptos preliminares

En este capítulo se presentará los conceptos fundamentales del control tolerante a fallas, introduciendo los distintos subsistemas que lo componen y la terminología utilizada habitualmente en este contexto.

2.1. Clasificación de los FTCS

Como se introdujo en el capítulo anterior, los FTCS pueden ser clasificados de manera general en dos tipos: pasivos (PFTCS) y activos (AFTCS). Noura *et al.* [52] realizó una subclasificación de los AFTCS, considerando dos alternativas dentro de los mismos: la reconfiguración y la reestructuración del sistema de control, una vez que aconteció las fallas. Esta sub-clasificación fue realizada en base al decremento del rendimiento del sistema de control, frente a la gravedad de las fallas ocurridas (Ver Fig. 2.1).

2.1.1. PFTCS

En los PFTCS, los controladores son diseñados para ser robustos ante cierta clase de fallas que se presumen previamente en el diseño [17]. Con este enfoque, el sistema puede tolerar únicamente un número limitado de fallas, las que se asumen pueden ocurrir, y consecuentemente se tienen en cuenta *a priori* en la sintonización del controlador con parámetros fijos.

En este tipo de controladores se tiene el conocimiento que cierto subsistema puede llegar a fallar, o que la falla del algún componente es muy crítico, ya que conduce a fallas mayores e importantes, o reduce considerablemente la *performance* total.

Una vez que el controlador es diseñado, este puede compensar las fallas anticipadamente sin ninguna necesidad de acceso a información on-line de

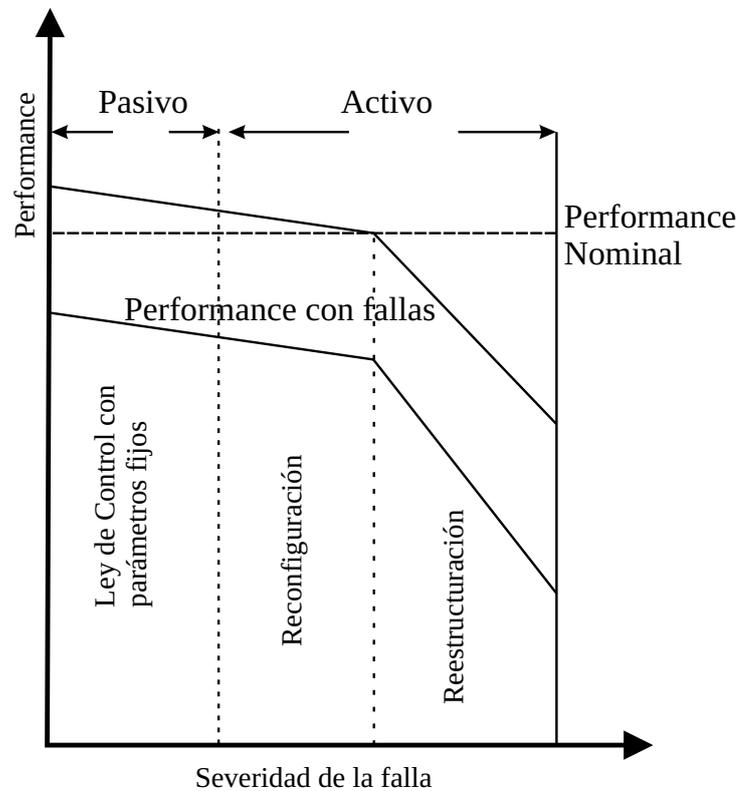


Figura 2.1: Estrategias de Control Tolerante a Fallas, de acuerdo a la severidad de las Fallas [52].

las mismas. El PFTCS trata a las fallas como si fueran incertidumbre en el modelado o como perturbaciones externas para las cuales el sistema de control es robusto.

Esta estrategia pasiva, se puede implementar utilizando métodos basados en control robusto (sintonización H_∞ , rechazo de perturbaciones, etc). Las principales características de estos sistemas tolerante a fallas son:

- Robustez frente a fallas ya contempladas o anticipadas.
- Resulta un diseño más conservador pero con bajo desempeño de las variables controladas.
- Pueden utilizar redundancia de hardware.

Como se mencionó en el Cap [1], los PFTCS también se los conoce como *sistemas de control confiable* o *sistemas de control con integridad*, donde el controlador es insensible a la aparición de ciertos fallos específicos. Claramente, este enfoque tiene limitada su capacidad de tolerar fallas ya que el mismo es robusto solamente para las fallas presumidas, y porque no pueden ser conocidas *a priori* todas las fallas esperadas y sus efectos sobre la planta.

Por lo que resulta riesgoso confiar únicamente en un PFTCS, dejando esta estrategia para ciertas aplicaciones muy puntuales.

2.1.2. AFTCS

En los sistemas de control convencionales, los controladores son diseñados para casos en que el sistema se desempeña en situaciones libre de fallas, sin considerar que estas puedan ocurrir. También puede suceder, en otros casos, que los sistemas de control tengan redundancia física limitada, y consecuentemente no sea posible incrementar o cambiar la configuración hardware por los costos o restricciones físicas. En este caso, se justifica el uso de AFTCS, diseñados con los recursos disponibles y utilizando redundancia existente (ya sea física o analítica), permitiendo acomodar el sistema frente a la falla.

En contraste a los sistemas de control tolerante pasivos, los sistemas de control tolerante a fallas activos se prefieren para hacer frente a un número creciente de defectos. Estos métodos consisten en el ajuste de los controladores en línea de acuerdo con la magnitud y tipo de fallo, con el fin de mantener el desempeño a lazo cerrado del sistema.

Los AFTCS reaccionan inmediatamente ante las fallas en los componentes del sistema mediante la *reconfiguración*, adaptación o *reestructuración* de las acciones de control, con el objeto de mantener una estabilidad y un desempeño aceptable.

En el caso que las fallas no sean muy severas, es posible preservar el rendimiento del sistema cerca del nominal, con métodos de *reconfiguración*. Con este tipo de controlador *activo*, se compensa los efectos de las fallas, ya sea por una *nueva ley de control previamente calculada* [42], [46], [80], o sintetizando una *nueva ley de control on-line* [36], [51], [73], [57], [81], [61]. De ambas maneras es necesario un algoritmo de Detección y Diagnósticos de Fallas (FDD¹), para identificar los cambios producidos por estas y reconfigurar la nueva ley de control.

Para fallas más importantes (una pérdida total de un actuador), el rendimiento nominal no puede ser mantenido, el desempeño actual con las fallas se reduce, como se muestra en el área sombreada de la Figura 2.1. En estos casos, se debe seguir una estrategia de *reestructuración*, consistente en la modificación de la estructura del sistema o del objetivo de control. Por ejemplo, el número de salidas controladas deberá ser reducida, o las entradas de referencia nominales no podrán ser alcanzadas más, y otras referencias tendrán que ser redefinidas. El objetivo es llevar al sistema a un modo operativo aunque sea con degradación de la performance.

Asimismo, para ciertos tipos de fallos, resulta imposible mantener el sistema operativo incluso con una gran degradación. En este caso, el objetivo se transforma en apagar el sistema de alguna forma segura.

¹Del inglés *Fault Detection and Diagnosis*.

Los AFTCS poseen las siguientes características:

- Emplea redundancia analítica.
- Utiliza algoritmos de detección de fallas y control reconfigurable.
- Presenta una degradación de la performance, solamente ante la presencia de una falla.
- Es menos conservador.

En esta tesis se trabajará con esquemas de control tolerante a fallas activos, haciendo hincapié en los métodos de detección y su interacción con la adaptación o recuperación de la acción de control.

2.2. Estructura general de los AFTCS.

El diseño de un AFTCS conlleva al diseño de diversos módulos: un módulo de detección y aislación en línea de fallas, una toma de decisión en tiempo real, y un control reconfigurable. La estructura general de un AFTCS se muestra en la Fig. 2.2. A continuación se describe brevemente cada uno de diferentes bloques que componen los AFTCS. Típicamente estos pueden ser dividido en cuatro módulos principales:

1. un módulo de Detección y Diagnóstico de Fallas (FDD),
2. un controlador reconfigurable,
3. un mecanismo de reconfiguración del controlador,
4. un regulador del comando (referencia o *set point*) y un controlador *feed-forward* reconfigurable.

En el módulo FDD, cualquier falla en el sistema debería ser detectada y aislada tan rápido como sea posible. Los valores de las variables de entrada/salida, los parámetros que indican la falla, y el modelo del sistema después de la falla, necesitan ser estimados en línea y en tiempo real.

Basado en la información on-line sobre el modelo del sistema *post-falla*, el controlador reconfigurable es diseñado para que automáticamente mantenga la estabilidad y el desempeño dinámico. Además, con el fin de que el sistema realimentado siga la trayectoria de consigna ante la presencia de una falla, en la bibliografía se sugiere la implementación de un controlador *feed-forward* reconfigurable. Por otro lado, para prevenir la potencial saturación del actuador, así como también para mantener la performance luego que ocurra una falla, se puede implementar un regulador de comando para ajustar automáticamente la trayectoria de referencia.

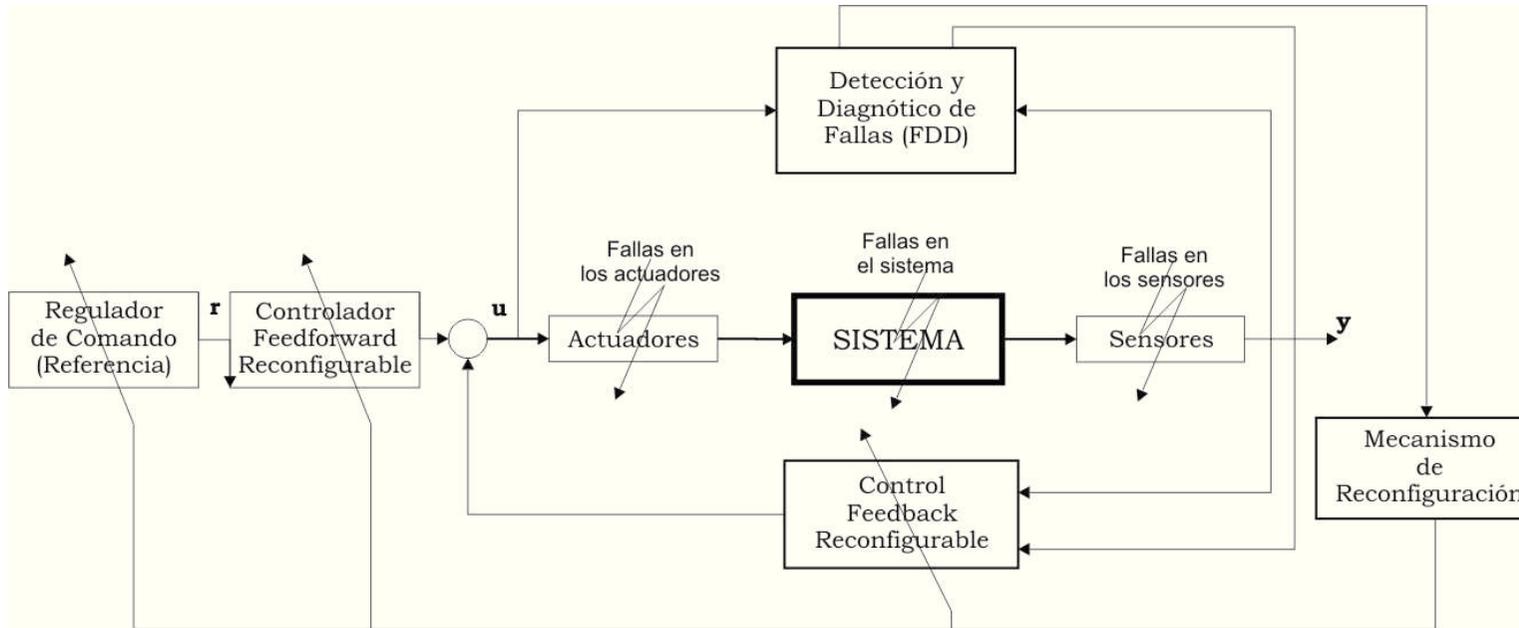


Figura 2.2: Estructura general de los FTCS.

Los puntos claves en el diseño de un control tolerante a fallas activo consisten en diseñar:

1. Un controlador que pueda ser fácilmente reconfigurable.
2. Un esquema de FDD con la suficiente sensibilidad y robustez ante incertidumbres del modelo, variaciones en las condiciones de operación y perturbaciones externas.
3. Un mecanismo de reconfiguración que lleve tan rápido como sea posible a recuperar la performance que poseía el sistema antes de la falla.

El punto más crítico en cualquier FTCS es la celeridad necesaria para que la reconfiguración del sistema de control opere adecuadamente luego de que el módulo FDD, diagnosticó la falla. Además, la utilización eficiente y el manejo de la redundancia (hardware, software y/o redes de comunicación), la estabilidad, y la garantía de *performance* son algunos de los puntos importantes a contemplar a la hora del diseño de un FTCS.

2.3. Terminología

Como un punto no menor al estudiar cualquier disciplina, es necesario clarificar el lenguaje que se utilizará. En el estudio de los FTCS, si bien se han llevado a cabo muchas investigaciones individuales, se encuentra poca bibliografía en la que se englobe todos los conceptos y terminología que se utilizan en esta disciplina. A continuación se presenta una serie de conceptos con la finalidad de unificar algo de la terminología existente. ([25], [26], [5], [6], [40], entre otros).

Avería. Interrupción permanente de una capacidad del sistema para realizar una función requerida bajo condiciones de operación específicas.

Condición de la avería. La manera particular en un avería puede ocurrir.

Control adaptativo. Es una aproximación sistemática del ajuste de un controlador en tiempo real, para lograr o mantener un nivel deseado en el desempeño del sistema de control, cuando los parámetros de una planta cambian en el tiempo.

Detección de fallas. Determinación de la presencia de fallas en un sistema.

Falla. Es una desviación no esperada o no permitida en al menos una propiedad característica o parámetro del sistema de su condición normal, estándar o aceptable.

Identificación de de fallas. Determinación del tamaño o comportamiento temporal de una falla. Es el paso siguiente a la detección de fallas.

Mal funcionamiento. Una irregularidad intermitente en las funciones del sistema.

Mantenimiento. La necesidad de un sistema o elementos del mismo de ser reparado y controlado periódicamente.

Monitoreo. Es una rutina continua en tiempo real donde se visualizan las condiciones del sistema físico y se analiza la información del mismo.

Reconfiguración. Habilidad de un sistema de control de modificar sus parámetros de manera de considerar las fallas que fueron detectadas.

Redundancia de hardware. Son múltiples e independientes canales de sensores, actuadores o procesadores, utilizados de manera de tener varias mediciones de la misma variable física.

Residuos. Un indicador de falla, basado en la desviación entre mediciones y valores calculados a través del modelo del sistema.

Reestructuración. característica de un sistema de control capaz de modificar su estructura producto de fallas que fueron detectadas para tratar de mantener la performance de dicho sistema.

Robustez. Habilidad de un sistema de mantener ciertas propiedades en forma satisfactoria del sistema de control en presencia de variación de los parámetros o perturbación externas.

Seguridad. Habilidad de un sistema de no causar ningún riesgo a los operadores, equipos o medio ambiente.

Síntoma. Un cambio de una magnitud observable fuera del comportamiento normal.

Sistema tolerante a fallas. Un sistema donde una falla puede ser acomodada con o sin degradación de su *performance*, de manera que una falla simple en un sub-sistema no se desarrolle en una avería en todo el sistema.

Sistemas de control tolerante a fallas activo. Sistema de control donde las fallas son explícitamente detectadas y corregidas mediante cambios en las leyes de control.

Supervivencia. La probabilidad de conducir una operación con seguridad.

Tolerancia a fallas pasiva. Es un sistema tolerante a fallas donde las fallas no son explícitamente detectadas y corregidas, pero el controlador es diseñado de manera de ser insensibles para determinado conjunto de fallas.

2.4. Clasificación de fallas.

Las fallas se pueden presentar tanto a lo largo del proceso industrial como en los instrumentos de medición y control - sensores y actuadores -. De acuerdo con [19], las fallas que tiene lugar en el proceso que impactan en la dinámica de la planta se denominan fallas *multiplicativas*, mientras que las fallas que acaecen en sensores y actuadores se denominan fallas *aditivas*.

Toda falla puede ser caracterizada subjetivamente en tres categorías, de acuerdo a la gravedad y celeridad de la rotura:

1. un deterioro en la performance del dispositivo.
2. un mal funcionamiento parcial.
3. una rotura total del dispositivo.

Desde un punto de vista del diagnóstico, el ingeniero de control se puede plantear,

- ¿Cómo pueden afectar las fallas multiplicativas y aditivas a la salida de la planta?
- ¿Cuál es la manera en que se puede mantener el desempeño de la planta cuando ocurre alguna falla?.

Esta última pregunta es el motivador principal de la disciplina en estudio.

2.4.1. Tipos de fallas y perturbaciones.

Como se mencionó anteriormente, las fallas se deben al deterioro, el mal funcionamiento o la rotura total de, instrumentos, accionamientos o elementos de la planta misma. Las fallas pueden modelarse en los dos primeros casos, como una entrada adicional desconocida (*fallas aditivas*) o como cambios en los parámetros de la planta (*fallas multiplicativas*).

En este punto es importante remarcar que las *perturbaciones* también son entradas externas de origen desconocido, por lo que no existe diferencias entre una perturbación y una falla aditiva, siendo la misma sólo *subjativa*.

En términos generales, aquellas perturbaciones que interesen ser detectadas y aisladas, se las denomina *fallas*, mientras que a las restantes *perturbaciones*.

Si bien a esta altura del análisis la diferencia entre ambos calificativos es subjetiva, más adelante se verá que a la hora de diseñar ciertos observadores, la atención entre la calificación en uno u otro tipo es fundamental para el correcto diseño.

Tanto a las fallas aditivas como a las perturbaciones se las manejarán como funciones *determinísticas* en el tiempo. Por lo general, no se asume un comportamiento temporal predeterminado para el diseño de los generadores de residuo, pero para el análisis se consideran cuatro tipos de fallas aditivas de acuerdo a su comportamiento temporal, algunas de ellas sugeridas en. [19],

- Abrupta.
- Incipiente o creciente.
- Intermitente.
- Deriva (usualmente denominada como *drift*).

En las Fig. 2.3 y Fig. 2.4 se aprecian las características temporales de los cuatro tipos de fallas mencionadas.

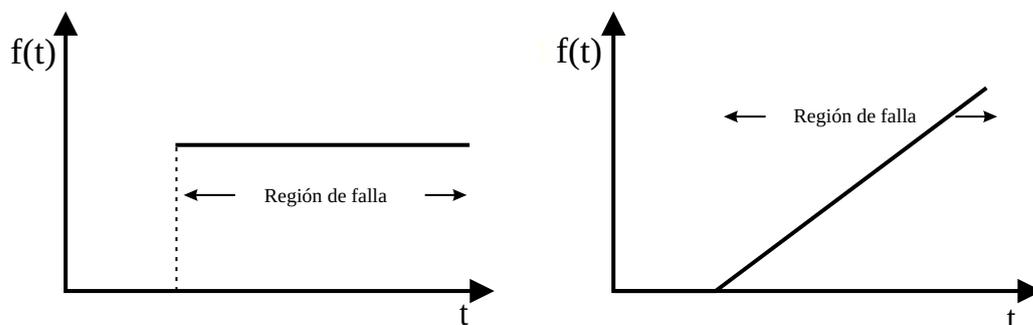


Figura 2.3: Tipos de fallas:(a)Abrupta. (b)Incipiente.

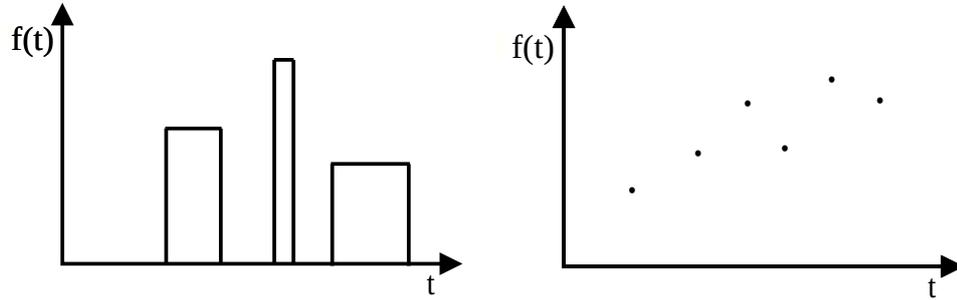


Figura 2.4: Tipos de fallas.(c)Intermitente.(d)Derivas.

Al *ruido* también se lo considera como una entrada externa aditiva, pero con un comportamiento aleatorio, el que se asume con media cero ($\mu = 0$). Cualquier ruido que tenga una distribución con media distinta de cero, se la puede manejar como una perturbación. A lo largo de toda la tesis se trabajó exclusivamente con *fallas aditivas* y del tipo *abrupta* consistente en la degradación de la ganancia de salida tanto de los elementos de medición como en los elementos de control final.

2.5. Representación de las fallas

Considere un sistema LTI-MIMO, donde la relación entre las entradas y salidas, sin fallas, ni perturbaciones, ni ruido de ningún tipo viene dada por:

$$y(t) = \Sigma u(t) \quad (2.1)$$

donde, con la notación $\Sigma u(t)$ será usada para simbolizar a un sistema bajo la representación de estados, $u(t) = [u_1(t) \dots u_k(t)]'$ es el vector de entrada e $y(t) = [y_1(t) \dots y_k(t)]'$ es el vector de salida del mismo.

En la generalidad del sistema planteado con anterioridad, las siguientes fallas son posibles:

- fallas en los actuadores a las entradas (f_u),
- fallas en la planta ($\Delta\Sigma(t)$),
- fallas en los sensores a la salida f_y .

Este tipos de fallas se representan en la Fig. [2.5](#)

Para el módulo de FDD, usualmente se hace una distinción entre fallas multiplicativas y aditivas. Sin embargo, para el FTC siempre el objetivo será el de compensar el efecto de una falla en el sistema sin importar la naturaleza de la misma.

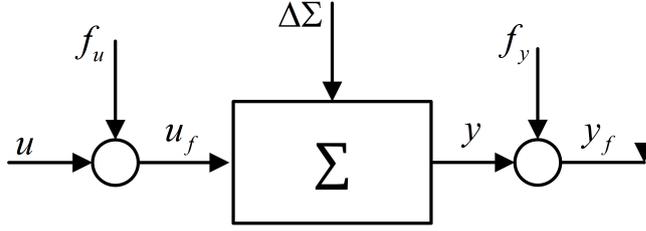


Figura 2.5: Sistema con fallas aditivas (f_u y f_y) y multiplicativas ($\Delta\Sigma$).

2.5.1. Fallas y perturbaciones multiplicativas

En este punto se plantea al sistema simbolizado por Σ con una representación en espacio de estados de acuerdo con la terna (A, B, C) de manera tal que, el sistema libre de fallas viene dado por,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (2.2)$$

donde $x(t)$ es el vector de estado, $u(t)$ es el vector de entradas o las manipuladas, $y(t)$ es el vector de salidas del sistemas. Las matrices A , B y C , son las matrices de estado, de entrada y salida respectivamente [53]. Las fallas ocurridas durante el proceso, son representadas por una variación de los parámetros del sistema. Entonces en presencia de fallas, el modelo del sistema puede ser escrita como,

$$\begin{aligned}\dot{x}_f(t) &= A_f x_f(t) + B_f u(t) \\ y_f(t) &= C_f x(t)\end{aligned}\quad (2.3)$$

donde

$$A_f = A + \Delta A; B_f = B + \Delta B; C_f = C + \Delta C \quad (2.4)$$

Los valores de ΔA , ΔB y ΔC representan la desviación de los parámetros del sistema con respecto a los valores nominales. Es importante notar que son consideradas como *fallas multiplicativas* las diferencias entre el sistema real, y el modelo que se dispone.

Es muy difícil distinguir Puede llevar a confusión la diferencia que existe entre los cambios en los parámetros del modelo y los errores de modelado. De acuerdo con Isermann [25] y Gertler [19], a los primeros se los designa como *fallas multiplicativas* y a los segundos como *perturbaciones multiplicativas*. Al realizar un análisis del comportamiento temporal observando el estado estacionario del sistema (SS²), nos puede otorgar alguna claridad: las fallas o *errores en el modelado* se observan desde el inicio de la comparación entre planta real y el modelo de la misma. Mientras que las *fallas paramétricas*

²del inglés *Steady-State*.

(variaciones en los parámetros del modelo) se observan mientras opera el sistema.

Este tipo de fallas multiplicativas, representan una interferencia no deseable dentro de la detección de fallas en sensores y actuadores, ya que es difícil determinar las nuevas matrices *on-line*, post-falla multiplicativa.

2.5.2. Fallas Aditivas

Fallas Aditivas en Actuadores

Los actuadores son los dispositivos que realizan el trabajo más duro en un sistema de control. Representan el nexo entre la orden otorgado por el controlador y la acción física desarrollada en el sistema. Por esto se los denomina a menudo, elemento de control final (ECF), actúan sobre las variables manipuladas del sistema directamente. Dependiendo de la aplicación, los ECF pueden ser válvulas, solenoides, pistones, motores, etc. Por lo expuesto, estos dispositivos están sujetos a fallas y son los que se estudiarán primeramente.

De acuerdo con Noura *et al.* [52], se introduce la ocurrencia de una falla en un actuador, reescribiendo la variable manipulada de la siguiente manera,

$$\begin{aligned} u_j^f &= u_j + \underbrace{(-\gamma_j u_j + u_j^0)}_{\text{falla aditiva}} \\ &= (1 - \gamma_j)u_j + u_j^0 \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde u_j y u_j^f representan el funcionamiento normal, y ante una falla del j -ésimo actuador, respectivamente. Note que, en la Ec. 2.5, el término u_j^0 representa una falla aditiva que permite contemplar valores por sobre los nominales mientras que, $0 \leq \gamma_j \leq 1$ permite modelar la degradación de la variable manipulada.

El vector de manipuladas se puede expresar de forma matricial vectorial como,

$$u^f = (I - \Gamma)u + u^0 \quad (2.6)$$

donde $\Gamma = \text{diag}(\gamma_j)$ y u^f es el vector de manipuladas que contemplan las fallas.

Al utilizar la Ec. 2.5 en la representación de estados Ec. 2.2, se tiene,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F_u f_u(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

donde $F_u = B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ representa la matriz de distribución de fallas a la entrada y $f^u \in \mathbb{R}^p$ es el vector de fallas de entrada, tal que

$$f^u(t) = -\Gamma u(t) + u^0 \quad (2.8)$$

Si en el j -ésimo actuador se declara una falla, luego $f_j^u(t) = -\gamma_j u_j(t) + u^0$ corresponde a la magnitud de la falla que afecta al mismo.

Fallas aditivas en los sensores

A continuación, se expone el problema similar, pero para fallas en sensores, considerando una falla f_y , el sistema con la falla en el sensor viene representada por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + F_y f_y(t)\end{aligned}\quad (2.9)$$

Por lo tanto el sistema con fallas aditivas en actuadores y sensores puede ser expresada de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F_u f_u(t) \\ y(t) &= Cx(t) + F_y f_y(t)\end{aligned}\quad (2.10)$$

De una manera unificada se expresa al sistema de Ec's [2.10](#) como, donde

$$f(t) = \begin{bmatrix} f_u \\ f_y \end{bmatrix}\quad (2.11)$$

$f(t) \in \mathbb{R}^v$ con $v = m + q$, es una representación de las fallas en actuadores y sensores. $L \in \mathbb{R}^{n \times v}$ y $M \in \mathbb{R}^{q \times v}$ son las matrices de fallas de actuadores y sensores, que pueden tomar la forma con la forma $L = [B \ 0_{n \times q}]$ y $M = [0_{q \times m} \ I_{q-m}]$

Fallas en los sensores de entradas no controladas

De acuerdo con [\[19\]](#), para concluir la clasificación de tipo de fallas que pueden acontecer en una planta determinada, se presenta una última posibilidad. Para eso, se especifica cuales de las entradas se pueden controlar.

Considerando el modelo expuesto por la Ec. [2.2](#), se asume que el subconjunto de entradas $u^c(t)$ son las variables manipuladas y el resto $u^m(t)$ son factibles de ser medidas de forma directa. Note que si una entrada no es medida ni controlada, necesariamente debe ser manejada como una *perturbación*.

Por lo tanto, las variables observables son los *valores de comando* de las entradas controladas $u^c(t)$, y los *valores medibles* es el conjunto de variables constituidas por las las entradas medibles $u^m(t)$ y las *salidas* también medibles $y(t)$. En la Fig. [2.6](#), se puede ver como queda caracterizado ahora el sistema mencionado.

En la generalidad del sistema planteado con anterioridad, las siguientes fallas son posibles:

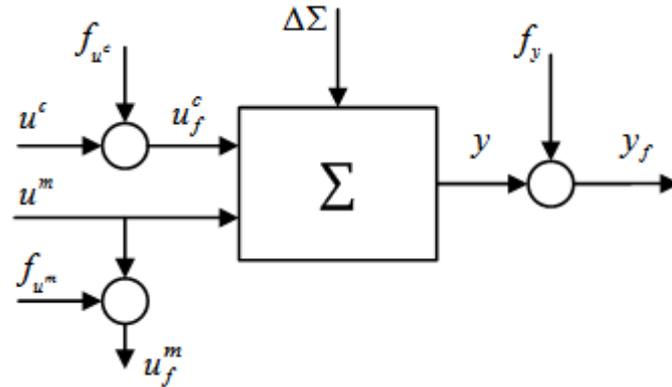


Figura 2.6: Sistema con fallas aditivas en todos sus transductores.

- fallas en los actuadores las entradas f_{u^c}
- fallas en los sensores a la entrada f_{u^m}
- fallas en la planta $\Delta\Sigma(t)$
- fallas en los sensores a la salida f_y

por lo tanto las variables observadas $u^c(t)$, $u_f^m(t)$, e $y_f(t)$ se relacionan con los ingresos y salidas del sistema, $u_f^c(t)$, $u^m(t)$ e $y(t)$ por las siguiente ecuaciones,

$$\begin{aligned}
 u^c(t) &= u_f^c(t) - f_{u^c} \\
 u_f^m(t) &= u^m(t) + f_{u^m} \\
 y_f(t) &= y(t) + f_y
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

2.6. Conceptos de redundancia y vector de paridad

La redundancia se utiliza como una herramienta para interpretar el comportamiento de una parte del sistema, utilizando componentes remanentes en el mismo, con el objetivo de corroborar inconsistencias en la lectura de las distintas variables monitoreadas.

El análisis de redundancia es el primer paso antes de diseñar un sistema de control tolerante a fallas. Este consiste en estudiar que tipo de redundancia se encuentra disponible en el sistema; su relación con las distintas variables medibles y como puede ser utilizada para realizar un diagnóstico de fallas. En la literatura se distingue dos tipos de redundancias, denominadas *física* y *analítica*.

2.6.1. Redundancia Física.

La aproximación ingenieril tradicional para alcanzar el control tolerante a fallas en sistemas dinámicos es la utilización de redundancia de *hardware*, es decir, colocar n sensores³ redundantes y seleccionar como mediciones correctas aquellas indicadas por la mayoría.

Por ejemplo en un procedimiento donde la temperatura de un proceso es crítica, podemos colocar diferentes transductores de temperatura (TT) de manera tal que si hay inconsistencias entre los mismos, se tomará como medición correcta aquella indicada por la *mayoría*.

En el caso de los actuadores, se debe tener actuadores en *stand-by* que entrarán en funcionamiento si fallara alguno de los principales. Desde un punto de vista ingenieril la redundancia de un actuador no es tan sencillo como lo que se plantea para el caso de los sensores. Por ejemplo, un elemento de control final como una válvula de control que maneje un cierto caudal de reactivo, si requerimos redundancia física, necesitaremos circuitos de alimentación paralelos que entreguen a ambas válvulas el fluido interviniente; duplicando los costos de esa parte del sistema y llevando a una mayor complejidad al automatismo de la planta.

Por lo tanto, la *redundancia física* implica el diseño de sub-sistemas en paralelo donde se aplica este tipo de redundancia, que conlleva a un mayor costo, espacio físico, y complejidad para la incorporación de los sensores y actuadores redundantes. Todos estos factores, hace que este enfoque sea poco atractivo, siendo justificada para los casos en que el proceso sea *crítico por su seguridad*, como por ejemplo, el control de vehículos o aviones, plantas nucleares y algunas plantas químicas.

2.6.2. Redundancia Analítica

En este caso se utiliza una metodología en la cual se considera que se dispone el modelo determinístico o estocástico del sistema, ya sea por su representación en espacio de estados, su modelo de entrada/salida, o el modelo discreto (ARMA, ARMAX, etc.). Posteriormente, se evalúa las inconsistencias entre las variables del proceso real y el modelo adoptado, para determinar fallas acontecidas.

Varias alternativas fueron desarrollados con este principio: residuos estructurales, residuos direccionales, estimación de estados y estimación de parámetros, las que se desarrollaran a lo largo del Cap.4.

Notar que estas metodologías dependen profundamente de la calidad del modelo que se disponga. De acuerdo a que tipo de relaciones se utiliza, la redundancia analítica puede clasificarse como *redundancia directa* o *redundancia temporal*. Como veremos la segunda es una extensión de la primera^[77].

³ en esta tesis con el término *sensor*, se hará referencia al elemento de medición.

Redundancia Directa.

Para este tipo de redundancia es necesario que exista la suficiente cantidad de sensores tal que por medio de relaciones algebraicas entre las mediciones de los mismos, se obtenga valores redundantes de una misma variable física. Estas relaciones son útiles para computar la diferencia entre el valor medido por un sensor de las mediciones que son proveídas por el resto de los sensores. Esta discrepancia indica que una falla en el sensor pudo haber ocurrido.

Son relaciones algebraicas instantáneas entre sensores redundantes. Note que en este concepto no es necesario la *redundancia física*, en el sentido que dos sensores iguales midan la misma variable física.

DEFINICIÓN 2.1 (Redundancia directa). [18] Dado un sistema lineal e invariante en el tiempo dado por las Ec. 2.2, sea $y \in \mathbb{R}^q$ el vector de mediciones, e $x \in \mathbb{R}^n$ es el valor verdadero del vector de estado. Bajo una dinámica libre de fallas, x e y se relacionan por $y(t) = Cx(t)$, donde $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ es la matriz de parámetros de salida del sistema. La redundancia directa existe si $q > n$.

De acuerdo con los conceptos vertidos por Frank [18], cuando una falla ocurra en el vector de mediciones

$$y(t) = Cx(t) + y_f(t) \quad (2.13)$$

donde y_f es el vector de fallas de dimensiones $(q \times 1)$; $y_f^i(t) > b_i$ indica una operación con falla en la i^{th} variable medida.

Para la detección de las fallas $y_f(t)$, el vector de mediciones $y(t)$ puede ser combinado con un conjunto de ecuaciones de paridad linealmente independientes, como veremos a continuación.

Vector de paridad

DEFINICIÓN 2.2 (Vector de paridad y espacio de paridad). Sea $V \in \mathbb{R}^{(q-n) \times q}$ una matriz tal que $(q - n)$ filas son una base ortogonal del espacio nulo de C , es decir tal que,

$$VC = 0 \quad (2.14)$$

$$VV^T = I_{q-n} \quad (2.15)$$

y

$$V^T V = I_n - C(C^T C)^{-1} C^T \quad (2.16)$$

El vector definido por,

$$p(t) = Vy(t) \quad (2.17)$$

es llamado vector de paridad [63] y es una medida de la consistencia relativa entre las medidas $y(t)$ redundantes. El espacio columna de V es llamado espacio de paridad S de C .

Notar que, combinando el vector de paridad definido en [2.17](#) con la matriz de proyección V de [2.15](#), tenemos,

$$p(t) = Vy(t) = VCx(t) + Vy_f(t) = Vy_f(t) \quad (2.18)$$

que es una ecuación de paridad, la cual se utilizará para calcular *residuos* en el Cap. [4](#) y lleva al indicio de fallas en la mediciones. Esta última revela que las ecuaciones de paridad contienen únicamente los errores debido a las fallas, independientemente del vector de estado x el cual no es directamente medido.

Más aún, en el espacio de paridad, las columnas de V define q direcciones de fallas distintas asociadas con las q mediciones. Esto puede ser usado con el fin de diagnosticar las fallas como se verá mas adelante.

En el caso que no se produzcan fallas el vector de paridad es nulo, $p = 0$. Por un falla en un único *i-ésimo*-sensor, la *i-ésima* columna de V determina la dirección a lo largo de la cual el vector de paridad p se proyecta, esto es,

$$y_f(t) = [0 \ 0 \ 0 \ \dots \ y_f^i \ \dots \ 0]^T \quad (2.19)$$

$$Vy_f = y_f^i \quad (2.20)$$

Esto asegura que la falla en la *i-ésima* medición implica el crecimiento del vector de paridad p en la dirección de la *i-ésima* columna de V , lo cual nos permiten la distinción y su posible aislación. En el Cap.[4](#) se continuará con este planteo.

Redundancia Temporal

Es obtenida por medio de las relaciones dinámicas entre sensores y actuadores, usualmente mediante ecuaciones diferenciales o en diferencias. Con los datos de las entradas y salidas del proceso, la redundancia temporal es útil para detectar tanto fallas en sensores como actuadores. Es la generalización del concepto de redundancia directa para distintos instantes de tiempo, realizado inicialmente por Chow y Willsky [\[11\]](#). Este tipo de redundancia requiere una base matemática más profundo y es la cual nos vamos a dedicar gran parte del Cap. [4](#).

Capítulo 3

Fundamentos de la Identificación de Sistemas

3.1. Introducción

La estimación de parámetros es el proceso por el cual se utiliza las observaciones de un sistema dinámico para desarrollar modelos matemáticos que representen adecuadamente las características del mismo. El modelo que se asume consta de un conjunto finito de parámetros, cuyos valores se aproximan utilizando técnicas de estimación.

En general la necesidad de modelar un sistema o proceso tiene como finalidad diseñar un control de acuerdo a ciertas necesidades temporales o frecuenciales de dicho sistema, o como en esta tesis, *obtener herramientas de detección y diagnóstico de fallas basadas en modelo*, para el posterior diseño de un *sistema de control tolerante a fallas*.

En este capítulo se discutirán técnicas basadas en cuadrados mínimos, siguiendo autores tales como, Ljung [35], Söderström y Stoica [68], y Zanini [79]. La intención de este capítulo es describir:

- los modelos matemáticos con los que se trabaja para estimar los parámetros,
- el método utilizado,
- los pasos de los algorítmicos de identificación.

Por último se expondrán, los resultados obtenidos con el sistema físico disponible en el laboratorio.

3.2. Identificación de sistemas

La identificación es una herramienta utilizada para obtener modelos matemáticos aproximados de sistemas dinámicos a partir de datos (señales) recolectados de dichos procesos. Para llevar a cabo la identificación de algún sistema se debe seguir un procedimiento, que comprende los siguientes pasos:

1. *Obtención de datos de entrada-salida:* se debe excitar al sistema mediante la aplicación de una señal de entrada, y registrar la evolución de sus entradas y salidas durante un intervalo de tiempo, con el cual se pueda caracterizar la dinámica del sistema.
2. *Tratamiento previo de los datos registrados:* los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados u otro tipo de perturbaciones que pueden ser necesario corregir antes de iniciar la identificación del modelo. Se deben preparar los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
3. *Selección de la estructura del modelo:* si el modelo que se desea obtener es un modelo paramétrico, el primer paso es determinar la estructura deseada para dicho modelo. Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso.
4. *Obtención de los parámetros del modelo:* a continuación se procede a la estimación de los parámetros de la estructura que mejor se ajusta a la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos experimentalmente.
5. *Validación del modelo:* por último se requiere determinar si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud necesario para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
 - a) El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - b) La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
 - c) El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

La identificación de sistemas generalmente se lleva a cabo a lazo abierto y consiste en los pasos anteriormente explicitados, que son representados en un diagrama de flujo como se muestra en la Fig. 3.1. Note que si el primer modelo que se obtiene no pasa la etapa de validación, se comienza con un procedimiento iterativo hasta llegar a un modelo validado.

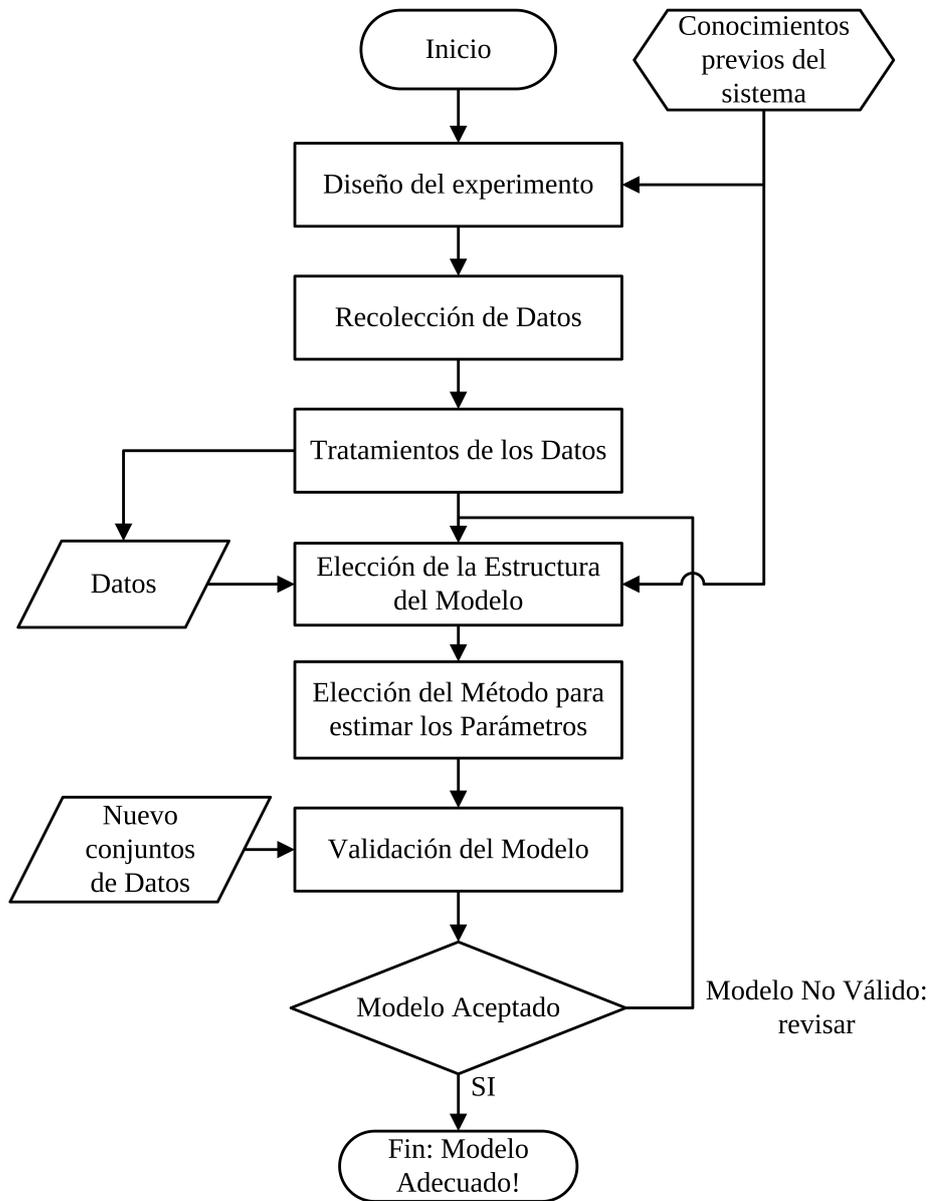


Figura 3.1: Diagrama para la identificación de sistemas basado en los trabajos de Söderström y Stoica [68] y Ljung [35].

3.2.1. Sistemas dinámicos y modelización matemática.

En este punto es importante remarcar que esencialmente hay tres tipos de modelos,

- *Modelos matemáticos rigurosos* desarrollados a partir de leyes fundamentales de la disciplina estudiada (física, química, mecánica, etc.).
- *Modelos empíricos* obtenidos a través de datos experimentales.

- *Modelos semi-empíricos* los que se construyen a partir de los dos métodos anteriores.

Los modelos empíricos o de orden reducido conducen a una comprensión de las características dinámicas del sistema, donde la estimación de los parámetros a partir de los datos de entrada-salida del sistema resulta ser un paso crucial en este procedimiento.

Debido a que el modelo es de naturaleza empírica, a menudo puede ocurrir que varios tipos de modelos distintos aproximen a una misma respuesta. De acuerdo con Gertler [19], existen varios criterios para establecer la validez de los modelos obtenidos a partir de los parámetros estimados y el comportamiento real del sistema. Esto se mostrará mediante un ejemplo de aplicación que se presenta al final de este capítulo.

3.2.2. Representación discreta de sistemas continuos

Los sistemas físicos que se desean monitorear, y diseñar controladores tolerante a fallas, son caracterizados por ecuaciones dinámicas en *tiempo continuo*. Ellas responden a su representación natural involucrando a modelos en tiempo continuo, describiendo las características temporales continuas de las salidas que dependen de entradas continuas.

Sin embargo, el equipamiento computacional que interactúa con estos sistemas físicos monitoreándolos y controlándolos, en su gran mayoría son digitales (discretos). En particular, los controladores son realizados mediante algoritmos, que son implementados en computadoras, microcontroladores o PLC's, mediante software desarrollado específicamente para tal fin. Es por eso que resulta necesario realizar un tratamiento de estos sistemas en *tiempo discreto*, donde los algoritmos trabajan con representaciones discretas de las variables y por lo tanto requieren un modelo equivalente discreto de la planta.

Notar que, los algoritmos de monitoreo y control discreto que se implementan interactúan con variables continuas de la planta. A raíz de esto último, pueden darse dos situaciones levemente diferentes [19],

1. La salida de la planta es una señal continua que se mide mediante un elemento de medición, la cual es muestreada por una por un conversor A/D, para ser utilizada en un dispositivo digital en el que se ejecutarán algoritmos de monitoreo, identificación y estimación de fallas, junto con el algoritmo de control. Luego, la señal de control digital y es enviada a el elemento de control final por medio de un conversor D/A.
2. La señal proviene de un controlador analógico u otro dispositivo es enviada a la planta continua. Tanto esta señal de entrada como la salida del sistema son discretizadas y entregadas a un procesador que ejecutará el algoritmo de identificación y monitoreo.

En ambas situaciones, los algoritmos de identificación y monitoreo son ejecutados por procesadores que trabajan con señales de entrada y salida digitales, por lo que se requieren una representación discreta equivalente de la planta continua.

3.3. Ecuación en diferencias lineales con coeficientes constantes.

De forma genérica se denota la entrada y la salida de una realización de un sistema con $u(t)$ e $y(t)$, respectivamente. La forma de relacionar las entradas con las salidas es una ecuación en diferencias lineal. En forma genérica para una ecuación en en diferencias de orden N luce de la forma,

$$\begin{aligned} a_0y[k] + a_1y[k-1] + \dots + a_iy[k-i] + \dots + a_Ny[k-N] = \\ = b_0u[k] + b_1u[k-1] + \dots + b_iu[k-i] + \dots + b_Mu[k-M] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Escribiendo en forma compacta,

$$\sum_{i=0}^N a_iy[k-i] = \sum_{i=0}^M b_iu[k-i] \quad (3.2)$$

Luego, reescribiendo la ecuación anterior,

$$y[k] = \frac{1}{a_0} \sum_{i=0}^M b_iu[k-i] - \sum_{i=1}^N a_iy[k-i] \quad (3.3)$$

Note que, esta última ecuación expresa la salida en el tiempo k en términos de los valores previos de la entrada y la salida. Desde un punto de vista analítico se observa la necesidad de conocer los M valores de entrada y los N valores de salida previos al instante k actual, para poder determinar el valor de $y[k]$ mediante la Ec. 3.3.

Una ecuación de la forma de la Ec. 3.2 o Ec. 3.3 es denominada *ecuación recursiva* ya que especifica un procedimiento recursivo para determinar la salida en términos de la entrada y de las salidas previas. En el caso especial cuando $N = 0$, la Ec. 3.3, se reduce a

$$y[k] = \frac{1}{a_0} \sum_{i=0}^M b_iu[k-i] \quad (3.4)$$

En este caso $y[k]$ es un función explícita de los valores presentes y previos de la entrada. Por lo que la misma es llamada *ecuación no recursiva*, ya que no usa los valores previos de la salida para determinar el valor presente de la salida.

3.3.1. Operador desplazamiento

Para facilitar la expresión de sistemas discretos y escribirlos de una forma mas concisa se puede utilizar el *operador desplazamiento*, el cual se puede definir de dos maneras: el operador desplazamiento en adelante y en retardo, con este operador las operaciones con ecuaciones en diferencias se reducen a operaciones algebraicas. Los mismos se definen como:

$$\text{Operador adelante: } qy[k] = y[k + 1] \quad (3.5)$$

$$\text{Operador retardo: } q^{-1}y[k] = y[k - 1] \quad (3.6)$$

La Ec. 3.6 resulta conveniente para expresar las ecuaciones en diferencias en forma algebraica. Así, la Ec. 3.1 puede escribirse en forma compacta,

$$A(q^{-1})y[k] = B(q^{-1})u[k] \quad (3.7)$$

donde se definen los polinomios $A(q^{-1})$ y $B(q^{-1})$ como

$$A(q^{-1}) \triangleq (a_0 + a_1q^{-1} + \dots + a_iq^{-i} + \dots + a_Nq^{-N}) \quad (3.8)$$

y

$$B(q^{-1}) \triangleq (b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_iq^{-i} + \dots + b_Mq^{-M}) \quad (3.9)$$

3.4. Identificación de procesos con modelos autorregresivos

3.4.1. Principales modelos discretos

A continuación se comentan los principales modelos discretos que se utilizan para identificar sistemas, definiendo diferentes modelos según como se utilicen los polinomios que acompañan a la salida, la entrada y eventualmente al ruido o perturbación.

Modelo de Media Móvil

Es la representación discreta más elemental de un modelo, donde la salida en el instante k depende únicamente de las entradas en los instantes anteriores, de manera que puede escribirse como:

$$y[k] = b_1u[k - 1] + b_2u[k - 2] + b_3u[k - 3] + \dots + b_iu[k - i], \quad (3.10)$$

o bien en forma compacta,

$$y[k] = B(q^{-1})u[k]. \quad (3.11)$$

A este tipo de modelo se lo designa como MA¹.

¹de la designación en inglés *Moving Average*

Modelo Media Móvil Autoregresiva

Habitualmente se lo conoce como ARMA². Es una estructura de modelo discreto lineal en el que la salida en el instante de muestreo k se obtiene a partir de valores pasados de la salida y de la entrada (en $k - 1$, $k - 2$, etc.). De forma genérica el modelo autoregresivo se puede expresar de la siguiente manera:

$$y[k] = a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] + \dots + a_iy[k - i] + \dots \\ + b_1u[k - 1] + b_2u[k - 2] + b_3u[k - 3] + \dots + b_iu[k - i] \quad (3.12)$$

que en forma compacta resulta,

$$A(q^{-1})y[k] = B(q^{-1})u[k]. \quad (3.13)$$

Modelo Media Móvil Autoregresiva con Entrada Exógenas

Por último, existe esta representación al que habitualmente se lo denomina ARMAX³. Este tipo de representación considera la inclusión de una perturbación estocástica, de manera que el modelo deviene

$$y[k] = a_1y[k - 1] + a_2y[k - 2] + \dots + a_iy[k - i] + b_1u[k - 1] + b_2u[k - 2] + \dots \\ + b_iu[k - i] + e[i] + c_1e[k - 1] + c_2e[k - 2] + \dots + c_ie[k - i] \quad (3.14)$$

o en forma compacta,

$$A(q^{-1})y[k] = B(q^{-1})u[k] + C(q^{-1})e[k]. \quad (3.15)$$

Note que en la Ec. 3.15 el polinomio $A(q^{-1})$ actúa como filtro de ruido.

Con este último modelo lineal, se concluye esta sección. En general existen ventajas al utilizar los modelos autoregresivos para identificar la dinámica de procesos, las cuales son:

1. No requieren que la entrada sea una forma determinada.
2. No es necesario esperar que el sistema alcance el régimen estacionario para determinar sus parámetros.

A continuación presentaremos el problema de *estimación de parámetros*, el cual se basa en la minimización de un criterio (por ejemplo, el error de estimación), y este criterio en sí mismo puede servir para establecer la validación de un modelo en particular, entre un conjunto de posibles modelos.

²del inglés *AutoRegressive Moving Average*

³de su denominación en inglés *AutoRegressive Mobile Average with Exogenous Input*

3.4.2. Estimación de Parámetros

En la estimación de parámetros, se pretende sistematizar la búsqueda de la relación causa-efecto entre excitación y respuesta de un proceso dado. En general, se procede a aplicar una señal de entrada al sistema y tomándose muestras tanto de la señal de entrada, como de salida. Con el conjuntos de datos muestreados se identifican, los coeficientes de un modelo previamente definido.

Mediante técnicas de mínimos cuadrados es posible realizar una estimación de parámetros que represente la dinámica de los modelos lineales de sistemas. En general, los métodos de mínimos cuadrados son aplicables tanto a los problemas lineales como no lineales, sistemas SISO como sistemas MIMO. Las técnicas de mínimos cuadrados también se pueden aplicar al problema de identificación on-line.

Este método es el más utilizado dentro de la identificación o estimación de parámetros, y del mismo se desprenden diferentes algoritmos como lo son: el método del gradiente, el método de Gauss-Newton, entre otros (Ver Apéndice [A.1](#)).

3.5. Aplicación experimental

A lo largo de la tesis se trabajará con distintos sistemas experimentales, algunos disponibles a escala de laboratorio y otros a través de simulaciones numéricas, con el objeto de testear las bondades de las técnicas tanto de detección y aislación de fallas como de corrección y adaptación ante las mismas. Por tal motivo, a continuación se presenta un ejemplo de aplicación con un sistema de tres tanques con interacción planteado originalmente dentro del ámbito del Control Tolerante a Fallas por Lunze *et al.* [\[37\]](#).

En el marco del FTC, el sistema de tres tanques es considerado un *benchmark*, esto es un modelo de referencia para realizar estudios en la temática. Dentro del proyecto *COSY* [\[4\]](#) de la Fundación de Ciencias de Europea [\[5\]](#), se propuso al sistema de tres tanques como un *benchmark* para todos sus socios. [\[21\]](#), [\[37\]](#).

El sistema de tres tanques considerado, está basado en el trabajo de Bismarckstr [\[4\]](#), quien lo utiliza con el fin de investigar controles feedback lineal y no lineal multivariable. Otros aportes importantes fueron dados por Koenig *et al.* [\[29\]](#), quienes han sintetizado un observador desacoplado lineal para detectar y aislar fallos en los actuadores y sus componentes solidarios al sistema (tuberías, tanques, etc) en un punto de operación sin estimación de la magnitud de los mismos.

⁴Control de Sistemas Complejos.

⁵*European Science Foundation* de la Universidad Ruhr de Bochum.

3.5.1. Sistema experimental de laboratorio

A modo de ejemplo se considera un sistema hidráulico que puede ser utilizado para el tratamiento del agua o almacenamiento de líquidos en muchas plantas industriales y donde el control de los niveles de líquido en una planta es crucial con el fin de responder a las especificaciones deseadas.

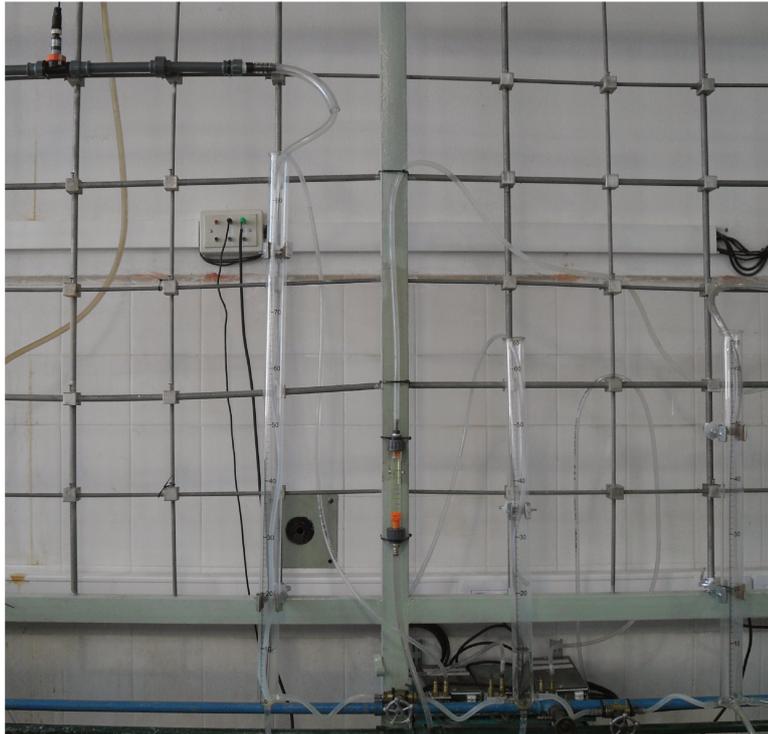


Figura 3.2: Sistema de tanques presente en el laboratorio.

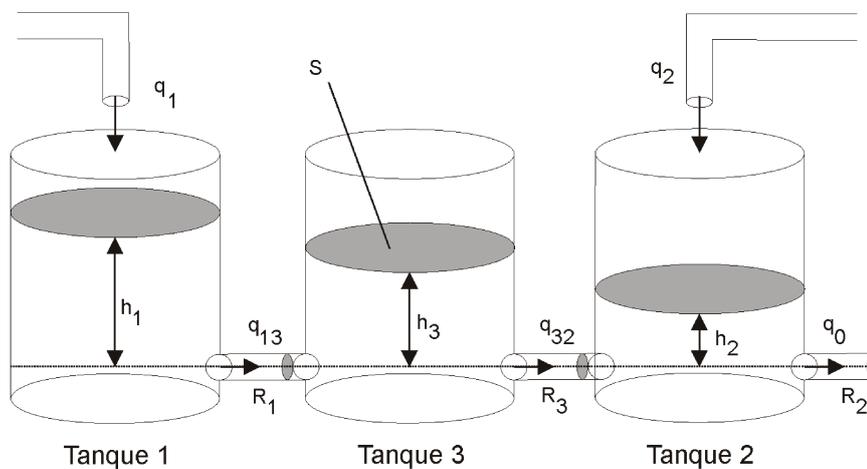


Figura 3.3: Diagrama esquemático del sistema de tres tanques.

Se considera el sistema hidráulico experimental de laboratorio representado en la Fig. 3.3 compuesto por tres tanques cilíndricos de idéntico diámetro d . Los tanques están acoplados por dos tubos cilíndricos de sección S_i y resistencias hidráulicas R_i . En la Fig. 3.2 se aprecia el sistema que se posee en el laboratorio, del cual fueron tomados los parámetros planteados en la Tabla 3.5.5.

El caudal a la entrada a los tanques 1 y 2 son reguladas por válvulas que otorgan los caudales de entrada q_1 y q_2 al sistema. Tres sensores de presión diferencial en conjunto con sus respectivos *strain gauge*⁶ son utilizados para medir las tres alturas de los tanques, de manera de convertir señales neumáticas en señales eléctricas que son ingresadas a la PC a través de un conversor A/D.

3.5.2. Hipótesis de modelado

- Fluido incomprensible: densidad ρ constante y propiedades físicas constantes.
- Todas las corrientes de líquido tiene la misma temperatura, la cual es considerada constante.
- El caudal de salida a través de las válvulas en ambos tanques puede ser modelado adecuadamente por la Ec. 3.18. En consecuencia las resistencias hidráulicas de los tanques son funciones de la raíz cuadrada del nivel de líquido en cada uno de ellos y puede ser considerada constante un entorno pequeño del estado de operación del sistema,
- Las secciones transversales de los tanques (A_1 , A_2 y A_3) son considerados constantes en todo el rango de variabilidad de las alturas.

3.5.3. Modelo no lineal y lineal

Las ecuaciones que modelan al sistema son las ecuaciones de balance que conducen al modelo matemático no lineal del sistema de tres tanques interconectados. El sistema puede ser descrito por las siguientes ecuaciones de balance de materia,

$$\begin{aligned} A_1 \rho \frac{dh_1}{dt} &= q_1 \rho - q_{13} \rho \\ A_2 \rho \frac{dh_2}{dt} &= q_2 \rho + q_{32} \rho - q_0 \rho \\ A_3 \rho \frac{dh_3}{dt} &= q_{13} \rho - q_{32} \rho \end{aligned} \quad (3.16)$$

⁶Galgas extensiométricas

donde la variable h_j denota la altura del tanque j , q_{mn} representa el caudal desde el tanque m al tanque n , ($m, n = 1, 2, 3 \quad \forall m \neq n$). Estos caudales son modelados por la ley de Torricelli, por lo que

$$q_{mn}(t) = Cv_m \text{signo}(h_m(t) - h_n(t)) \sqrt{2g|h_m - h_n|} \quad (3.17)$$

donde $\text{signo}(h_m(t) - h_n(t))$ considera el sentido de circulación de acuerdo a la diferencia de nivel, y q_0 representa el caudal de salida del sistemas de tanques, descrito por

$$q_0(t) = Cv_2 \sqrt{2g|h_1 - h_2|} \quad (3.18)$$

El modelo de la planta presentada en la Fig. 3.3 es claramente no lineal, y dado que el propósito es controlar el sistema entorno a un punto de operación definido, se realizaron las hipótesis de modelado y la linealización en torno a dicho punto de acuerdo con Adam [1].

Tomando las ecuaciones del modelo matemático no-lineal en el dominio del tiempo, dadas por las Ec.'s. 3.17, 3.17 y 3.18, y considerando las hipótesis 3.5.2, el sistema luce como,

$$\begin{aligned} A_1 \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{1}{R_{13}} \sqrt{h_1 - h_3} + q_1 \\ A_2 \frac{dh_2}{dt} &= \frac{1}{R_{32}} \sqrt{h_3 - h_2} - \frac{1}{R_2} \sqrt{h_2} + q_2 \\ A_3 \frac{dh_3}{dt} &= \frac{1}{R_{13}} \sqrt{h_1 - h_3} - \frac{1}{R_{32}} \sqrt{h_3 - h_2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Linealizando por serie de Taylor y trabajando en variables de desviación, se obtiene el sistema de ecuaciones siguiente,

$$\begin{aligned} A_1 \frac{d\bar{h}_1}{dt} &= -\frac{1}{R_{13}} \bar{h}_1 - \frac{1}{R_{13}} \bar{h}_3 + \bar{q}_1 \\ A_2 \frac{d\bar{h}_2}{dt} &= \frac{1}{R_{32}} \bar{h}_3 - \left(\frac{1}{R_{32}} + \frac{1}{R_2} \right) \bar{h}_2 + \bar{q}_2 \\ A_3 \frac{d\bar{h}_3}{dt} &= \frac{1}{R_{13}} \bar{h}_1 - \left(\frac{1}{R_{13}} + \frac{1}{R_{32}} \right) \bar{h}_3 + \frac{1}{R_{32}} \bar{h}_2 \end{aligned} \quad (3.20)$$

donde todas las variables indicadas como \bar{x} representan a la variable escrita como desviación del estado estacionario inicial, con condiciones iniciales $\bar{h}_1 = \bar{h}_2 = \bar{h}_3 = 0$.

3.5.4. Válvulas de control

Las válvulas que manejan los caudales que se poseen en el laboratorio de ICP [7] son válvulas neumáticas normalmente abiertas. Las válvulas neumáticas consisten en un diafragma o pistón con resorte que trabaja en un rango

⁷Cátedra de Instrumentación y Control de Procesos - FIQ - UNL

de 3 a 15 [psi]. Al aplicar una cierta presión sobre el diafragma, el resorte se comprime de tal modo que el mecanismo empieza a moverse y sigue moviéndose hasta llegar a un equilibrio entre la fuerza ejercida por la presión del aire sobre el diafragma y a la fuerza ejercida por el resorte. (Ver Fig. 3.4)

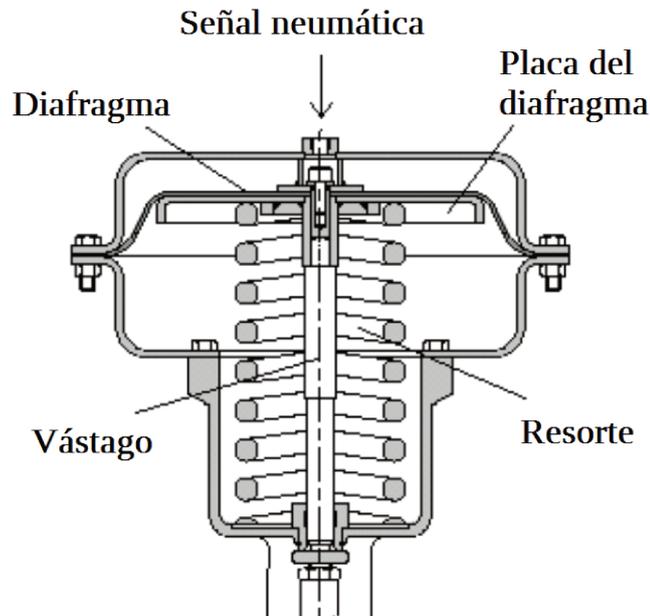


Figura 3.4: Servomotor neumático de válvula de control.

Primeramente, por no poseer datos del fabricante, se procedió a relevar la curva inherente de la misma, como se observa en la Fig. 3.5a. Observando la misma, ésta se comporta de manera no lineal, debiéndose lo anterior a la conducta no lineal de su elemento de cierre. Se puede notar además histéresis en su funcionamiento, es decir el caudal a una determinada presión varía dependiendo si se encuentra en apertura o en cierre. A pesar de lo anterior, existe un rango de caudal en el cual podemos considerar el comportamiento inherente de la válvula como lineal, y este rango se encuentra entre el 40 % y el 80 % de Q_{max} que se corresponde a un rango de 40 a 75 % de apertura.

Luego se procedió a realizar una caracterización de la curva instalada como se aprecia en la Fig. 3.5b en fracción de caudal. También se aprecian en la Fig. 3.6 la respuesta de las válvulas instaladas, en valores absolutos del caudal de salida, que se poseen en laboratorio de ICP, y en la Fig. 3.7, el valor caudal en función de la presión en la cabeza de la válvula.

3.5.5. Obtención de constantes y punto de operación

Seguidamente, ya caracterizadas los elementos de acción final, se procedió con la identificación del sistema.

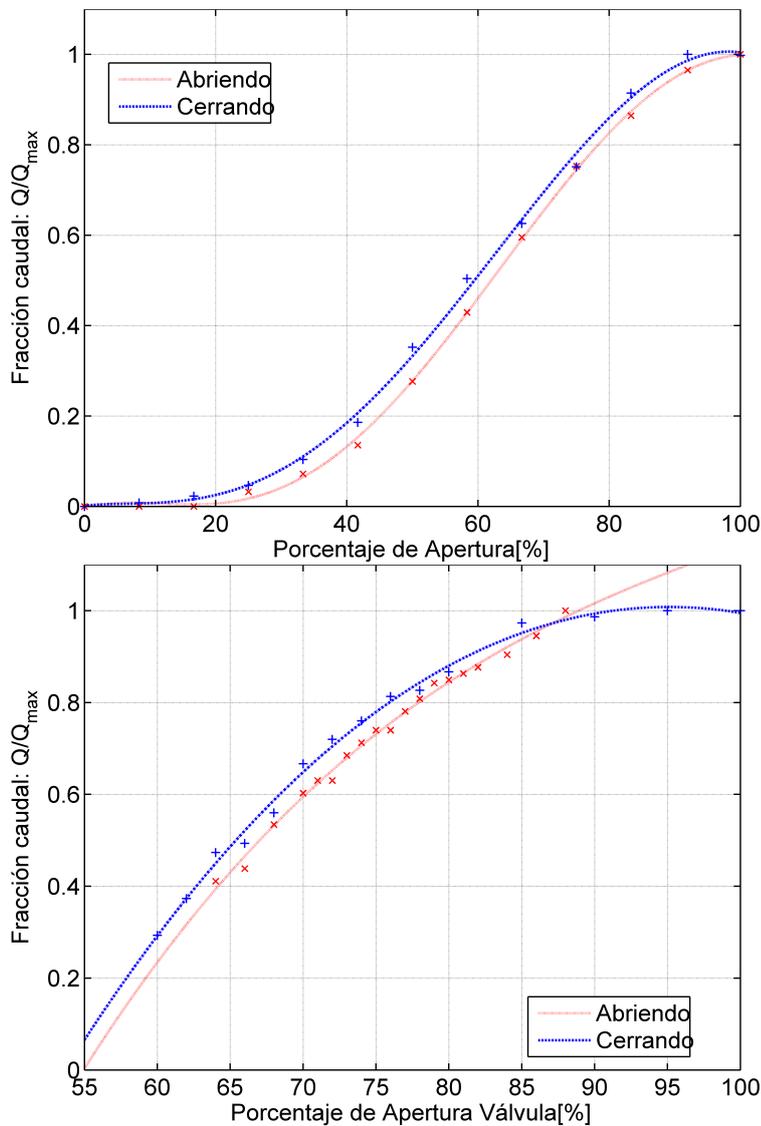


Figura 3.5: a. Curva inherente. b. Curva instalada de la válvula de control.

Cabe aclarar que según la clasificación expuesta en la Sec. 3.2.1, en esta experiencia se propone identificar un modelo *semi-empírico* basado en el sistema de Ecs. 3.20, donde los parámetros a identificar son las resistencias hidráulicas de las válvulas de control y manuales (identificadas en la Fig. 3.3).

Los transductores y el convertidor E/P (el cual transforma una señal de tensión en una señal de presión) se encuentran conectados a una placa de adquisición de datos A/D NI USB-6009 de *National Instruments*, y fue implementado una rutina en *MATLAB*[®] dentro del software *LabView*[™] 8.5, para adquirir datos experimentales. Para identificar al sistema se utilizó el toolbox de *Identificación de Sistemas* de Matlab, que ya posee rutinas implementadas, para tal propósito. En la siguiente Tabla 3.5.5 se presentan los

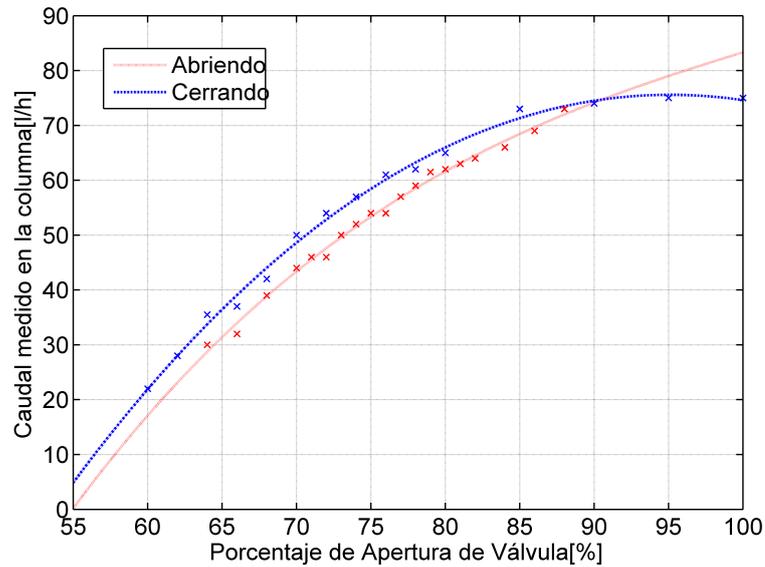


Figura 3.6: Caudal real vs % de apertura de la válvula de control.

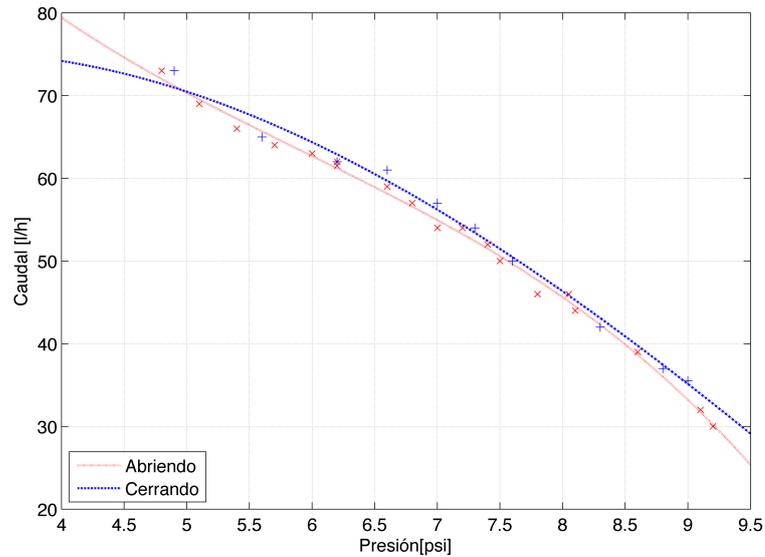


Figura 3.7: Curva de la válvula de control. Caudal vs. presión neumática.

datos del sistema experimental que se conocían previo al ensayo.

En la Fig. 3.8 se aprecian las curvas obtenidas en la experiencia para obtener la resistencia de salida del tanque 1 que anteriormente hemos denominado R_{13} , de la misma manera se procedió con los demás tanques. El punto de operación elegido fue $\bar{h}_i = 0[cm]$ y $\bar{q}_1 = 12[cm^3/s]$ En $t = 57[s]$ se realiza un cambio escalón de $8.8[cm^3/s]$ respondiendo el primer tanque como se aprecia con detalle en la Fig. 3.9, donde también se notan las aproximaciones obtenidas para este tanque. En $t = 401[s]$ se observa otro cambio $7.6[cm^3/s]$,

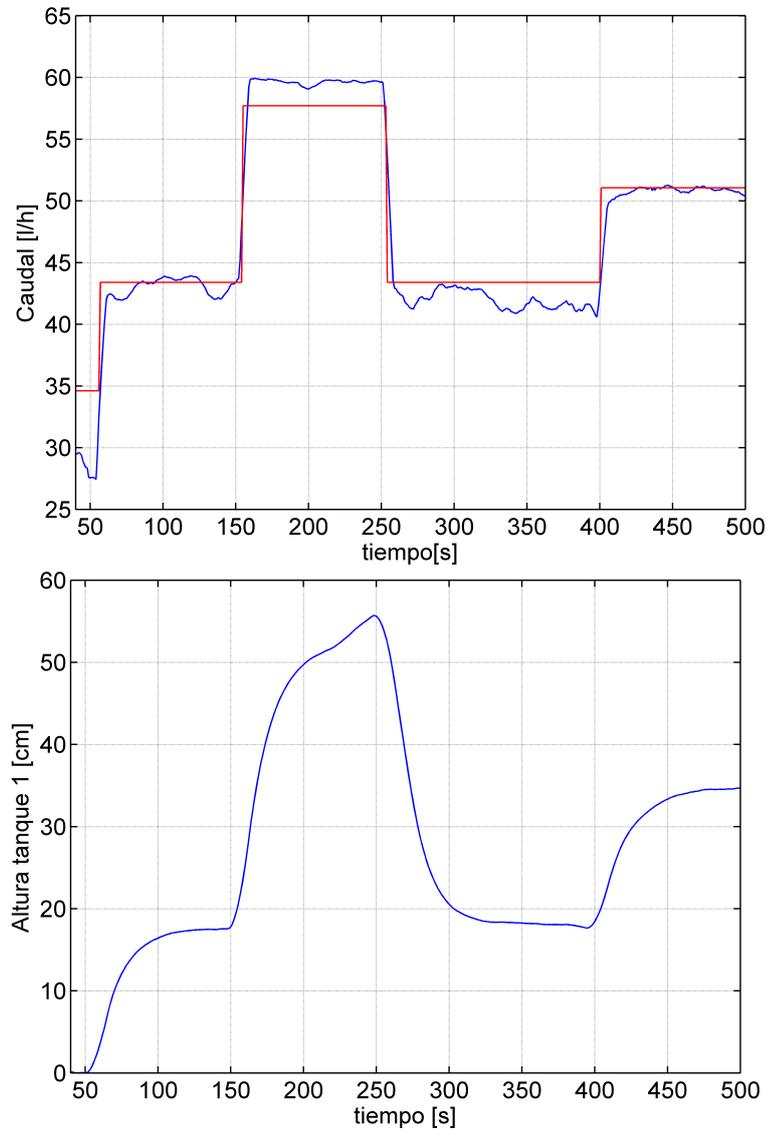


Figura 3.8: Datos del Tanque 1 relevados en la experiencia de laboratorio.

Parámetros	Símbolo	Valores
Diámetro del tanque	$d_{1,2,3}$	4 [cm]
Área del tanque	$S_{1,2,3}$	12,56 [cm ²]
Nivel máximo	hi_{max}	60 [cm]
Caudal máximo	q_{max}	22.3 [cm ³ /s]

Tabla 3.1: Datos del sistema de tres tanques experimental de laboratorio

donde podemos validar los modelos obtenidos. Luego de varias corridas se obtuvieron las siguiente características físicas, [3.5.5](#).

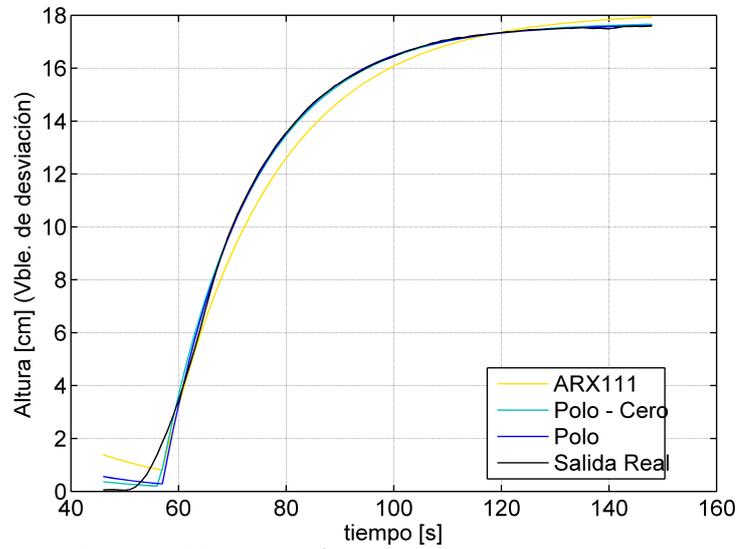


Figura 3.9: Identificación del primer tanque.

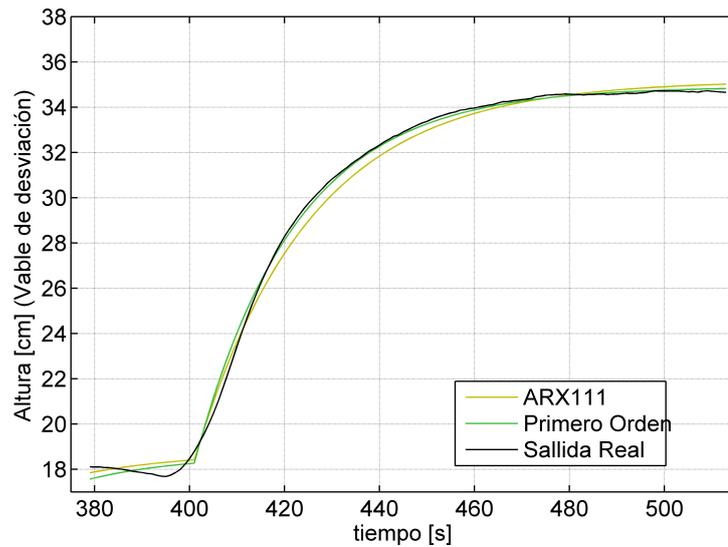


Figura 3.10: Validación del primer tanque.

Parámetro	Símbolo	Valores
Resistencia Hidráulica	$R_{13} = R_{32}$	1,9 [cm s/cm ³]
	R_2	2,5 [cm s/cm ³]

Tabla 3.2: Parámetros del experimental de laboratorio

3.6. Conclusiones

Con los resultados de esta experiencia concluimos este capítulo, donde se explicitaron los pasos necesarios para realizar una correcta identificación de un sistema, siguiendo a distintos autores referentes en la temática. Se plantearon los principales modelos discretos lineales, los cuales son más habituales

Tipo Modelo	Modelo	% Fiteo
Entrada-salida	$H(s) = \frac{1,8}{19,16s+1}$	95.58[%]
ARX de 1er	$1 - 0,9515q^{-1}y(t) = 0,1q^{-1}u(t)$	89.79[%]

Tabla 3.3: Modelos y % de correspondencia

al realizar un procedimiento de identificación, y los conceptos básicos sobre el principio de mínimos cuadrados y su aplicación a la identificación.

Al final se expuso las experiencias realizadas en el laboratorio de la cátedra de *Instrumentación y Control de Procesos* de la FIQ-UNL, procurando modelizar un sistema de tanques utilizado en posteriores experiencias.

Capítulo 4

Detección y Diagnóstico de Fallas

4.1. Introducción

La Detección y Diagnóstico de Fallas, en adelante FDD¹, es un campo importante de investigación de la comunidad de ingeniería en control desde hace varias décadas. Ésta interés se basa en las mejoras que esta disciplina otorga en términos de seguridad, fiabilidad y reducción de costos de operación de la planta.

En este capítulo se discutirán diversas técnicas para resolver el problema de detección y diagnóstico de fallas, y se estudiará las metodologías más comúnmente utilizadas.

Existe una sutil diferencia entre lo que se denomina FDD y detección y aislamiento de fallas (FDI), siendo que el primero engloba al segundo, como veremos seguidamente.

La detección y diagnóstico de fallas está constituida por tres funciones o tareas principales:

- Detección: determina la presencia de una falla.
- Aislación: indica su localización.
- Identificación: cuantifica su magnitud.

La detección es indispensable y la aislación necesaria, sin embargo la identificación puede ser omitida en la mayoría de los casos, salvo en aquellos en que el tamaño de la falla sea de una magnitud considerable. A la aislación junto a la identificación se la denomina también *diagnóstico de fallas*. La detección y aislación pueden ser ejecutadas simultáneamente o secuencialmente.

¹de la abreviatura del inglés *Fault Detection and Diagnosis*.

En la mayoría de los casos prácticos la FDD se realiza en presencia de ruido, perturbaciones y errores de modelado. Este tipo de *interferencias*, hace que se produzcan retardos en la detección de fallas, falsas alarmas, errores en el diagnóstico de las mismas.

Por lo tanto, el algoritmo de diagnóstico tiene que ser diseñado de manera tal que,

- Sea insensible a las perturbaciones.
- Posea mecanismos para suprimir el efecto de ruidos.
- Presente robustez frente a los errores en el modelo.
- Mantenga sensibilidad con respecto a las fallas.

Los métodos utilizados en esta disciplina se clasifican en tres grupos: los basados en modelos cuantitativos, los basados en modelos cualitativos, y basados en la historia del proceso. Venkatasubramanian *et al.* ([74], [75] y [76]), ha desarrollado un exhaustivo análisis de estas clasificaciones.

Todas las metodologías presentadas en esta tesis corresponde al primer grupo, es decir, el estudio se centrará en lo métodos basados en modelos cuantitativos o directamente denominado *métodos basados en modelo*, planteando como hipótesis que se conoce *a priori* las ecuaciones y parámetros que caracterizan la planta en estudio.

Los diferentes métodos de aislación basadas en modelo requieren de una serie de pasos,

1. Detectar inconsistencias entre el comportamiento real y el esperado, mediante *un generador de residuos*.
2. Plantear las reglas de decisión que permitirá identificar el tipo de fallas presentes.

A continuación, se presenta primeramente la terminología y los conceptos fundamentales usados en FDD, introduciendo conceptos como los de *redundancia física y analítica*. Luego se desarrollarán los métodos de residuos estructurales utilizando ecuaciones de paridad, introducidos en el trabajo de Chow ([11], [25]), y los residuos direccionales junto con el vector de paridad generalizado (GPV) basado en los trabajos de Viswanadham *et al.* ([77]) y de Omana y Taylor ([54]). Finalmente, se hará uso de las técnicas que utilizan la teoría de observadores de estado, para arriar al filtro de Beard-Jones [45], observadores de salida, de entrada desconocida, y bancos de observadores, quienes varios referentes en el FDD han trabajado los últimos años como Isermann [24], Frank [18], Patton [57], Chen [56] y Ding [14], entre otros.

4.2. Generación de Residuos.

En la sección [2.6.2](#) se introdujo el concepto de redundancia analítica. En este apartado estableceremos el concepto básico del generador de residuos, con la suposición de que se dispone un modelo aceptable de la planta.

El concepto de *redundancia analítica* implica la reconstrucción analítica de las señales del sistema bajo monitoreo. Con el propósito de generar residuos, se pretende realizar una comparación entre las mediciones del sistema y la mencionada reconstrucción analítica de las señales bajo monitoreo.

En la Fig [4.1](#) se esquematiza de forma genérica la implementación de un generador de residuos, donde las señales de entrada y salida del sistema son enviadas al generador, para computar los residuos.

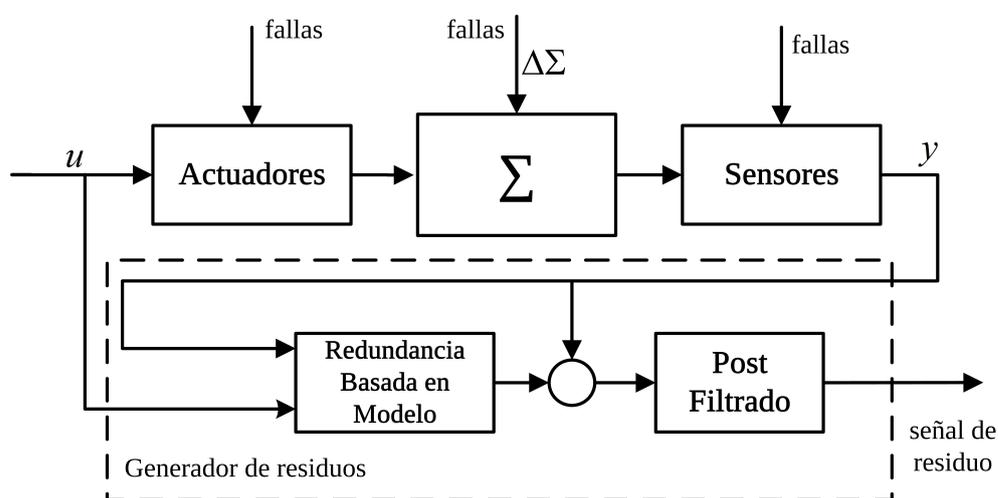


Figura 4.1: Descripción esquemática de los generadores de residuos basados en modelo.

Se pueden distinguir tres diferentes metodologías para obtener generadores de residuos:

- basados en relaciones de paridad.
- factorización estable de matrices de funciones de transferencia.
- métodos basados en Observadores.

Dentro de estos últimos, fueron surgiendo distintas estrategias que hacen uso de,

- Filtro de Detección de Fallas (FDF²)

²del inglés *Fault Detection Filter*.

- Observadores de Diagnóstico (DO³) u Observadores Funcionales.
- Observadores de entrada desconocida.(UIO⁴)
- Banco de Observadores.

De los métodos basados en observadores existentes, en esta tesis se prestará atención a:

- la forma de diseñar e implementar estos generadores de residuos.
- las características de las soluciones.
- y las interconexiones entre estos tipos diferentes de generadores de residuos.

4.2.1. Generador de Residuos Genérico

El elemento central de un esquema FDD basado en modelo es el generador de residuos. Para otorgar información útil para el FDD, cada elemento del vector de residuos generado $r(t) \in \mathbb{R}^p$ debe ser insensible a las entradas del sistema,

$$r(t) = 0 \iff u(t) \neq 0 \wedge f(t) = 0 \quad (4.1)$$

y sensible a las fallas,

$$r(t) \neq 0 \iff f(t) \neq 0 \quad (4.2)$$

donde $f(t)$ corresponde a una señal de falla cualquiera. La Ec.(4.2) es la base de la detección de fallas utilizando residuos basados en modelo. El vector de residuos en un FDD es una función lineal de las entradas y salidas del sistema monitoreado, y el *generador de residuos* resulta ser en la práctica un algoritmo, que actúa sobre las observaciones del sistema.

Si el sistema se encuentra libre de fallas, el residuo está cercano a cero, mientras que si una falla ocurre el residuo se incrementa significativamente.

En la Fig.4.2 se muestra una manera de generar residuos. Consideremos el siguiente modelo que describe el comportamiento del sistema bajo monitoreo con fallas aditivas en sus sensores y actuadores,

$$y_p(s) = G_p(s)(u(s) + f_u) + f_y \quad (4.3)$$

donde $y_p(s)$ representa las variables de salida y $u(s)$ las entradas, consideradas ambas medibles. La manera práctica de aplicar redundancia es computar en línea la relación entrada-salida

$$y_m(s) = G_m(s)u(s) \quad (4.4)$$

donde $y_m(s)$ es la salida del modelo ante la misma entrada.

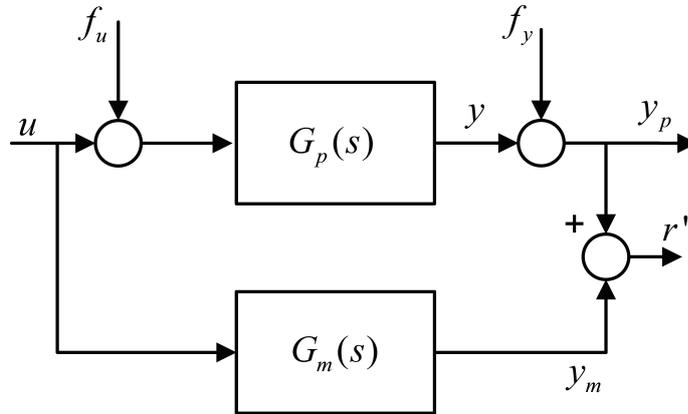


Figura 4.2: Generador de Residuos Genérico

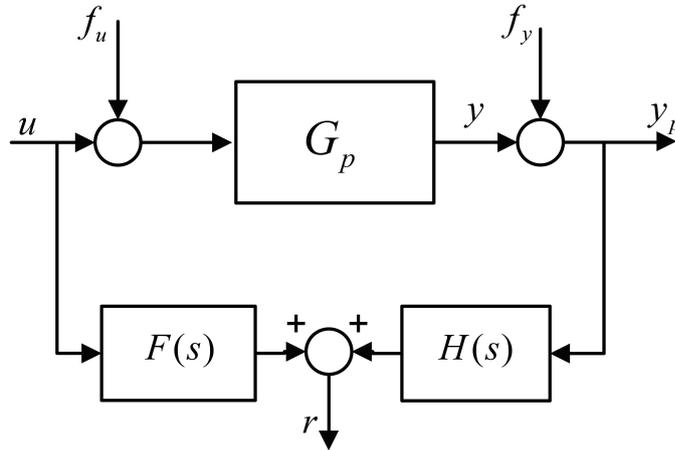


Figura 4.3: Estructura general de un generador de residuos.

De una forma genérica podemos expresar al residuo como,

$$r(s) = F(s)u(s) + H(s)y_p(s) \quad (4.5)$$

donde $r(s)$ es el vector de residuos y, $F(s)$ y $H(s)$ son matrices de funciones de transferencia realizables estables. La Ec. (4.5) es un generador de residuos si y solo si tiende a cero cuando todas las fallas son ceros, esto es,

$$r(t) = 0 \iff f(t) = 0 \quad (4.6)$$

donde $f = (f_u, f_y)'$ y entonces,

$$0 = F(s)u(t) + H(s)G_p(s)u(t) \quad (4.7)$$

³del inglés *Diagnostic Observer*.

⁴del *Unknown Input Observer*.

para todo $u(t)$ distinto de cero debe cumplirse,

$$0 = F(s) + H(s)G_p(s) \quad (4.8)$$

por lo que la Ec.(4.5) representa la forma genérica de un generador de residuos. Entonces, el diseño de este generador consiste en elegir la matrices de funciones de transferencias realizables $F(s)$ y $H(s)$ que satisfagan la Ec.(4.8).

4.3. Métodos basados en ecuaciones de paridad.

Las ecuaciones de paridad son variantes de las ecuaciones del modelo entrada-salida o espacio de estados de la planta, usualmente transformadas o reordenadas[20]. Su esencia radica en chequear para una entrada conocida medible al proceso, la consistencia entre la salida del modelo de la planta y las salidas medidas de la planta. La idea de esta aproximación es reordenar la estructura del modelo de manera tal de alcanzar la mejor aislación de fallas.

Previamente, en la Subsec.2.6.2, ya se presentaron los conceptos redundancia analítica, vector de paridad, ecuación de paridad y espacio de paridad, por lo que a continuación se muestra de que manera se implementan las ecuaciones de paridad tanto en el dominio de Laplace, como en el temporal.

4.3.1. Ecuaciones de Paridad en el dominio frecuencial

Para explicar este método primeramente utilizaremos un sistema SISO. El proceso es descrito por la función de transferencia dada por,

$$G_p(s) = \frac{y(s)}{u_p(s)} = \frac{N_p(s)}{D_p(s)} \quad (4.9)$$

donde $u_p = u + f_u$ y el modelo del proceso que se tiene es,

$$G_m(s) = \frac{y_m(s)}{u(s)} = \frac{N_m(s)}{D_m(s)} \quad (4.10)$$

El modelo se asume que es conocido y que posee parámetros fijos tal que,

$$G_m(s) = G_p(s) + \Delta G(s) \quad (4.11)$$

donde $\Delta G(s)$ describe los errores del modelo.

Los residuos pueden ser formulados como el error de salida o el polinomio error, similarmente a los métodos de estimación de parámetros vistos en el Cap.3.

Calculando los residuos como *error de salida* los mismos son Fig.4.2,

$$r'(s) = y_p(s) - y_m(s) = y_p(s) - G_m(s)u(s) \quad (4.12)$$

la cual es llamada *forma computacional* de la ecuación de paridad. De esta manera los residuos son calculados utilizando las mediciones disponibles de las entradas y las salidas.

Si se introduce en la ecuación anterior la respuesta del sistema a sus fallas,

$$r'(s) = G_p(s) [u(s) + f_u(s)] + f_y(s) - G_m(s)u(s) = \Delta G(s)u(s) + G_p(s)f_u(s) + f_y(s) \quad (4.13)$$

que muestra que la dinámica del vector de residuos se debe pura y exclusivamente por las fallas y la incertidumbre del modelo. De acuerdo a Isermann [25] la fórmula anterior se denomina *forma interna* del generador de residuos.

En el caso en que la planta es igual al modelo, esto es $\Delta G(s) = 0$ el residuo es sensible a las fallas de salida f_y y a las fallas de entradas f_u filtradas con el proceso $G_p(s)$.

$$r'(s) = G_p(s)f_u(s) + f_y(s) \quad (4.14)$$

El *polinomio de error* Fig 4.4 nos otorga, desde la *forma computacional*,

$$r(s) = D_m(s)y_p(s) - N_m(s)u(s) \quad (4.15)$$

donde $r(s) := D_m(s)r'(s)$.

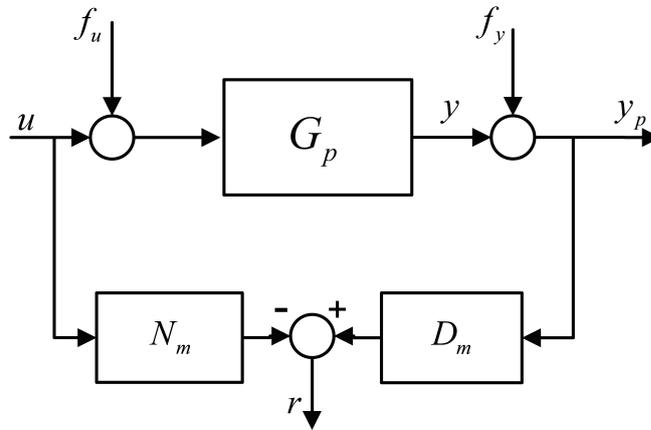


Figura 4.4: Generación de residuos con ecuaciones de paridad con funciones de transferencia para polinomio de error.

Luego,

$$r(s) = D_m(s) [G_p(s)[u(s) + f_u(s)] + f_y(s)] - N_m(s)u(s) \quad (4.16)$$

y si la planta es igual al modelo,

$$r(s) = D_m(s)f_y(s) + N_m(s)f_u(s) \quad (4.17)$$

Las fallas en las entradas f_u son filtradas por el polinomio del modelo $N_m(s)$ y las fallas en las salidas f_y por el polinomio $D_m(s)$, ambos términos

implican obtener derivadas de orden superior de las señales, que puede traer problemas a la hora de la implementación y producir amplificación del ruido de alta frecuencia. Las Ecs. (4.12) y (4.15) son denominadas *ecuaciones de paridad* y r y r' se denominan *residuos primarios*.

Si queremos detectar tanto fallas en los sensores como en actuadores, este planteo no es suficiente tanto para sistemas SISO como MIMO, debido a que la cantidad de residuos es igual a la cantidad de salidas.

4.3.2. Residuos Estructurales.

El éxito de la detección de fallas viene acompañado del proceso de aislación el cual distingue una falla particular de las otras. Mientras que un único residuo es suficiente para detectar una falla un conjunto de residuos (o un vector de residuos) se necesita para aislar distintas fallas.

Existe dos maneras de distinguir o aislar fallas: utilizando un conjunto de residuos estructurales o utilizando un vector de residuos direccionales.

Los residuos que se obtienen desde las ecuaciones de paridad generalmente son *residuos estructurales*. Los residuos estructurales son diseñados de tal manera que cada residuo individual, reacciona selectivamente a un subconjunto de fallas. Esto es, se requiere que únicamente algunos componentes del vector de residuos no sean cero, como respuesta a una falla específica. Esto permite formar patrones binarios de fallas, o una estructura de residuos para la identificación de las fallas, debido a que cada residuo no es afectado completamente por todo el conjunto de fallas.

El objetivo en el diseño de residuos estructurales es generar un buen patrón de aislación del vector de residuos. Los residuos deberían ser independientes al menos de una falla para ser detectada.

4.3.3. Ecuaciones de paridad en espacio de estados.

El procedimiento presentado en el Cap. 2 a través de las Ec. (2.17) y Ec. (2.18), asume redundancia directa. Ahora detallaremos un método desarrollado por Chow and Willsky [11], que propone una metodología para generar ecuaciones de paridad teniendo en cuenta la expresión de nuestro proceso modelizada en espacio de estados. Este procedimiento, donde se propone redundancia analítica, provee un diseño de residuos tanto para redundancia directa como temporal.

Consideramos el modelo en espacio de estados dados por

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4.18)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

Ahora consideremos el sistemas afectado por fallas aditivas en las entradas y salidas,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lf(t) \quad (4.19)$$

$$y(t) = Cx(t) + Mf(t) \quad (4.20)$$

donde L y M son matrices de dimensiones apropiadas, y en el vector de fallas $f(t)$ hemos incluido tanto las fallas en los sensores $f_y(t)$, como en los actuadores $f_u(t)$ ordenados de la siguiente manera.

$$f(t) = \begin{pmatrix} f_u(t) \\ f_y(t) \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Aplicando la primera derivada a la Ec. (4.20),

$$\dot{y}(t) = C\dot{x}(t) + M\dot{f}_y(t) \quad (4.22)$$

e introduciendo la Ec. (4.19),

$$\dot{y}(t) = CAx(t) + CBu(t) + CLf_u(t) + M\dot{f}_y(t) \quad (4.23)$$

Haciendo lo mismo con la segunda derivada,

$$\begin{aligned} \ddot{y}(t) &= C\ddot{x}(t) + M\ddot{f}_y(t) = \\ &= CA^2x(t) + CABu(t) + CB\dot{u}(t) + CALf_u(t) + CL\dot{f}_u(t) + M\ddot{f}_y(t) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Continuando con esta idea, se genera una redundancia de ecuaciones para el mismo instante de tiempo t . Incrementando el número de derivadas de $y(t)$ hasta $p \leq n$, agrupando las ecuaciones para escribirlas en una forma compacta,

$$Yx(t) = Qx(t) + Q_u U(t) + Q_f F(t) \quad (4.25)$$

donde

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \vdots \\ y^{(p)}(t) \end{pmatrix} \quad U(t) = \begin{pmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \\ \vdots \\ u^{(p)}(t) \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

$$F(t) = \begin{pmatrix} f(t) \\ \dot{f}(t) \\ \vdots \\ f^{(p)}(t) \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^p \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

y

$$Q_u = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-1}B & CA^{p-1}B & \dots & CAB & 0 \end{pmatrix} \quad (4.28)$$

$$Q_f = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CL & M & 0 & \dots & 0 \\ CAL & CL & M & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{p-1}L & CA^{p-1}L & \dots & CL & M \end{pmatrix} \quad (4.29)$$

Los residuos para el diagnóstico tendrán propiedades deseadas en su estructura que serán alcanzadas por una subsiguiente transformación. Premultiplicando Ec. (4.25) con un vector w^T de dimensiones apropiadas, arribamos a,

$$w^T Y(t) = w^T Qx(t) + w^T Q_u U(t) + w^T Q_f F(t) \quad (4.30)$$

donde w^T es seleccionada de manera tal que,

$$w^T Q = 0. \quad (4.31)$$

Si se satisface la Ec. (4.31), los residuos son independientes de los estados $x(t)$, y los restantes elementos de w^T pueden ser utilizados para diseñar diferentes ecuaciones de paridad, de manera tal de obtener mayor cantidad de residuos $r_i(t)$, que cada uno sea independientes de una medición.

Entonces los vectores w^T conforman una matriz W y el vector de residuos vectoriales $r(t)$ se plantea como,

$$r(t) = WY(t) - WQ_u U(t). \quad (4.32)$$

y

$$r(t) = WQ_f F(t) \quad (4.33)$$

La Ec. (4.32) se la denomina *forma computacional* ya que otorga la forma matricial en que se calcula nuestros residuos, mientras que la Ec. (4.33) se la denomina *forma interna*, que nos muestra como los residuos son afectados por el vector de fallas $f(t)$.

Los residuos estructurales son caracterizados por matrices incidentes, en las que sus filas y columnas, son los residuos y la codificación de las fallas, respectivamente. Este conjunto de ecuaciones lineales homogéneas son independientes, si el sistema es observable. En el dominio de Laplace la

Ec. (4.26) implica,

$$Y(s) = \begin{pmatrix} y(s) \\ sy(s) \\ \vdots \\ s^{(p)}y(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ sI \\ \vdots \\ s^{(p)}I \end{pmatrix} y(s) = L_y(s)y(s) \quad (4.34)$$

$$U(s) = \begin{pmatrix} u(s) \\ su(s) \\ \vdots \\ s^{(p)}u(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ sI \\ \vdots \\ s^{(p)}I \end{pmatrix} u(s) = L_u(s)u(s) \quad (4.35)$$

y los residuos son,

$$r(s) = WY(s) - WQ_u U(s) = WL_y Y(s) - WQ_u L_u u(s) \quad (4.36)$$

Esta aproximación de ecuaciones de paridad con modelos representados en espacio de estados necesitan derivadas de orden p tanto para las entradas y como para las salidas, por lo que en la práctica los ruidos se amplifican con la consecuente obtención de residuos ruidosos.

Desde el punto de vista del tratamiento de señales, la diferenciación de una señal siempre decrementa la relación señal a ruido. Por tal motivo, se trata de evitar diferenciar una variable de estado.

En las siguientes secciones se presentará la teoría de observadores, que posibilita estimar las variables de estado que no están accesibles desde una medición, sin realizar una diferenciación.

Resumen del método

Resumiendo el procedimiento planteado en esta sección,

1. Calcular Q , Q_u and Q_f , de Ec. (4.27), Ec. (4.29) y Ec. (4.29).
2. Diseñar una matriz apropiada W , tal que cada residuo es independiente de al menos una entrada o salida.
3. Definir el patrón de aislación o Matriz de Inferencia que permita aislar cada falla.
4. Calcular $r(t)$ desde Ec. (4.32) con el objeto de detectar fallas.
5. Con los $r(t)$ y la Matriz de Inferencia, se aísla la falla.

4.3.4. Ejemplo Motor de DC

Con el objeto de testear la performance de los métodos concernientes a FDD, se reproducen los resultados obtenidos en Picó y Adam ([58]), con un motor experimental de corriente continua Yamamoto YA-70 Fig.4.5, el comportamiento bajo fallas en sensores y actuadores fue simulado un modelo en espacio de estado. Un motor de DC puede ser descrito por dos ecuaciones di-



Figura 4.5: MotorDC de Laboratorio. Yamamoto YA-070.

ferenciales, la primera que modela la parte eléctrica y la segunda que modela la parte mecánica del sistema. En espacio de estados se puede escribir,

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_a}{L_a} & \frac{-\Psi}{L_a} \\ \frac{\Psi}{J} & \frac{-M_F}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ 0 \end{bmatrix} U_a + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{J} \end{bmatrix} M_L \quad (4.37)$$

donde, L_a es la inductancia de armadura, R_a es la resistencia de armadura, Ψ es el flujo y M_F es el coeficiente de fricción viscosa, que son tomados como parámetros. El voltaje de armadura U_a es la entrada del sistema. Las variables medidas son la corriente de armadura I_a y la velocidad angular ω . La carga M_L puede ser modelada como una perturbación. Para un motor que se dispone en el laboratorio los parámetros son los de la Tabla 4.1.

	Parámetros
R_a	2,42[ohm]
L_a	3,3 10^{-3} [H]
ψ	9,8 10^{-2} [Vs]
M_F	8,16 10^{-5} [Nm.s]
J	7,36 10^{-5} [kgm ²]

Tabla 4.1: Parametros del motor DC de Laboratorio

De acuerdo a los procedimientos de diseño de residuos estructurales descritos en la Sec. 4.3.3, para el motor de DC, la matriz de diseño $W(s)$ es,

$$W(s) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ (7,36s + 8,16)10^{-4} & 0,98 \\ 7,84 & (26,4s + 0,24)10^{-3} \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Simulación Numérica

En esta sección se muestran los resultados de la simulaciones numéricas utilizando los residuos estructurales, para diferentes fallas aditivas. El comportamiento de los residuos se muestra desde la Fig. 4.6 a la Fig. 4.8.

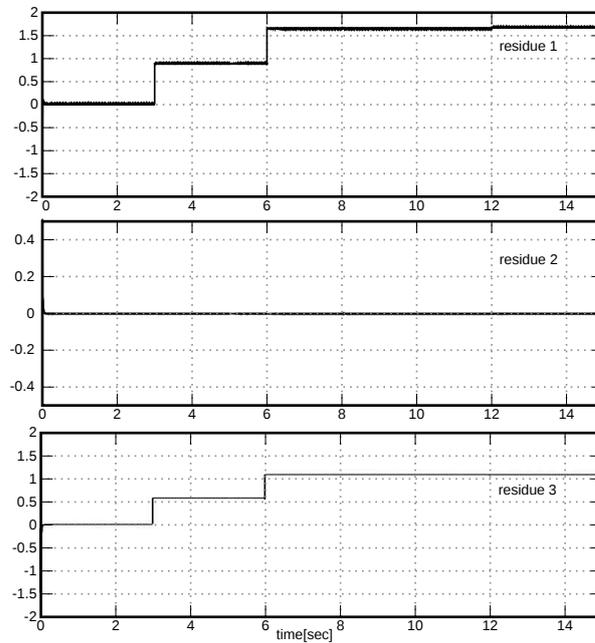


Figura 4.6: Residuos estructurales para una falla en el sensor de velocidad. -5% en $t = 3[s]$ y -10% en $t = 6[s]$.

La Fig. 4.6 muestra como los residuos estructurales reaccionan cuando ocurre una falla del -5% y -10% ocurre en el sensor de velocidad en $t = 3[s]$ y $t = 6[s]$, respectivamente. Para interpretar el comportamiento de los residuos estructurales, debemos generar un patrón de aislación, que para estos residuos se debe aplicar el patrón de la Tabla 4.2.

	$r1$	$r2$	$r3$
$\pm f_{Ua}$	\pm	\pm	\pm
$\mp f_{Ia}$	\pm	\pm	0
$\mp f_w$	\pm	0	\pm

Tabla 4.2: Signos de los residuos para diferentes fallas aditivas en el motor-DC.

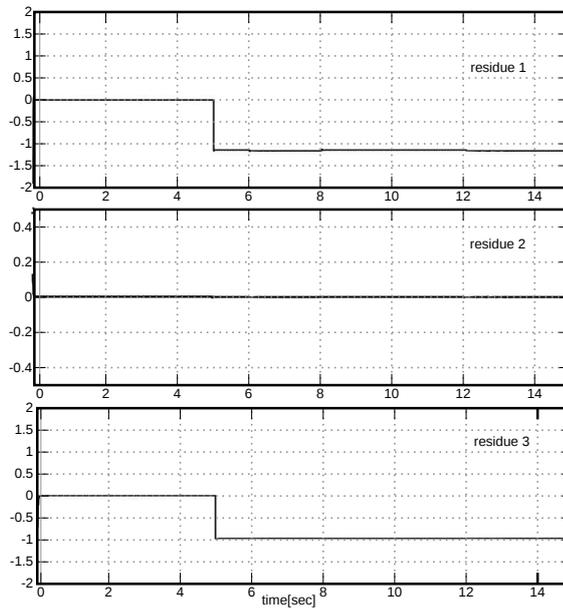


Figura 4.7: Residuos estructurales para una falla en el voltaje del actuador. +5 % en $t = 5[s]$.

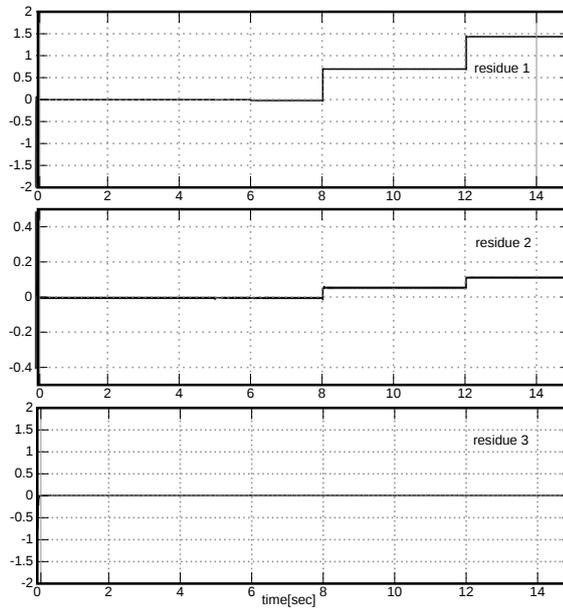


Figura 4.8: Residuos estructurales para una falla en el transductor de corriente. -5 % en $t = 8[s]$ y -10 % en $t = 12[s]$.

4.4. Residuos direccionales utilizando el vector de paridad generalizado. (GPV)

El enfoque tomando residuos direccionales genera un vector de residuos que tiene la propiedad de poseer direcciones fijas en el espacio de residuos para distintas fallas particulares, y permite aislar una falla por su ubicación en el espacio de residuos.

Lo primero que se debe hacer es determinar las direcciones predefinidas donde caen los residuos cuando una falla determinada sucede. Teniendo predeterminadas las direcciones de las fallas, aislar una falla resulta en un proceso sencillo de analizar.

La mayor ventaja que posee este método con respecto a los residuos estructurales es que no solamente puede aislar fallas cuando el sistema ha llegado a su estado estacionario (EE), sino que también permite identificar durante el desarrollo de la dinámica transitoria del sistema. Siendo este un aspecto fundamental en sistemas con dinámica lenta, como los procesos de la industria química (reactores, tanques, columnas de destilación, entre otros).

Viswanadham [77] propuso utilizar factorización estable para generar relaciones de paridad y así obtener residuos direccionales. A continuación mostraremos como realizar el diseño de residuos direccionales utilizando factorización estable, generando un vector de paridad generalizado (GPV) aplicado directamente a las medidas de las entradas y salidas de la planta monitoreada.

4.4.1. Factorización Estable

Antes que nada vamos a presentar el concepto de factorización estable. La importancia de utilizar la factorización en factores coprimos estables, yace en que las relaciones de paridad obtenidas son funciones de transferencias racionales estables, aunque el modelo de la planta sea inestable, lo que garantiza la realizabilidad y la estabilidad del generador de residuos [77].

DEFINICIÓN 4.1 (Factorización estable). *Dada cualquier matriz de funciones de transferencias racional propia $G_p(s)$ de $n \times m$, la misma puede ser definida como,*

$$G_p(s) = N(s)D(s)^{-1} = \tilde{D}(s)^{-1}\tilde{N}(s) \quad (4.39)$$

donde $(N(s), D(s))$ y $(\tilde{N}(s), \tilde{D}(s))$ se denominan factores coprimos derechos e izquierdo, respectivamente. Todas los factores son matrices de funciones de transferencia estables.

Para ambos casos, esto implica que la extensión matricial de la identidad

de Bezout se mantiene,

$$X(s)N(s) + Y(s)D(s) = I \quad (4.40)$$

$$\tilde{X}(s)\tilde{N}(s) + \tilde{Y}(s)\tilde{D}(s) = I \quad (4.41)$$

donde $X(s), Y(s), \tilde{X}(s)$ y $\tilde{Y}(s)$ son también matrices de funciones de transferencia estable. Dada la Ec. (4.39), la siguiente identidad se cumple,

$$\tilde{N}(s)D(s) - \tilde{D}(s)N(s) = 0 \quad (4.42)$$

Combinando las identidades de las Ecs. (4.39), (4.41) y (4.42), la factorización coprime doble de $G_p(s)$ es definida como,

$$\begin{bmatrix} Y(s) & X(s) \\ -\tilde{N}(s) & \tilde{D}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(s) & \tilde{X}(s) \\ N(s) & \tilde{Y}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Los dos bloques de matrices en el lado izquierdo de (4.43) son unimodulares y cada una es la inversa de la otra⁵. La Ec. (4.43) se la denomina identidad de Bezout generalizada.

4.4.2. Factorización Estable en espacio de estados

Como vimos con anterioridad, para mostrar las distintas metodologías utilizaremos sistemas descritos en espacio de estados. La técnica GPV esta basada en la factorización estable de la matriz de función de transferencia en términos de su representación en el espacio de estados. Dado el sistema descrito en espacio de estados por la Ec. (4.18). La matriz de transferencia de este sistema es,

$$G_p(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (4.44)$$

A continuación algunas definiciones que son necesarias para los conceptos de factorización estable.

DEFINICIÓN 4.2 (Estabilizabilidad). Dado el sistema por las Ec. (4.18), decimos que es estabilizable o que el par (A, B) es estabilizable, si para cualquier condición inicial $x_0 = x(0) \in \mathbb{R}^n$, es posible encontrar una entrada que lleve el estado $x(t)$ asintóticamente hacia el origen. Luego, existe una matriz $K \in M(m, n)$ tal que la matriz $A - BK$ es asintóticamente estable.

DEFINICIÓN 4.3 (Detectabilidad). Dado el sistema por las Ec. (4.18), decimos que es detectable o que el par (A, C) es detectable, si existe una matriz $L \in M(n, k)$ tal que la matriz $A - LC$ es asintóticamente estable.

El objetivo es derivar una factorización coprime doble de $G_p(s)$, y esta es dada en el siguiente teorema:

⁵Una matriz unimodular es una matriz real cuadrada con determinante igual a uno.

Teorema 4.1 (Matrices estables). *Dado un sistemas por las Ec. (4.18), asumiendo que el par de matrices (A, B) y (A, C) son estabilizables y detectables, respectivamente, es posible seleccionar un par de matrices constantes K y L tal que las matrices*

$$\tilde{A} = A - BK \quad (4.45)$$

$$\tilde{A}_o = A - LC \quad (4.46)$$

siendo ambas Hurwitz (estables). Luego $G_p(s) = N(s)D(s)^{-1} = \tilde{D}(s)^{-1}\tilde{N}(s)$ y,

$$\begin{bmatrix} Y(s) & X(s) \\ -\tilde{N}(s) & \tilde{D}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(s) & \tilde{X}(s) \\ N(s) & \tilde{Y}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

donde las diferentes matrices se definen a continuación:

$$\tilde{N} = C(sI - \tilde{A}_0)^{-1}(B - LD) + D \quad (4.48)$$

$$\tilde{D} = I - C(sI - \tilde{A}_0)^{-1}L \quad (4.49)$$

$$N = (C - DK)(sI - A_0)^{-1}B + D \quad (4.50)$$

$$D = I - K(sI - A_0)^{-1}B \quad (4.51)$$

$$X = K(sI - \tilde{A}_0)^{-1}L \quad (4.52)$$

$$Y = I + K(sI - \tilde{A}_0)^{-1}(B - LD) \quad (4.53)$$

$$\tilde{X} = K(sI - A_0)^{-1}L \quad (4.54)$$

$$\tilde{Y} = I + (C - EK)(sI - A_0)^{-1}L \quad (4.55)$$

Demostración Ver [54] ■

Las dos primeras ecuaciones son los factores coprimos izquierdos para un sistema con matrices en el espacio de estados. si consideramos $C = I$ y $D = 0$ las mismas resultan,

$$\tilde{N}(s) = (sI - \tilde{A}_0)^{-1}B \quad (4.56)$$

$$\tilde{D}(s) = I - (sI - \tilde{A}_0)^{-1}L \quad (4.57)$$

4.4.3. Generación de residuos direccionales.

Consideramos ahora el sistema con fallas aditivas planteadas en la Fig. 2.5, el cual es descrito por una matriz de funciones de transferencia $G_p(s) \in \mathfrak{R}^{n \times m}$. Como vimos u es la entrada de control deseada y u_f es la entrada real. La relación entre ambas es,

$$u(t) = u_f(t) - f_u(t) \quad (4.58)$$

Similarmente, la salida actual y de la planta y la salida medida y_f obtenida por el sensor, están relacionadas por,

$$y_f(t) = y(t) + f_y(t) \quad (4.59)$$

Las variables u e y_f son externas, y se encuentran disponibles para el módulo FDD, mientras que las u_f e y son internas e inaccesibles.

Basado en la representación en espacio de estado (A, B, C) Ec. (4.18), y la definición de matriz de funciones de transferencia $G_p(s)$ dada en Ec. (4.39), se obtiene la siguiente relación libre de fallas:

$$G_p(s) = \tilde{D}(s)^{-1}\tilde{N}(s) = Y_f(s)U(s)^{-1} \quad (4.60)$$

o

$$\tilde{D}(s)Y_f(s) - \tilde{N}(s)U(s) = 0 \quad (4.61)$$

Bajo condiciones ideales, cuando la planta es lineal, libre de ruidos y fallas, esta última Ec. (4.61) se mantiene. Sin embargo, cuando una falla aparece, esta relación no se respeta, mostrando la inconsistencia entre las entradas de los actuadores y las salidas de los sensores, con respecto al modelo Ec. (4.46) libre de fallas. Utilizando esto, se define el vector de paridad generalizado $p(s)$ como,

$$p(s) = W(s) \left[\tilde{D}(s)Y_f(s) - \tilde{N}(s)U(s) \right] \quad (4.62)$$

Donde la matriz de transformación $W(s)$ es introducida para alcanzar las especificaciones de respuesta a las fallas deseada. Utilizando las definiciones presentadas en el Teorema 4.1, Ec. (4.46) y las Ec. (4.56),

$$p(s) = W(s) \left[\left[I - C(sI - \tilde{A}_0)^{-1}L \right] Y_f(s) - \left[C(sI - \tilde{A}_0)^{-1}(B - LD) + D \right] U(s) \right] \quad (4.63)$$

Entonces el vector de paridad generalizado (GPV⁶) resulta ser,

$$p(t) = \mathcal{L}^{-1}(p(s)) \quad (4.64)$$

que es una función que varía en el tiempo con pequeña magnitud cuando la planta es lineal, libre de fallas y sin ruido. Sin embargo, cuando una falla ocurre el GPV exhibe cambios en su magnitud que depende del tamaño de la falla, mostrando la inconsistencia entre las entradas provenientes de los actuadores, y las salidas de los sensores, con respecto al modelo libre de fallas.

Cada falla produce un vector de paridad con diferentes características a lo largo de ejes o subespacios determinados, permitiendo usar el GPV con la finalidad de aislar las fallas.

Estos ejes o subespacios son determinados por las direcciones de espacio de estados.

La transformación W es introducida para otorgar propiedades de aislación y profundizar las direcciones del vector de paridad ante los distintos tipos de fallas. Para simplificar la implementación asumiremos que $W(s)$ es constante y la L en la Ec. (4.57) es elegida tal que $\tilde{A}_o = \sigma I$, con $\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \cdots \ \sigma_m]$, donde es posible si se cumple si (A, C) es observable.

⁶Generalized Parity Vector.

4.4.4. Aislación de fallas usando residuos direccionales.

Con el proposito de aislar las fallas, una alternativa a los residuos estructurales son los residuos direccionales. En este caso, se utiliza la propiedad de que dichos residuos caen en direcciones predeterminadas, permitiendo esta aislar las fallas. Estos ejes o sub-espacios son determinados por las matrices de espacio de estado.

Fallas en actuadores

Para analizar como funciona este sistema de FDD consideremos una falla en el i -ésimo actuador $f_{u,i}$. Considerando la Ec. (4.58) en el dominio de Laplace y reemplazando en la Ec. (4.62) y considerando que se cumple $\tilde{D}Y - \tilde{N}U_f = 0$, el GPV cae en la dirección de,

$$p_{f_{u,i}}(s) = (W\tilde{N}(s))^i f_{u,i} \quad (4.65)$$

Esta ecuación determina que la dinámica de $p_{f_{u,i}}$ se halla en la dirección de la i -ésima columna de $(W\tilde{N})$. Entonces,

$$\tilde{N} = (sI - \tilde{A}_o)^{-1}B = [\text{diag}(s + \sigma_i)]^{-1}B \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, m \quad (4.66)$$

con lo que,

$$p_{f_{u,i}}(s) = (WB)^i \frac{f_{u,i}}{s + \sigma_i} \quad (4.67)$$

En estado estacionario el vector de paridad, puede computarse utilizando el teorema del valor final como,

$$p^{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s p(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} p(t) \quad (4.68)$$

Si asumimos que se produce un falla constante repentina, del tipo escalón con magnitud b_i , el vector de paridad en estado estacionario $p_{f_{u,i}}^{ss}$ valdrá,

$$p_{f_{u,i}}^{ss}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} \left[(WB)^i s \left[\frac{b_i/s}{s + \sigma_i} \right] \right] = (WB)^i \frac{b_i}{\sigma_i} \quad (4.69)$$

Para $W(s) = I$, la aislación de la falla en el actuador se basa en el ángulo θ_i entre el GPV y el B_n^i , si falla el i -ésimo actuador, este ángulo deberá ser cero o muy pequeño.

Fallas en sensores

Ahora mostraremos como se comporta el GPV ante una falla en el j -ésimo sensor ($f_{y,j}$). Supongamos que la misma es aditiva, abrupta, y modelable como un cambio en escalón de amplitud s_j . Por lo que esta falla, de manera similar a la falla en el actuador, hace que el GPV cae en la dirección de,

$$p_{f_{y,j}}(s) = (W\tilde{D}(s))^j f_{y,j} \quad (4.70)$$

Asumiendo nuevamente que $C = I$ y $(sI - \tilde{A}_o)^{-1} = [\text{diag}(s + \sigma_j)]$, la Ec. (4.57) puede ser escrita como,

$$\tilde{D} = I - (sI - \tilde{A}_o)^{-1}L = I - [\text{diag}(s + \sigma_j)]^{-1}L \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, m \quad (4.71)$$

Entonces, $\tilde{A}_o = A - LC = \text{diag}(-\sigma_j)$, para el caso especial que $C = I$, tenemos $L = A + \sigma I$, donde $\sigma = [\sigma_1 \ \sigma_2 \ \dots \ \sigma_m]$, entonces,

$$\tilde{D} = I - (sI - \tilde{A}_o)^{-1}[A + \sigma I] \quad (4.72)$$

Definimos B_d como,

$$B_d = -L = (-A - \sigma I) \quad (4.73)$$

y para la falla en el j -ésimo sensor resulta,

$$p_{f_{y,j}(s)} = \left(W^j + \frac{(W^i B_d)^j}{s + \sigma_j} \right) s_j \quad (4.74)$$

Para el caso de la falla en un sensor no es posible confinar al vector a lo largo de una dirección fija, salvo en algunos casos. Pero para cualquier sistema, el GPV siempre cae en un hiperplano del espacio de paridad generalizado, definido por el vector W^j y $(WB_d)^j$.

Este es el principal paso para lograr una correcta de aislación de las fallas: la determinación de las direcciones predefinidas de cada sensor y actuador.

4.4.5. Resumen del método con GPV

Resumiendo el procedimiento consiste en,

1. Encontrar una matriz L , tal que Ec. (4.46) sea estable.
2. Calcular los factores coprimos de la Ec. (4.56) y Ec. (4.57)
3. Seleccionar una matriz de transformación apropiada $W(s)$. (Usualmente una matriz constante $W(s) = W$)
4. Determinar de Ec. (4.65) y Ec. (4.66) las $i+j$ direcciones y planos para las fallas en los actuadores y sensores.

4.4.6. Ejemplo del método con GPV

A continuación, tomando el ejemplo de la Sec. 4.3.4, el diseño del vector GPV siguiendo los pasos anteriores nos da,

$$\tilde{N}(s) = \begin{bmatrix} \frac{30,30(s-3,89)}{d(s)} & \frac{403491,43}{d(s)} \\ \frac{403491,43}{d(s)} & \frac{-13587(s+727)}{d(s)} \end{bmatrix} \quad (4.75)$$

$$\tilde{D}(s) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{s-3,89}{d(s)} & \frac{-148,48}{d(s)} \\ \frac{-1331,52}{d(s)} & \frac{5(s+727)}{d(s)} + 1 \end{bmatrix} \quad (4.76)$$

son adecuadas para la aislación de fallas deseadas, donde,

$$d(s) = (s + 670)(s + 55) \quad (4.77)$$

La efectividad del método GPV es evidente en la Fig. 4.9, donde únicamente el ángulo del vector GPV con respecto a la dirección del sensor de velocidad cae a cero. En la y Fig. 4.10 se puede comparar con el resultado de la Fig. 4.7 correspondiente al residuo estructural donde ocurre una falla de -10% en el actuador en $t = 5[s]$. Finalmente, en la Fig. 4.11, a -5% y -10% en el sensor de corriente es aplicado en $t = 8[s]$ y $t = 12[s]$, respectivamente.

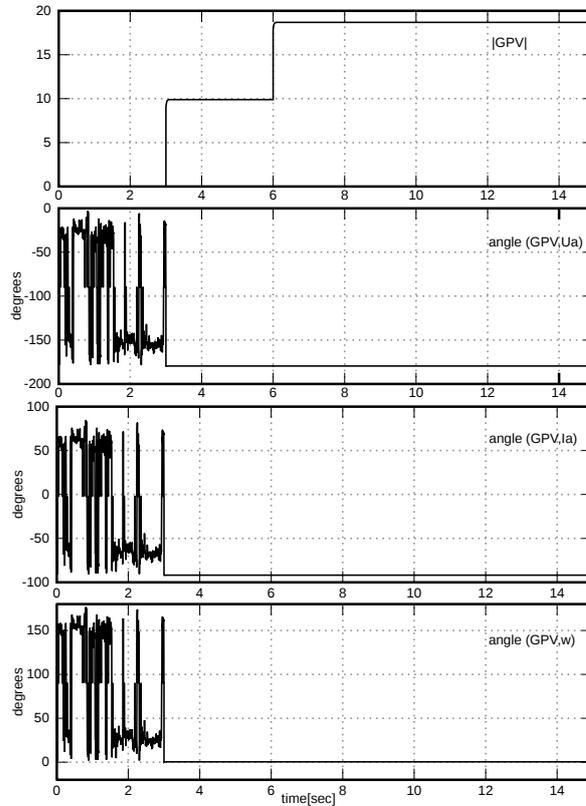


Figura 4.9: GPV para una falla en el sensor de velocidad. -5% at $t = 3[s]$ and -10% at $t = 6[s]$.

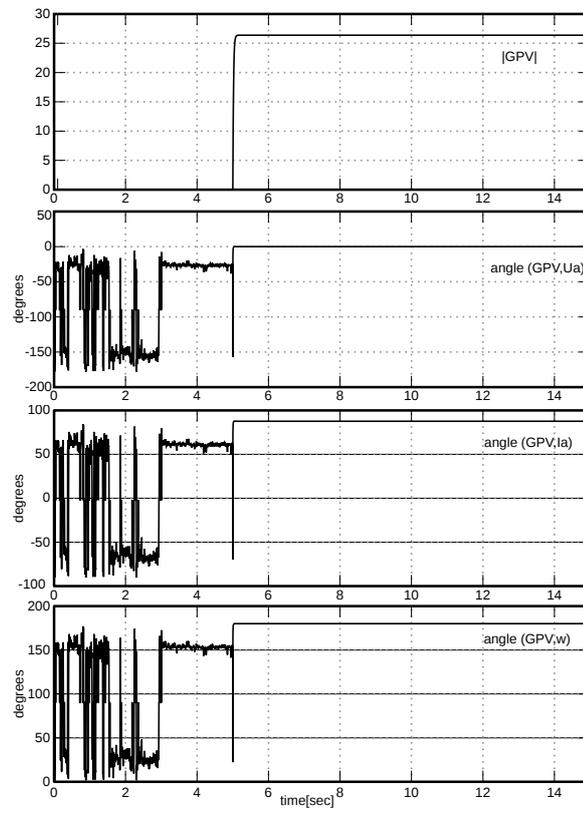


Figura 4.10: GPV para una falla en el Voltaje aplicado en $+5\%$ at $t = 5[s]$.

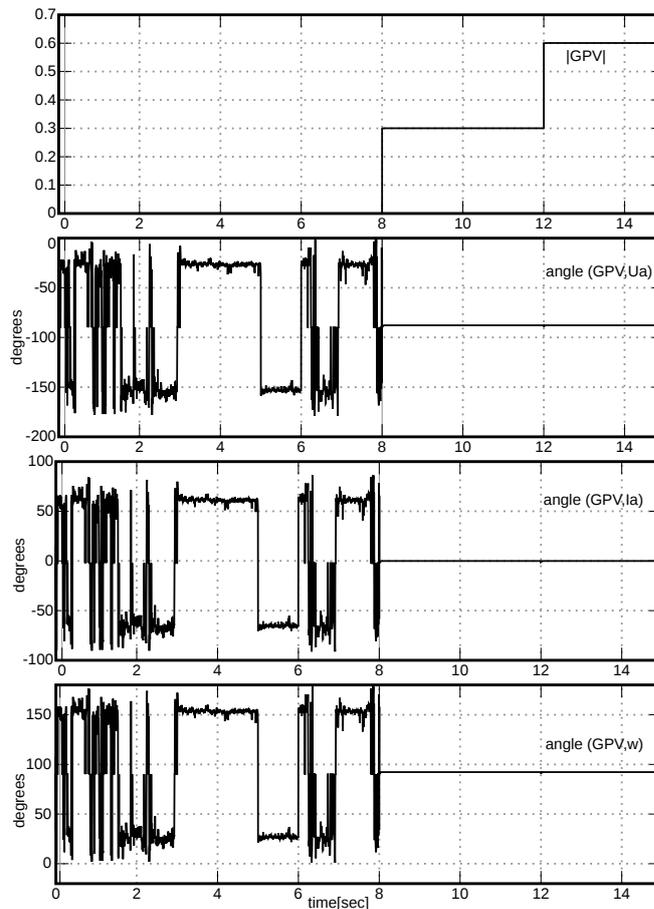


Figura 4.11: GPV para una falla en el sensor de corriente. -5% at $t = 8[s]$ and -10% at $t = 12[s]$.

4.5. Detección de fallas con Observadores.

De las tres aproximaciones mencionadas en la Sec.4.2 para la generación de residuos, con el propósito de detección y aislación de fallas en sensores y actuadores, las más difundidas son las que utilizan observadores. La idea básica detrás de los enfoques basados en observadores, es estimar las entradas y/o salidas del sistema a partir de las mediciones o un subconjunto de las mediciones de las variables de entrada-salida del sistema.

Lo que se busca es utilizar el error de estimación, ponderada con algún peso o no, como *residuo* para la detección y aislación de las fallas. Todas ellas se desprenden de algunos conceptos clásicos y herramientas ampliamente conocidas del control moderno ([30], [53]).

Desde el punto de vista del FDD se utilizan a los observadores con el propósito de generar redundancias analíticas de las variables medidas y/o manipuladas. Las discrepancias entre las mismas permiten inferir que se

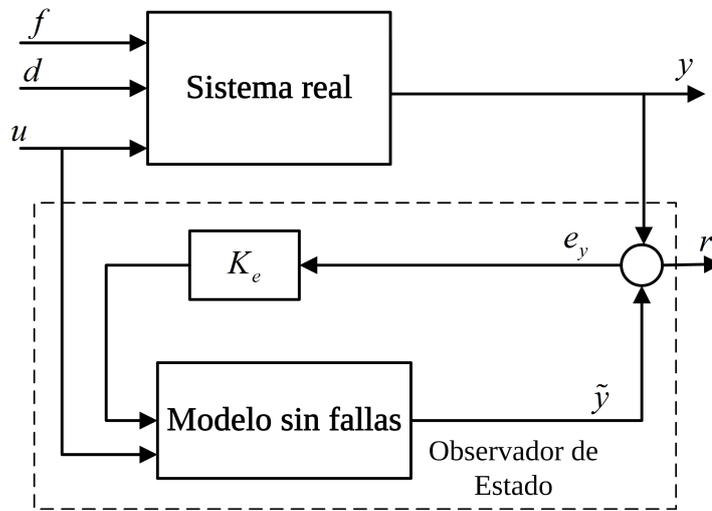


Figura 4.12: Observador de orden completo.

está ante la presencia de fallas en uno o más elementos de la planta.

Sin querer realizar un estudio exhaustivo de observadores, es necesario destinarle un espacio para aclarar y recorrer los diversos tipos de configuraciones y nomenclaturas de observadores que se utilizan con el propósito de diseñar módulos de FDD. Cuando nos referimos a tipos de observadores, nos referimos a que pueden ser utilizados los siguientes:

1. Observadores de estado.
2. Filtro de Detección de Fallas u observador de Beard and Jones (siendo un caso particular del anterior).
3. Configuraciones especiales de observadores de estado: de orden reducido o que no utilizan las totalidas de las entradas.
4. Observadores generalizados u observador diagnóstico (basados en el observador de Luengerber).
5. Observadores de entrada desconocida (UIO⁷).

Los mismos pueden utilizarse de manera individual o bien en un arreglo de banco de observadores. La elección de que tipo de observador será utilizado dependerá del tipo de falla que se quiere diagnosticar y si se quiere o no implementar un diseño robusto con respecto a perturbaciones.

⁷del inglés *Unknown Input Observer*.

4.5.1. Observadores de estado.

La configuración fundamental de un observador de estado orden completo lineal se muestra en la Fig. 4.12. Observe que el observador de orden completo consiste simplemente en un modelo paralelo del proceso con una retroalimentación del error de estimación, $e_y = y - \tilde{y}$. Aunque, en principio, el modelo de lazo abierto también funcionaría, la realimentación K_e es necesaria por varias razones:

1. para compensar las diferencias en las condiciones iniciales y,
2. para estabilizar el modelo paralelo en el caso de un sistema inestable.

Remarca. La tarea básica del diseño de los observadores de estado para la FDD es optimizarlos mediante una elección adecuada de la matriz de ganancia de realimentación K_e .

De acuerdo con los conceptos *clásicos* de observación de estados, el concepto de observabilidad es útil para reconstruir las variables de estado no medibles a partir de variables que sí se encuentran disponibles para la medición. En la FDD, los observadores de estado pueden ser utilizados si las fallas se modelan como cambios en las variables de estado (Δx_i).

En el Anexo A.3 se puede consultar una introducción a los observadores de estado, y la nomenclatura utilizada en esta sección.

Observador de orden completo con fallas aditivas

Si se considera que en el sistema actúan fallas aditivas descritas por las Ec. (4.19) y Ec. (4.20), el error del observador de estados dado por la Ec. (A.20), ($\dot{e}(t) = [A - K_e C] e(t)$), se convierte en,

$$\dot{e}(t) = [A - K_e C] e(t) + L f_u(t) - K_e M f_y(t) \quad (4.78)$$

donde las matrices L y M son las matrices de fallas introducidas en las Ecs. (4.19) y (4.20), y entonces el error de salida nos queda,

$$e_y(t) = y(t) - C \tilde{x}(t) = C e(t) + M f_y(t) \quad (4.79)$$

A partir de las Ecs. (4.78) y (4.79) se observa que, si K_e es elegido de manera tal que $(A - K_e C)$ sea estable, pasado el transitorio el error de estimación de salida $e_y(t)$ depende de las fallas f . Por lo tanto, el error de salida es utilizado como residuo,

$$r(t) = e_y(t) \quad (4.80)$$

con el propósito de detectar y aislar fallas.

Notar que los residuos no dependen de la señal de entrada $u(t)$. Cuando no se produce ningún fallo ($f = 0$), entonces $r(t) = 0$, sin embargo, si $f \neq 0$, r se incrementará.

Por lo tanto, un fallo puede ser detectado por la comprobación el incremento de $r(t)$ causada por f . En el caso más sencillo esto se puede hacer por una lógica de umbral (Clark et al, 1975; Clark, [13],[12]).

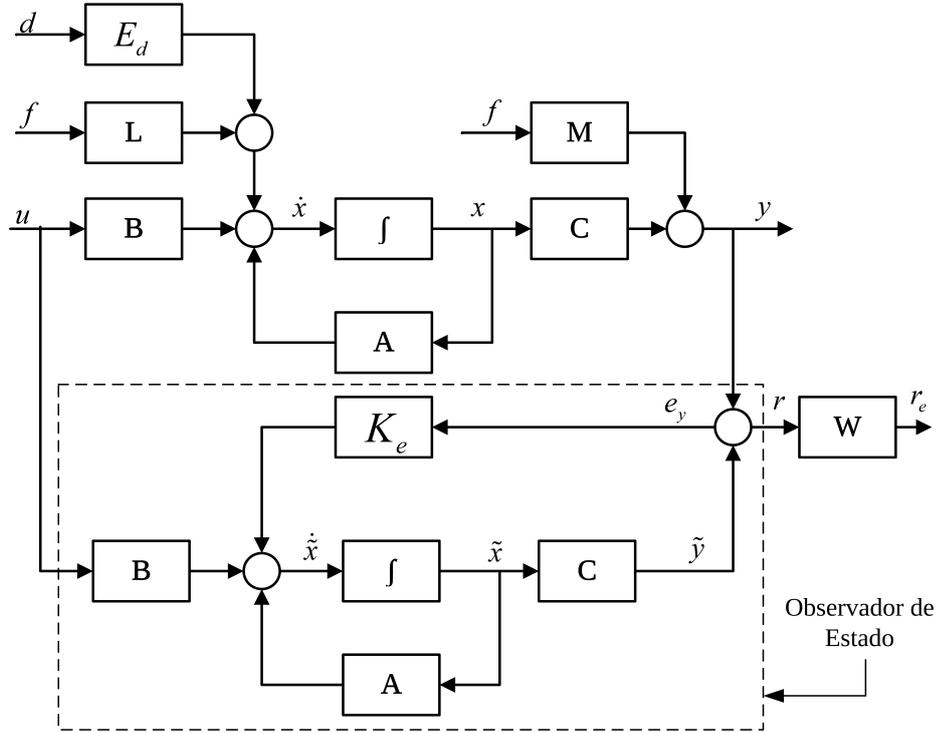


Figura 4.13: Proceso y Observador de Estado de Orden completo.

Observador de orden completo con fallas aditivas en el dominio de Laplace

Para obtener una relación entrada-salida del observador de estado Ec. (A.17) podemos escribirlo en el dominio de Laplace,

$$[sI - A + K_e C] \tilde{X}(s) = BU(s) + K_e Y(s) \quad (4.81)$$

por lo que

$$\tilde{X}(s) = [sI - A + K_e C]^{-1} [BU(s) + K_e Y(s)] \quad (4.82)$$

La transformada de Laplace de Ec. A.18 es

$$E_y(s) = Y(s) - C \tilde{X}(s) \quad (4.83)$$

por lo que introduciendo Ec. A.18 en Ec. A.18 nos queda

$$E_y(s) = Y(s) - C [sI - A + K_e C]^{-1} [BU(s) + K_e Y(s)] \quad (4.84)$$

$$r(s) = E_y(s) = -C [sI - A + K_e C]^{-1} B U(s) [I - C [sI - A + K_e C]^{-1} H] y(s) \quad (4.85)$$

Esta última ecuación es la transformada de Laplace de la forma computacional de los residuos a través de un observador de estado. Aplicando la transformada de Laplace a las ecuaciones del observador de estado con fallas aditivas y omitiendo los términos que introducen perturbaciones obtenemos,

$$r(s) = E_y(s) = C [sI - (A - K_e C)^{-1}] [L f_l(s) - K_e M f_m(s)] + M f_m(s) \quad (4.86)$$

Observadores con fallas multiplicativas - falla paramétricas

Una tipo de falla común que puede presentarse, son las fallas paramétricas o multiplicativas. Este tipo de fallas en los parámetros del sistemas aparecen en el caso de una mala aproximación del modelo o que haya cambios en el modelo, con los que las fallas aparecen como cambios en las matrices paramétricas ΔA , ΔB o ΔC , y el comportamiento del proceso será

$$\dot{x}(t) = [A + \Delta A] x(t) + [B + \Delta B] u(t) \quad (4.87)$$

$$y(t) = [C + \Delta C] x(t) \quad (4.88)$$

y el vector de error de estados y el error en la salida (sin considerar las perturbaciones aditivas), viene dada por,

$$\dot{e}(t) = [A - K_e C] e(t) + [\Delta A - K_e \Delta C] x(t) + \Delta B u(t) \quad (4.89)$$

$$e_y(t) = C \tilde{e}(t) + \Delta C x(t) \quad (4.90)$$

Vemos que el análisis no es directo como en el caso de fallas aditivas, el error en los estados y las salidas dependen de los cambios en los parámetros multiplicados por la señal de entrada $u(t)$ y las variables de estado $x(t)$.

4.5.2. Aislación de fallas con observadores de estado.

Como vimos anteriormente, si utilizamos el error de salida $r(t) = e_y(t)$ como *residuos primarios*, sus elementos se moverán de acuerdo a las fallas como observa ve en la Ec. (4.79). Para determinar fallas individuales tienen que ser generados *residuos aumentados*, como es en el caso de las ecuaciones de paridad anteriormente mencionadas.

Esto puede ser resuelto por medio de *filtros detectores de fallas* u *observadores dedicados* mayormente en la forma de *banco de observadores*. Estos tipos de aproximación requieren múltiples salidas del proceso. A continuación se muestran ambos tipos de observadores.

4.5.3. Filtro de detección de fallas - FDF

El filtro de detección de fallas (FDF) u observadores sensibles a fallas, es un estimador de orden completo donde se elige de manera *especial* la matriz K_e . Fue el primer generador de residuos basados en observadores propuesto por Beard y Jones en los principios de los 70's ([2] y [28]), y a menudo se lo denomina filtro de Beard-Jones (BJFDF - *Beard and Jones Fault Detection Filter*).

El corazón del FDF es un observador de orden completo dado por la Ec. (A.17), donde el residuo es simplemente definido como,

$$r = e_y(t) = y - \tilde{y} = y - C\tilde{x} \quad (4.91)$$

o de la Ec. (A.19) podemos escribir que,

$$r = Ce \quad (4.92)$$

La ventaja de este tipo de generadores de residuos es su forma constructiva simple, y que se desprende de la teoría de control moderna y está íntimamente relacionada con el diseño de observadores de estado. De hecho el diseño de un FDF, como dijimos anteriormente, *no es más que un observador de estado de orden completo pero con la adecuada selección de la matriz K_e* .

Para incrementar el grado de libertad en el diseño, podemos filtrar el error de estimación de las salidas ($y - \tilde{y}$), de la siguiente manera,

$$r(s) = W(y(s) - \tilde{y}(s)) \quad (4.93)$$

siendo W una matriz de post-filtrado diseñada para obtener las propiedades de aislación deseadas.

Una desventaja del esquema de FDF es que la implementación se debe hacer con un observador de orden completo, donde en la mayoría de los casos un observador de orden reducido puede otorgarnos el mismo desempeño. Este es uno de los motivos por el que se desarrollan los generadores de residuos del tipo de Luenberger o también denominados observados de diagnóstico (DO).

Diseño de Filtros Detectores de Fallas.

Existe cierto grado de libertad a la hora de diseñar la matriz de realimentación de estados del observador K_e . Lo que se hace habitualmente es ubicar los polos de la ecuación característica del observador,

$$\det[sI - (A - K_e C)] = (s - s_1)(s - s_2)\dots(s - s_m) = 0 \quad (4.94)$$

de manera tal que estén ubicados en el semiplano izquierdo del *plano-s*, para garantizar estabilidad y que sean más rápidos que los polos del proceso. Esto quiere decir que los mismos deberán estar a la izquierda con respecto a

los polos de la planta. Sin embargo, si la ganancia es muy grande, el ruido de entrada puede amplificarse demasiado, por lo que debe encontrarse un compromiso entre ambas opciones.

La elección de la matriz del observador K_e puede ser utilizada para otorgar a los residuos $r(t)$ una estructura apropiada para la aislación, como fue propuesto por *Beard* [2] y *Jones* [28], de manera de obtener observadores sensibles a las fallas.

Considere la ecuación de estado que incluye fallas en los actuadores:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Lf_i(t) \quad (4.95)$$

En el cual el vector de fallas en los actuadores $f_i(t)$ está conformado por cada falla $f_{li}(t)$ y para cada una de ellas es determinado un vector l_i que conforma la matriz L . Cada uno de los m vectores l_i que la conforman se consideran independientes. Con lo que podemos escribir la Ec. (4.95),

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + l_i f_{li} \quad (4.96)$$

Si asumimos que el sistema es completamente medible, de la ecuación de salida $y = Cx$ y entonces $\text{rank}(C) = m$ entonces, $x = C^{-1}y$, introduciendo esta última en la Ec. (4.96),

$$\dot{y}(t) = CAC^{-1}y(t) + CBu(t) + Cl_i f_{li} \quad (4.97)$$

y el observador dado por Ec. (A.16),

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + K_e e_y(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + K_e r(t) \quad (4.98)$$

utilizando la Ec. 4.5.3 puede escribirse entonces como,

$$\dot{\tilde{y}}(t) = CAC^{-1}\tilde{y}(t) + CBu(t) + CK_e r(t) \quad (4.99)$$

donde los estados fueron eliminados. Por lo tanto de $r = y - \tilde{y}$, con la Ec. (4.97) y Ec. (4.99), obtenemos

$$\dot{r}(t) = [CAC^{-1} - CK_e] r(t) + Cl_i f_{li}(t) \quad (4.100)$$

Para desacoplar residuos unos de los otros se introduce una *matriz diagonal con autovalores iguales λ rápidos*, tal que

$$[CAC^{-1} - CK_e] = \lambda I \quad (4.101)$$

La matriz K_e de realimentación del observador buscada se obtiene entonces de,

$$K_e = [A - \lambda I] C^{-1} \quad (4.102)$$

En el dominio frecuencial la Ec. (4.100) luce,

$$r(s) = [sI - \lambda I]^{-1} Cl_i f_{li} = Cl_i \frac{f_{li}}{s - \lambda} \quad (4.103)$$

Si los estados no son completamente medibles algunas transformaciones en el modelo pueden ser realizadas.

Diferencia entre un BJFDF y un observador de estado

Como recalcamos anteriormente, la diferencia entre un estimador de estado ordinario y un filtro de BJ radica en la elección de la matriz K_e , por lo que este punto nos preguntamos ¿Cuál es la diferencia entre estimador de estado ordinario y un filtro de BJ?, o dicho de otra manera, ¿Cómo debe ser la elección de K_e para que califique como filtro de BJ?. La elección de la matriz K_e la podemos explicar mediante la siguiente definición.

DEFINICIÓN 4.4 (Filtro de BJ). [45] Sea l_i la i -ésima columna de la matriz de fallas L en el sistema observable dado por Ec. (4.19) y Ec. (4.20). Luego K_e es un operador detector para l_i si

1. $\dim(CQ_f) = 1$, donde

$$Q_f = \text{span}(l_i, (A - K_e C)l_i, \dots, (A - K_e C)^{n-1}l_i)$$

2. K_e dispone los autovalores de $(A - K_e C)$ para cualquier conjunto autoconjugado arbitrario.

A menudo al vector l_i se la denomina *vector de eventos de fallas*.

Vimos en la Ec. (4.78) que el error de estimación es,

$$\dot{e}(t) = [A - K_e C] e(t) + Lf_u(t) - K_e M f_m(t) \quad (4.104)$$

Luego, la definición anterior sugiere que la caracterización de la falla en el BJFDF debe estar restringido a un subespacio unidimensional de las salida. Ha sido demostrado por Jones [28] que esta tarea puede ser lograda restringiendo el espacio controlable de $(A - K_e C, l_i)$ a un subespacio invariante de mínima dimensión. Subsecuentemente, el proceso de identificación de fallas se convierte en buscar la caracterización en la dirección de CQ_f .

Se puede demostrar que un operado K_e que satisface la Def. 4.4, siempre existe ([28], [44]). El procedimiento se detalla en el Anexo B.2.

4.5.4. Configuraciones de observadores simples

La configuración más simple que se usa para la detección de fallas en instrumentos es un estimador simple, donde un solo estimador de orden completo o reducido es impulsado por un solo sensor (el más fiable), y el vector de salida completo es reconstruido [13] (ver Fig. 4.14). La comparación entre la salida real y la salida estimada utilizando una lógica de umbral permite en principio una única detección y aislamiento, para un solo instrumento defectuoso.

Una mayor flexibilidad en el aislamiento de fallos en actuadores o sensores se puede lograr mediante el uso de una *combinación* de estimadores, es

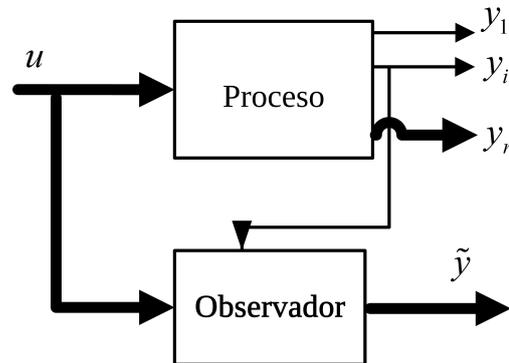


Figura 4.14: Observador con medición más fiable.

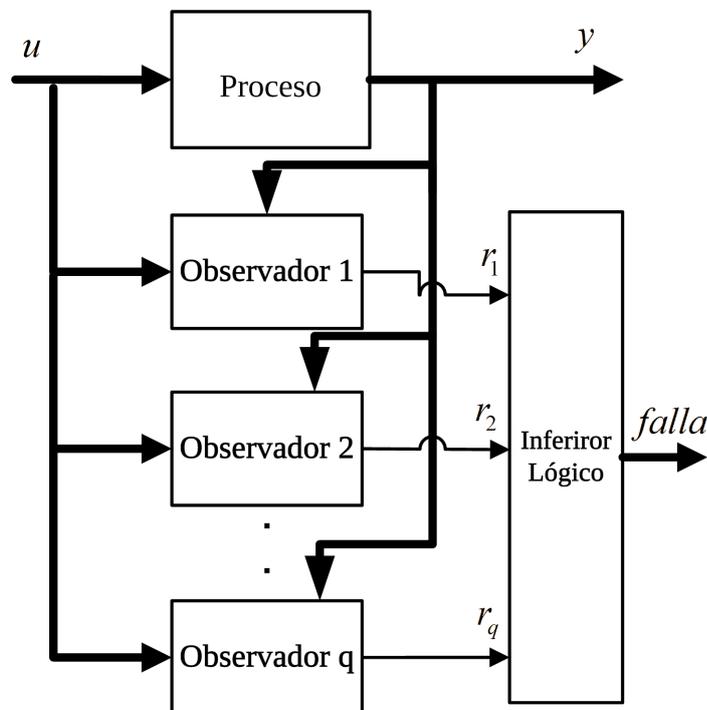


Figura 4.15: Banco de observadores e inferidor u observadores dedicados.

decir, un banco de estimadores impulsados por el vector real de salida y o subconjuntos de y (Fig. 4.15).

Un enfoque popular se basa en las pruebas de hipótesis múltiples : en este caso cada uno de los estimadores está diseñado para una hipótesis diferente de fallo. Ppor ejemplo, H_0 : no falla, H_1 : sesgo en sensor 1, H_2 : sesgo en el sensor 2, H_3 : la salida a cero en el sensor 1, etc. Las hipótesis se prueban en términos de funciones de verosimilitud, utilizando, por ejemplo, la teoría de la decisión bayesiana.

Sistemas con sensores duplex.

En lugar de utilizar redundancia analítica o por software únicamente, también se puede combinar la misma con el uso de redundancia de hardware. La manera práctica más común es utilizar un sistema de doble sensor o duplex (Fig. 4.16) en el que se utilizan dos juegos idénticos de instrumentos, cada conjunto está supervisado por un esquema de detector de falla en instrumento-IFD⁸ de uno de los tipos mencionados anteriormente.

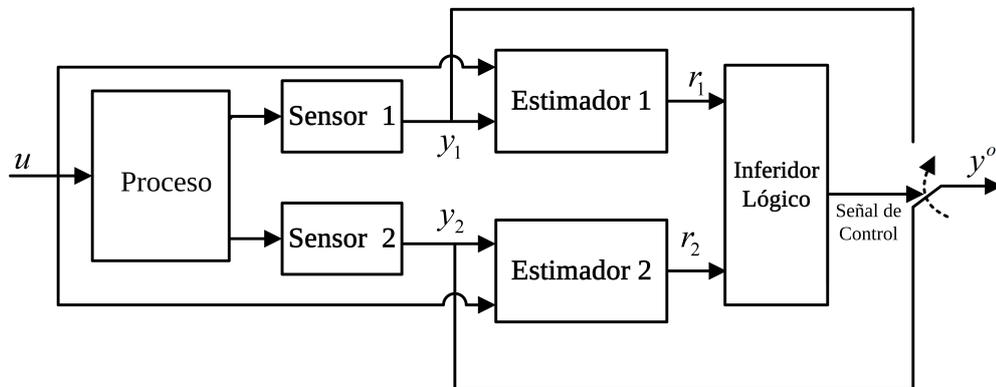


Figura 4.16: Redundancia de hardware junto a redundancia analítica.

Una vez que se ha producido un fallo en uno de los sensores, se detecta con la ayuda de los sistemas de observación y el sistema se conmuta entonces al sensor sano o que otorga la medición correcta.

La motivación del uso de dos sensores es con el objeto de detectar la ocurrencia de un fallo por redundancia de hardware, pero realiza la tarea de aislación por redundancia analítica. Esto aumenta la fiabilidad y permite que el algoritmo o tests de redundancia analítica sea quien dispare el cambio de sensor, pero no tenga que estimar el valor verdadero de la variable, sino que tome el valor del otro sensor. Este concepto es de suma importancia práctica en esquemas de IFD de sistemas críticos como los aviones.

4.5.5. Bancos de Observadores

Los bancos de observadores son observadores dedicados que se diseñan con diferentes entradas y salidas. Los observadores que no utilizan alguna de las entradas o las salidas, no demuestran cambios para estas entradas o salidas.

⁸Instrument Fault Detection

Observadores dedicados para fallas en instrumentos.

Para la detección de fallos en instrumentos se asigna un estimador dedicado a cada uno de los sensores. En el esquema de banco de observadores dedicado propuesto para IFD por Clark [12] cada estimador es impulsado por una sola salida diferente y la entrada completa (Fig. 4.18). Con este sistema, múltiples fallos simultáneos pueden ser detectados y aislados, con la ayuda de una lógica de umbral.

Por ejemplo, si un cierto sensor falla, entonces la estimación de salida calculada por el estimador correspondiente será errónea, y puede ser identificado por la lógica.

Si consideramos un sistema con fallas aditivas en los sensores,

$$y(t) = Cx(t) + Mf_m(t) \quad (4.105)$$

Puede considerarse el diseño cada elemento de un *banco de observadores*,

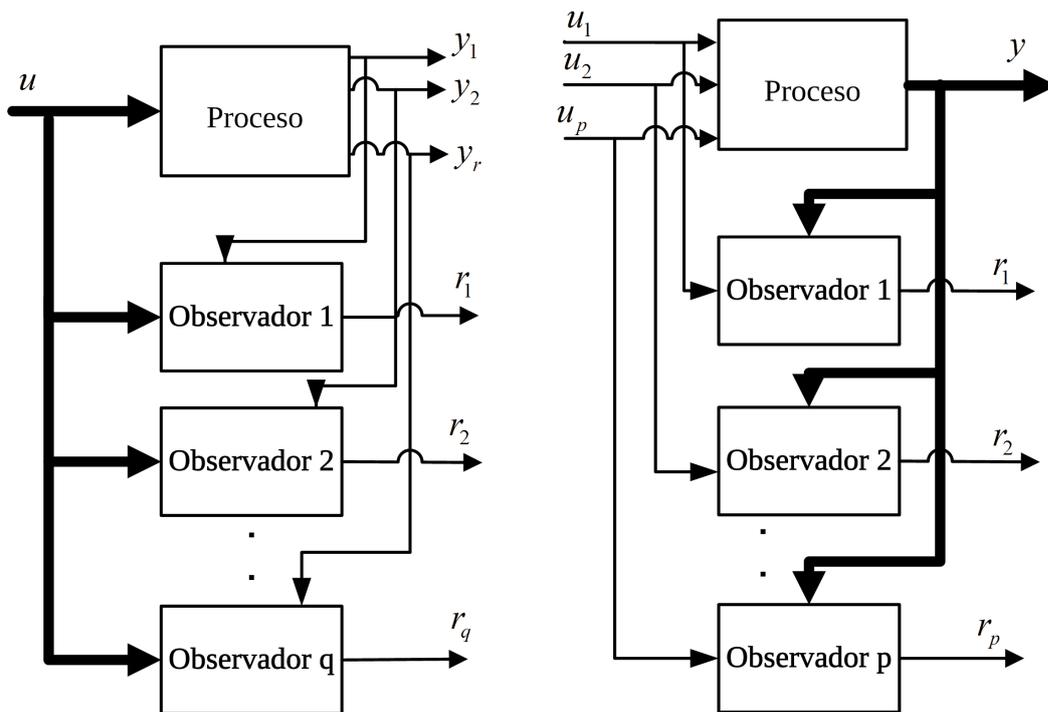


Figura 4.17: Banco de observadores u observadores dedicados. Para todas las entradas y una salida. Para una entrada y todas las salidas.

utilizando todas las entradas u pero únicamente una salida,

$$y_i(t) = c_i^T x + f m_i \quad (4.106)$$

y la ecuación del observador Ec. (A.17) luce como,

$$\dot{\tilde{x}}(t) = [A - K_{ei}c_i^T] \tilde{x}(t) + Bu(t) + K_{ei}y_i(t) \quad (4.107)$$

obteniendo un residuo como el error de salida,

$$r_i(t) = y_i - c_i^T \tilde{x} + f_{mi} \quad (4.108)$$

De esta manera únicamente el k -ésimo error de salida es afectado por la falla f_{mk} y todos los demás residuos $r_i, i = 1 \dots r, i \neq k$ deberán ser cero. Luego analizando el patrón de residuos las fallas aditivas en sensores pueden ser aisladas.

La otra posibilidad es usar para los observadores todas las salidas y pero únicamente una entrada u_i . Este esquema es diseñado para detectar fallas en las entradas f_{i_i} .

Esquema de observadores generalizados

El esquema anterior de bancos de observadores, puede ser expandido para todas las entradas y todas las salidas menos una entrada o una salida, para el cual los observadores son diseñados (Fig. 4.18). Este tipo de esquema se denomina *esquema de observador generalizado* (GOS⁹).

Este tipo de esquema establece que un estimador dedicado a un determinado sensor es calculada o estimada por todas las salidas excepto la del sensor correspondiente. De esta manera el FDD permite detectar y aislar sólo una única falla en cualquiera de los sensores, sin embargo, aumenta su robustez con respecto a las entradas desconocidos.

4.5.6. Observadores de Diagnóstico u Observador Funcional.

El *observador de diagnóstico* (DO¹⁰) es un observador de salidas con ciertas características en su diseño. Siguiendo la finalidad de detectar y aislar fallas, la estimación de los estados no resulta ser necesaria, sino que solo se necesita una estimación de las salida. Entonces un *observador de salidas*, o también llamado *observador funcional* es adecuado para FDD.

El núcleo de este *observador de diagnóstico* es el observador de Luenberger generalizado que viene dado por la siguiente dinámica,

$$\dot{z}(t) = Fz(t) + Ju(t) + Ky(t) \quad (4.109)$$

donde $z \in \mathfrak{R}^s$, s denota el orden del observador que puede ser de orden igual, mayor o menor que n el orden del sistema. La ecuación de salida de este observador, son los residuos,

$$r(t) = Wz(t) - Vy(t) \quad (4.110)$$

⁹ *Generalized Observer Scheme*

¹⁰ *Diagnostic Observer.*

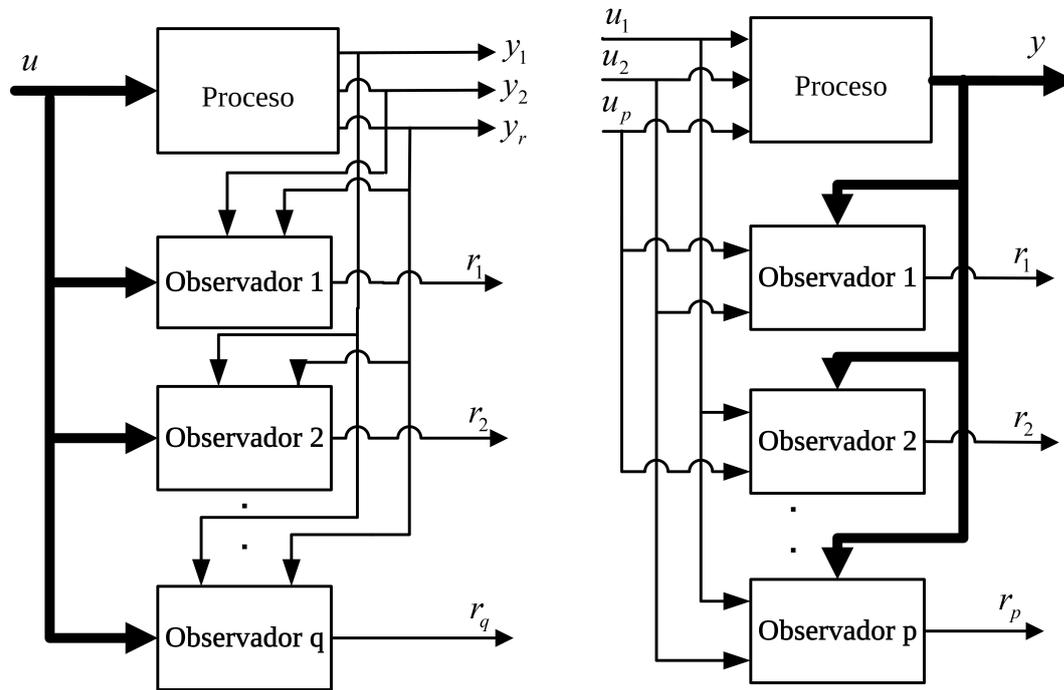


Figura 4.18: Banco de observadores u observadores dedicados. Para todas las entradas, y todas las salidas menos una. Para todas las entradas menos una, y todas las salidas.

y las siguientes condiciones tienen que satisfacerse,

$$F \quad \text{tenga autovalores negativos} \quad (4.111)$$

$$KC = TA - FT \quad (4.112)$$

$$J = TB - KD \quad (4.113)$$

$$WT + VC = 0 \quad (4.114)$$

Si se cumplen estas condiciones de diseño, la dinámica del error y los residuos valen:

$$\dot{e}(t) = Fe(t) - TLf(t) + KMf(t) \quad (4.115)$$

$$r(t) = We(t) - VMf(t) \quad (4.116)$$

y

$$e(t) = z(t) - Tx(t) \quad (4.117)$$

donde se puede ver que los residuos dependen únicamente de las fallas. La solución de las ecuaciones Ec. (4.114) otorga la solución al problema.

Notar que si $T = I$ se obtiene el generador de residuos basados en observador de orden completo, como se desarrolló en secciones anteriores.

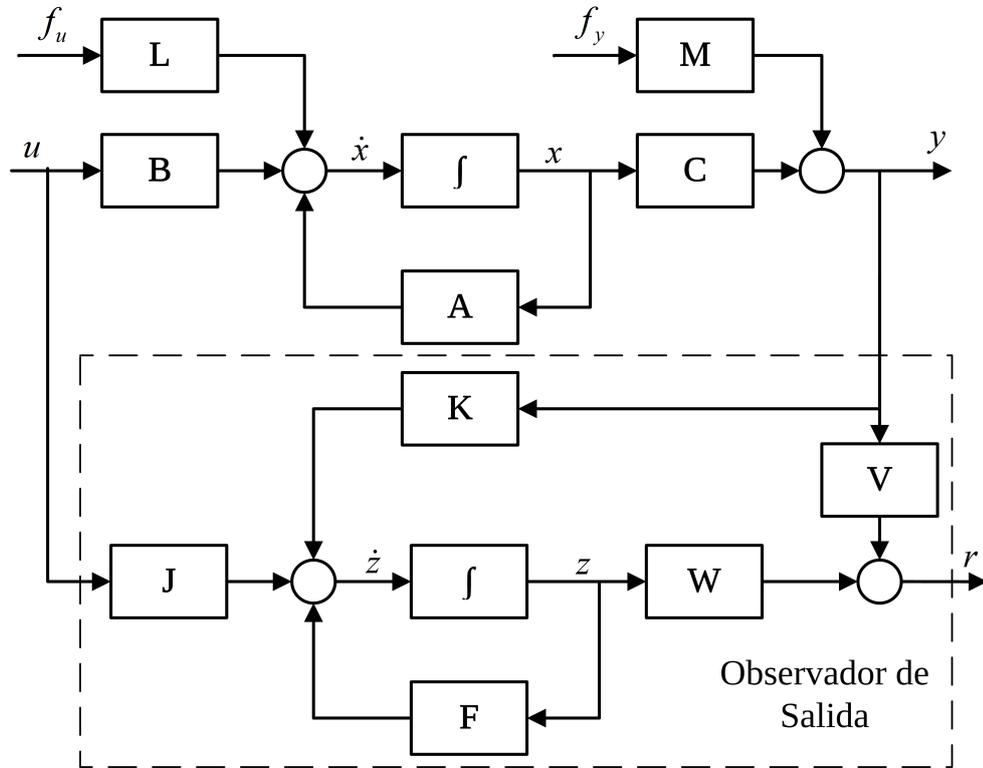


Figura 4.19: Proceso y Observador de Salida.

Para aislar las fallas, como anteriormente vimos para los FDF, un conjunto de residuos estructurales o residuos direccionales se diseñado usando esta aproximación.

Para fallas en los sensores, el diseño de un conjunto de residuos estructurales es directo. Si por ejemplo, el vector de salida $y = (y_1, \dots, y_m)$ es reemplazado por $(y_1, \dots, y_{i-1}, y_{i+1}, \dots, y_m)$, el residuo será insensible a la falla del i -ésimo sensor.

El diseño de residuos estructurales para aislar fallas en los actuadores no es director, pero puede resolverse por medio de *observadores de entradas desconocida* (UIO *unknown input observer*)

En comparación con el esquema FDF, con este esquema de DO:

- se pueden generar residuos de menor orden, lo que es deseable para implementaciones on-line.
- tenemos mayor grados de libertad en el diseño.
- conlleva mayor diseño.

Remarca. contrariamente a las aproximaciones de diseño de observadores en la cual el objetivo es estimar variables que no pueden ser medidas, el

objetivo de los DO es reconstruir variables que pueden ser medidas.

4.5.7. Observadores de entrada desconocida

Consideremos el sistema LTI dado por la Ec. (2.10), considerando sólo las fallas aditivas en actuadores, representado por

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F_u f_u(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\quad (4.118)$$

donde A, B, C, F_u son matrices constantes de dimensiones apropiadas. Asumimos que $m \geq q$, y sin perder generalidad $\text{rank}(F_u) = q$ y $\text{rank}(C) = m$. A continuación se presenta un procedimiento uniforme para diseñar un observador de orden $(n - m)$ y orden $(n - q)$ para sistemas con entrada desconocida. El procedimiento es el aportado por Hou and Müller [22]. Bajo la suposición que el $\text{rank}(F_u) = q$, es posible elegir una matriz no singular T como,

$$T = [N F_u], \quad (4.119)$$

donde $N \in \mathfrak{R}^{n \times (n-q)}$, el sistema descrito por Ec. (4.119) es equivalente al sistemas

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}}(t) &= \bar{A}x(t) + \bar{B}u(t) + \bar{L}f_u(t) \\ y(t) &= \bar{C}x(t)\end{aligned}\quad (4.120)$$

donde,

$$x = T\bar{x} = T \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} \quad (4.121)$$

$$\bar{A} = T^{-1}AT = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix} \quad (4.122)$$

$$\bar{B} = T^{-1}B = \begin{bmatrix} \bar{B}_1 \\ \bar{B}_2 \end{bmatrix} \quad (4.123)$$

$$\bar{F}_u = T^{-1}F_u = T \begin{bmatrix} 0 \\ I_q \end{bmatrix} \quad (4.124)$$

$$\bar{C} = CT = [CN CL] \quad (4.125)$$

con $\bar{x}_1 \in \mathfrak{R}^{n-q}$ y $\bar{x}_2 \in \mathfrak{R}^q$.

Dado que en la Ec. (4.120) la ecuación diferencial correspondiente con el sub-vector \bar{x}_2 es directamente con la entrada desconocida d , simplemente descartamos esa parte de Ec. (4.120), y luego se obtiene un sistema libre de entrada desconocida como,

$$[I_{n-q} \ 0] \dot{\bar{x}} = [\bar{A}_{11} \ \bar{A}_{12}] \bar{x} + \bar{B}_1 u \quad (4.126)$$

$$y = CT = [CN \ CL] \bar{x} \quad (4.127)$$

el cual es una manera especial de describir el sistema. Si ahora asumimos que \bar{x}_2 puede ser obtenido desde y , Ec. (4.126) puede ser transformado en un sistema lineal convencional. De hecho, si la matriz CF_u tiene rango columna completo, existe una matriz no-singular

$$U = [CF_u \ Q] \quad (4.128)$$

Si denotamos con,

$$U^{-1} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4.129)$$

con $U_1 \in \mathfrak{R}^{q \times m}$ y $U_2 \in \mathfrak{R}^{(m-q) \times q}$ y pre-multiplicando ambos lados de Ec. (4.127) por U^{-1} , tenemos

$$U_1 y = U_1 CNT \bar{x}_1 + \bar{x}_2 x \quad (4.130)$$

$$U_2 y = U_2 CNT \bar{x}_1 \quad (4.131)$$

y sustituyendo Ec. (4.130) en Ec. (4.126) y combinando con la última ecuación Ec. (4.131) tenemos,

$$\dot{\bar{x}}_1(t) = \bar{A}_1 \bar{x}_1 + \bar{B} u(t) + \bar{E}_1 y \quad (4.132)$$

$$\bar{y} = \bar{C} \bar{x}_1 \quad (4.133)$$

donde

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 &= \bar{A}_{11} - \bar{A}_{12} U_1 CN & E_1 &= \bar{A}_{12} U_1 \\ \bar{C}_1 &= U_2 CN & \bar{y} &= U_2 y \end{aligned} \quad (4.134)$$

Donde se puede verificar que el $rank(\bar{C}_1) = m - q$. En este punto el par \bar{A}_1, \bar{C}_1 es observable, y siguiendo el procedimiento de diseño de un observador de Luengeber, uno puede diseñar un observador de orden reducido, para el sistema libre de entradas desconocidas dado por Ec. (4.132), como:

$$\dot{w}(t) = [\bar{A}_1 - K_e \bar{C}_1] w(t) + \bar{B}_1 u(t) - K_e^* y(t), \quad w \in \mathfrak{R}^{(n-q)} \quad (4.135)$$

donde $K_e \in \mathfrak{R}^{(n-1) \times (m-q)}$ y $K_e^* = K_e * U_2 + E_1$ y $w \rightarrow \hat{\bar{x}}_1$ cuando $t \rightarrow \infty$, y

$$\hat{x} = T \hat{\bar{x}} = T \begin{bmatrix} w \\ U_1 y - U_1 CN w \end{bmatrix} \quad (4.136)$$

donde $\hat{x} \rightarrow x$, cuando $t \rightarrow \infty$

Y se puede estimar la entrada desconocida f_u o perturbación d como,

$$\hat{f}_u = U_1 \dot{y} + G_e w + G_4 y + G_5 u \quad (4.137)$$

donde

$$\begin{aligned} G_3 &= U_1 CN K_e U_2 CN + U_1 CN \bar{A}_{12} U_1 CN - U_1 CN \bar{A}_{11} - \bar{A}_{21} + \bar{A}_{22} U_1 CN \\ G_4 &= -U_1 CN K_e U_2 - U_1 CN \bar{A}_{12} U_1 - \bar{A}_{22} U_1 \\ G_5 &= -U_1 CN \bar{B}_1 - \bar{B}_2 \end{aligned} \quad (4.138)$$

4.5.8. Diseño de residuos robustos mediante observadores de entrada desconocida

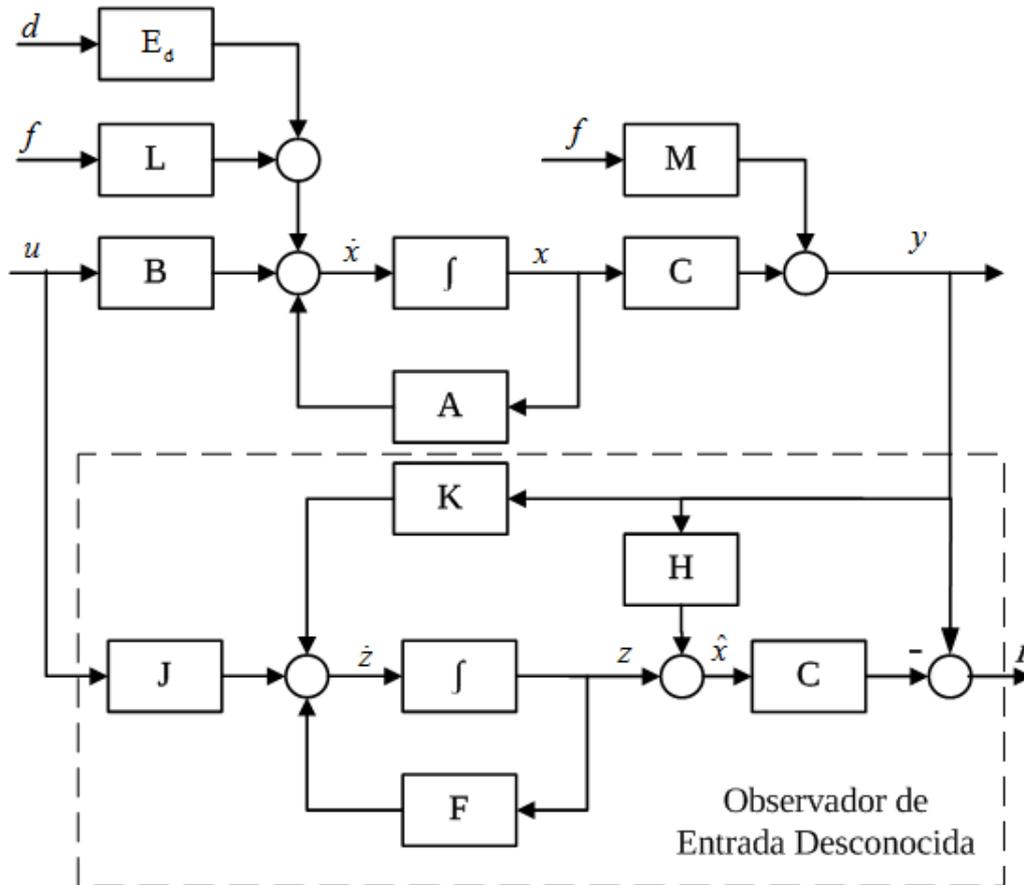


Figura 4.20: Proceso y Observador de Entrada Desconocida.

Para lograr un FDD robusto, los residuos de diagnósticos deben ser diseñados para que sean independientes de las incertidumbre del sistema. Consideremos ahora el sistema con fallas definido por el sistema de Ec. (2.10), al que le agregamos ahora un vector de perturbaciones $d(t)$ que ingresa a nuestro sistema a través de una matriz E_d , de manera tal que el mismo queda representado de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Lf(t) + E_d d(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Mf(t)\end{aligned}\quad (4.139)$$

Una manera de lograr un perfecto desacople para lograr un FDD robusto es utilizar observadores de entrada desconocida (UIO - del inglés Unknown Input Observer). La idea principal es la de forzar el error de estimación de estados, y consecuentemente los residuos, para que sean desacoplados de

las perturbaciones. Por otro lado, con este tipo de observadores es posible estimar la magnitud de la falla. Un UIO de orden completo es descrito por:

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Fz(t) + TBu(t) + Ky(t) \\ \hat{x}(t) &= z(t) + Hy(t)\end{aligned}\quad (4.140)$$

donde $\hat{x} \in \mathfrak{R}^n$ es la estimación del vector de estado y $z \in \mathfrak{R}^n$ es el estado de este observador de orden completo, y la matrices F, T, K, H son matrices que deben diseñarse, para alcanzarse los requerimientos de desacople. El residuo es definido como,

$$r(t) = y(t) - C\hat{x}(t) = (I - CH)y(t) - Cz(t) \quad (4.141)$$

Se llega al diseño de este observador de entrada desconocida, si podemos resolver las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}(HC - I)E_d &= 0 \\ T &= I - HC \\ F &= A - HCA - K_1C \\ K_2 &= FH \\ K &= K_1 + K_2\end{aligned}\quad (4.142)$$

$$(4.143)$$

El error de estimación $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ y los residuos valen:

$$\begin{aligned}\dot{e}(t) &= Fe(t) + TBLf(t) - K_1Mf(t) - HM\dot{f}(t) \\ r(t) &= Ce(t) + Mf(t)\end{aligned}\quad (4.144)$$

Si los autovalores de F son estables (debe ser así para obtener un diseño satisfactorio), $e(t)$ se aproximará asintóticamente a cero si no hay fallas en el sistema, es decir los residuos serán robustos contra las perturbaciones $d(t)$.

El observador definido por la Ec. (4.140) es un observador de orden reducido para el sistema dado por Ec. (4.139) si se cumplen las siguiente condiciones necesarias y suficientes:

1. $rank(CE_d) = rank(E_d)$
2. el par (C, A_1) es detectable, donde

$$A_1 = A - E_d((CE_d)^T CE_d)^{-1}(CE_d)^{-1}CA \quad (4.145)$$

Si estas condiciones se cumplen un UIO nos da un estimador de estado, usado para generar un vector de residuos $r(t)$ independiente de $d(t)$. De la condición 1, uno debe notar que el número de filas independientes de C no

debe ser menos que el número de columnas independientes de E_d , esto es el máximo número de perturbaciones que pueden ser desacopladas no puede ser mayor que el número de mediciones independientes del sistema.

Notar que el observador planteado por la Ec. (4.140) se convierte en un simple observador de orden completo si $T = I$ y $H = 0$, cuando no existen perturbaciones en el sistema $E_d = 0$. En estas circunstancias la condición 1. del teorema se mantiene y la condición 2. pasa a ser que el sistemas (C,A) sea detectable.

4.6. Ejemplo: reactor tanque agitado CSTR

4.6.1. Introducción al problema del reactor CSTR

Los reactores tanques continuos agitados (CSTR¹¹) son una de las operaciones unitarias más usadas en la industria química. La versatilidad de su operación permite la posibilidad de ser operados en condiciones isotérmicas, aun cuando el calor de reacción sea alto. Esta característica es aprovechada cuando se desea que el reactor opere dentro intervalos pequeños de temperatura evitando la posibilidad de reacciones secundarias (que podrían degradar al producto), o velocidades de reacción desfavorables.

Los CSTR usualmente son recipientes con un gran volumen, lo que proporciona un tiempo de residencia largo permitiendo el avance de la reacción química gracias a su alto tiempo de residencia. Esto da como resultado que el reactor opere con dinámica lenta. Además, cuando se tiene reacciones altamente exotérmicas y con altas velocidades de reacción, se suele ajustar (en la etapa de diseño) el caudal de alimentación y el volumen del reactor a fin de eliminar el calor necesario para que la masa reaccionante se mantenga dentro los valores de temperatura permitidos. Por tal motivo, perturbaciones en la temperatura de reacción puede afectar considerablemente la concentración final de producto como la seguridad del proceso en sí.

Para terminar de complicar aún más las cosas, los CSTR exotérmicos tienen múltiples puntos de equilibrio debido a sus fuertes no linealidades, y como se muestra en la bibliografía clásica, uno de ellos puede ser inestable.

Las características de no linealidad que presenta el reactor químico así como, la interacción entre sus variables de entrada y salida, y su lenta dinámica, hacen que las etapas de selección de posibles sistemas de control y sintonización de controladores sean críticas al momento de pretender una buena performance de las variables de control [1].

Debido a la importancia de estas unidades de proceso y a lo costoso que implica su estudio a partir de plantas piloto, el presente artículo se enfoca la detección y asilación de fallas para un CSTR exotérmico, a partir de un

¹¹ *Continuous Stirred Tank Reactor*

modelo matemático presentado por Luyben [38] y cuyos parámetros fueron adoptados según el trabajo de Morningred *et al.* [49], mediante simulación por computadora.

4.6.2. Planteo del problema del reactor CSTR

Considere el CSTR de la Fig. 4.21 donde se produce una reacción química exotérmica irreversible, $A \rightarrow B$. En el cual realizaron las siguientes consideraciones.

- No se modela el tiempo muerto (retardo).
- Reactante y producto se encuentran en fase líquida.
- La densidad y capacidad calórica de la mezcla permanecen constantes, así como otras propiedades termodinámicas de reactante y producto.
- La transferencia de calor del tanque de reacción a la chaqueta es ideal, lo que indica que los efectos energéticos que ocurren entre la pared del tanque y de la chaqueta se suponen despreciables.
- El volumen de la mezcla varía proporcionalmente con el nivel de la misma.
- El volumen de la chaqueta es constante durante la fase de enfriamiento.

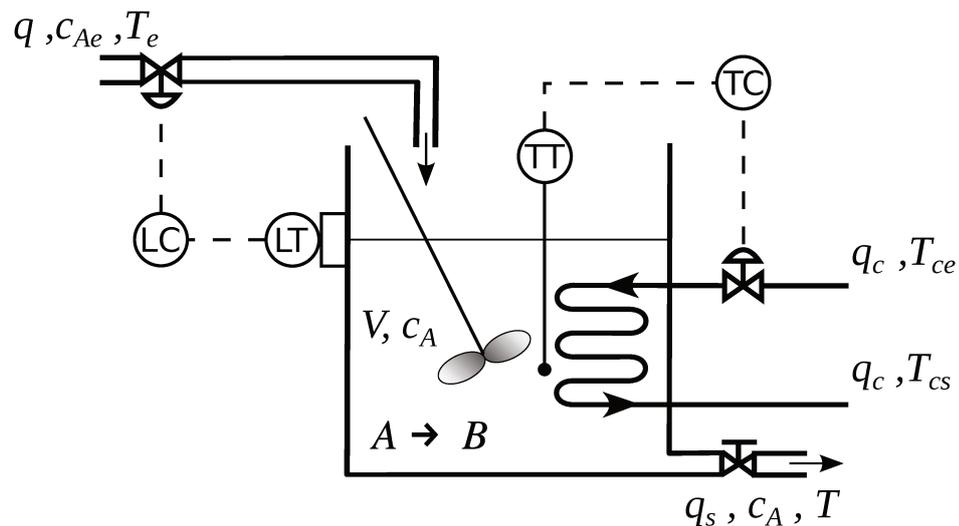


Figura 4.21: Diagrama ilustrativo del CSTR y el sistema de control implementado.

Esta reacción tiene lugar en un tanque cilíndrico agitado con una capacidad total de $V_{\text{máx}} = 120[\text{l}]$. El tanque es cilíndrico con una sección de

$A = 0,2[\text{m}^2]$. El reactante entra al sistema con un caudal $q(t)$ a una temperatura $T_e = 350[\text{°K}]$ y una concentración $C_{Ae} = 1[\text{mol/l}]$. El reactor tiene un volumen instantáneo $V(t)$, a la temperatura $T(t)$ y la concentración $C_A(t)$. En la Tabla 4.3 se presentan las constantes físico-químicas y termodinámicas relativas a este reactor que completan el modelo no lineal de acuerdo con las siguientes ecuaciones diferenciales no lineales:

$$\begin{aligned}\frac{dV(t)C_A(t)}{dt} &= q(t)C_{Ae} - q_s C_A(t) - C_A(t)e^{-\frac{E}{RT(t)}}V(t) \\ \frac{dV(t)T(t)}{dt} &= q(t)T_e - q_s(t)T(t) - V(t)k_1 C_A(t)e^{-\frac{E}{RT(t)}} + \\ &\quad k_2 q_c(t) \left(1 - e^{-\frac{E}{RT(t)}}\right) (T_{ce} - T(t)) \\ \frac{dV(t)}{dt} &= q(t) - k_4 \sqrt{V(t)}\end{aligned}\quad (4.146)$$

Tomando la derivadas de los primeros dos términos,

$$\begin{aligned}\frac{dV(t)C_A(t)}{dt} &= \dot{V}(t)C_A(t) + V(t)\dot{C}_A(t) \\ \frac{dV(t)T(t)}{dt} &= \dot{V}(t)T(t) + V(t)\dot{T}(t)\end{aligned}\quad (4.147)$$

Con lo que se llega a:

$$\begin{aligned}\frac{dC_A(t)}{dt} &= \frac{q(t)}{V(t)} (C_{Ae} - C_A(t)) - k_0 C_A(t)e^{-\frac{E}{RT(t)}} \\ \frac{dT(t)}{dt} &= \frac{q(t)}{V(t)} (T_e - T(t)) - k_1 C_A(t)e^{-\frac{E}{RT(t)}} + \\ &\quad + k_2 \frac{q_c(t)}{V(t)} \left(1 - e^{-\frac{E}{RT(t)}}\right) (T_{ce} - T(t)) \\ \frac{dV(t)}{dt} &= q(t) - k_4 \sqrt{V(t)}\end{aligned}\quad (4.148)$$

donde las constantes,

$$k_1 = \frac{\Delta H k_0}{\rho C_p}, \quad k_2 = \frac{\rho C_{pc}}{\rho_c C_p}, \quad k_3 = \frac{h_a}{\rho_c C_{pc}}\quad (4.149)$$

y

$$q_s = q(t) - k_4 \sqrt{V(t)}\quad (4.150)$$

Linealizando en series de Taylor en torno a un punto de operación $C_A^*, T^* V^*$,

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{q^*}{V^*} - k_0 e^{-\frac{E}{RT^*}} & A_{12} & -\frac{q^*}{V^{*2}} (C_{Ae} - C_A^*) \\ k_1 e^{-\frac{E}{RT^*}} & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & -\frac{k_4}{2\sqrt{V^*}} \end{pmatrix}\quad (4.151)$$

donde

$$A_{12} = -k_0 C a^* \frac{E}{RT^{*2}} e^{-\frac{E}{RT^*}}$$

$$A_{22} = -\frac{q^*}{V^*} + k_1 C a^* \frac{E}{RT^{*2}} e^{-\frac{E}{RT^*}} - k_2 \frac{q_c^*}{V^*} \left(1 - e^{-\frac{k_3}{q_c^*}}\right)$$

$$A_{23} = -\frac{q^*}{V^{*2}} (T_e - T^*) - k_2 \frac{q_c^*}{V^*} \left(1 - e^{-\frac{k_3}{q_c^*}}\right) (T_{ce} - T^*)$$

Tabla 4.3: Parámetros del Reactor

Parám.	Descripción	Valor
k_0	Cte. de vel. de reacción	$7,2 \cdot 10^{10} \left[\frac{1}{\text{min}}\right]$
h_a	Coef. de transf. de calor	$7 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{cal}}{\text{minK}}\right]$
E/R	Energía de activación	$1 \cdot 10^4 [^\circ\text{K}]$
T_e	Temp. de ent. del reactante	$350 [^\circ\text{K}]$
T_{Ce}	Temp. del líq. refrigerante	$350 [^\circ\text{K}]$
ΔH	Calor de reacción	$-2 \cdot 10^5 \left[\frac{\text{cal}}{\text{mol}}\right]$
C_p, C_{pc}	Calores específicos	$1 \cdot 10^4 \left[\frac{\text{cal}}{\text{g}^\circ\text{K}}\right]$
ρ, ρ_c	Densidad de los líquidos	$1 \cdot 10^3 \left[\frac{\text{g}}{\text{l}}\right]$
k_4	Cte. de la válvula	$10 \left[\frac{\text{l}}{\text{minm}^{3/2}}\right]$
C_{Ae}	Conc. de A a la entrada	$1 \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right]$

Reemplazando con los valores de la Tabla 4.3 y tomando como punto de operación el dado por, $C_A^* = 0,1 \left[\frac{\text{mol}}{\text{l}}\right]$, $T^* = 438,54 [^\circ\text{K}]$, $V^* = 100 [\text{l}]$, $q^* = 100 [\text{l}/\text{min}]$ y $q_c^* = 103,371 [\text{l}/\text{min}]$, obtenemos:

$$A = \begin{pmatrix} -9,9792 & -0,0467 & -0,0090 \\ 1795,8 & 7,3071 & 1,7988 \\ 0 & 0 & -0,5 \end{pmatrix} \quad (4.152)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0,0090 & 0 \\ -0,8850 & -0,8771 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.153)$$

Finalmente, el sistema se encuentra a lazo cerrado con dos controladores PI, las variables a controlar son la temperatura T y el volumen V , que se controlarán con el caudal de refrigeración q_c y el caudal de entrada al reactor q respectivamente de acuerdo con la Fig. 4.21, con lo que el apareamiento de variables es $q - V$ y $q_c - T$.

4.6.3. Diseño y cálculos

Para este ejemplo se desarrolló dos banco de observadores [60]. Tres DO para diagnosticar fallas en los sensores de volumen V , temperatura T y C_A y otros dos UIO para diagnosticar fallas en los caudales de entrada q y q_c .

Desde el punto de vista del FDD, el resultado de los cinco residuos serán de nuestro interés, pero pensando en un sistema a lazo cerrado el resultado estará enfocado hacia los errores en el sensado de las variables que cierran el lazo de control, ya que un error en las mismas conllevan a un mal desempeño del sistema situándolo en puntos de operación no deseados. En cambio, cuando la falla se produce en los actuadores, es el propio lazo de control el que atenúa los cambios, siempre que las válvulas de control no se saturen, dejando el sistema a lazo abierto.

Diseño de observadores generalizados.

Primeramente se realizó un diseño de observadores generalizados, donde se diseñaron 3 observadores de orden completo, eligiendo todas las salidas menos una para cada observador. El observador 1, que otorga el residuo 1 (r_1) se tomaron las salidas de concentración (C_a) y temperatura (T), desestimando el volumen (V); para el r_2 se tomo el par $C_a - V$ desestimando T , y por último, para r_3 se tomó el par de salidas $T - V$ desestimando C_A .

Las ganancias de los observadores (Ke_i), donde cada Ke_i representa la ganancia del observador i -ésimo, de acuerdo a los pares de variables de salida agrupadas como se indico anteriormente, toman los valores de:

$$Ke_1 = \begin{pmatrix} -8,9484 & -0,0495 \\ 179,97 & 8,925 \\ 0,0299 & 0,1678 \end{pmatrix} \quad (4.154)$$

$$Ke_2 = \begin{pmatrix} 212,3266 & -0,0090 \\ -27987 & 1,79 \\ 0 & 99,50 \end{pmatrix} \quad (4.155)$$

$$Ke_3 = \begin{pmatrix} -0,0025 & -0,0090 \\ -0,5234 & 1,7900 \\ 0 & 0,5000 \end{pmatrix} \quad (4.156)$$

Note que las dimensiones de las matrices de las ganancias son de 2×3 , ya que son 2 las salidas del sistema y 3 las variables de estado del mismo.

La matriz de incidencia de los residuos, por medio de la cual se realizará la aislación de falla es la que se muestra en la Tabla. (4.4).

	$r_1(1)$	$r_1(2)$	$r_1(3)$	$r_2(1)$	$r_2(2)$	$r_2(3)$	$r_3(1)$	$r_3(2)$	$r_3(3)$
$\pm f_{C_A}$	0	\mp	\pm	0	\pm	0	\mp	0	0
$\pm f_T$	\pm	\mp	\pm	0	\pm	0	\pm	\mp	0
$\pm f_V$	0	0	\mp	0	\pm	0	0	\pm	\mp

Tabla 4.4: Signos de los residuos para diferentes tipos de fallas aditivas en el CSTR con observadores generalizados.

Diseño de DO

De acuerdo a lo expresado en la Sec. 2.2, se obtuvieron las siguientes matrices:

$$J_1 = (0,1517 \ 0,1414) \quad F_1 = (-300) \quad (4.157)$$

$$K_1 = (-49,5715 \ -0,2975)$$

$$J_2 = (38,9958 \ -0,8775) \quad F_2 = (-200) \quad (4.158)$$

$$K_2 = (8,4374 \ -0,0004)$$

$$J_3 = (050,2176 \ 48,7760) \quad F_3 = (-100) \quad (4.159)$$

$$K_3 = (-1,0005 \ -0,0041)$$

donde el subíndice indica el parámetro correspondiente a cada DO. Para interpretar y aislar las fallas en el banco de DO utilizamos generamos patrones de aislación. Para estos residuos en particular es aplicado un patrón como se muestra en la Tabla 4.5.

	r_1	r_2	r_3
$\pm f_{CA}$	0	\pm	\pm
$\pm f_T$	\pm	0	\pm
$\pm f_V$	\pm	\pm	0

Tabla 4.5: Signos de los residuos para diferentes tipos de fallas aditivas en el CSTR con DO.

Diseño del UIO

Por otro lado siguiendo la Sec. 2.3, se obtuvieron las siguientes matrices:

$$L_1 = \begin{pmatrix} 0,009 \\ -0,8854 \\ 1 \end{pmatrix} \quad L_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ -0,8775 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$N_1 = N_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.160)$$

$$K_{e1} = \begin{pmatrix} 0,0409 \\ 9,7011 \end{pmatrix} \quad K_{e2} = \begin{pmatrix} 0,0385 \\ 8,7476 \end{pmatrix}$$

4.6.4. Simulación Numérica

La bondad de la FDD por medio de bancos de observadores dedicados antes fallas aditivas se aprecian en las siguientes simulaciones numéricas.

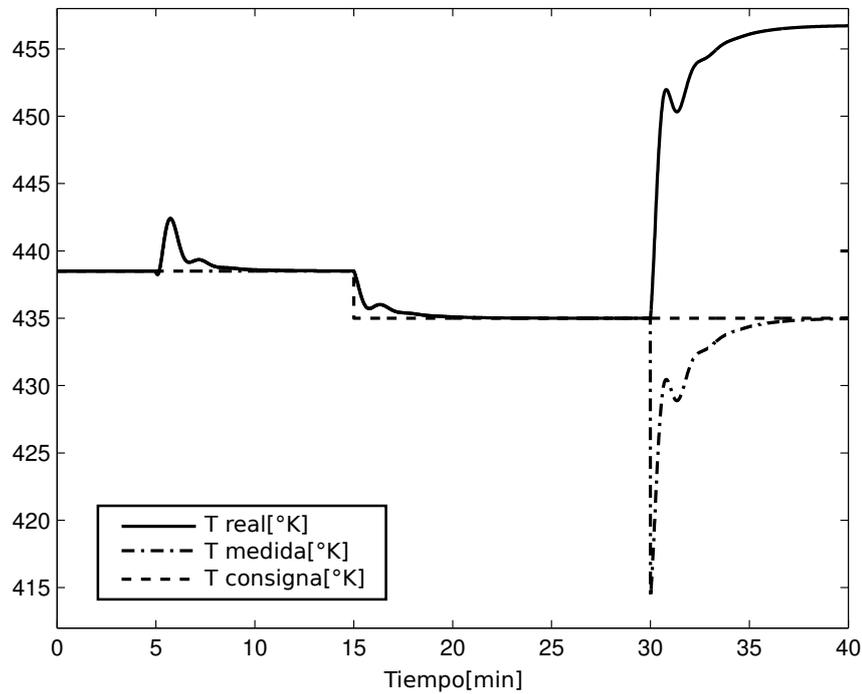


Figura 4.22: Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5$ [min] y T en $t = 15$ [min] y degradación de 5% at $t = 30$ [min].

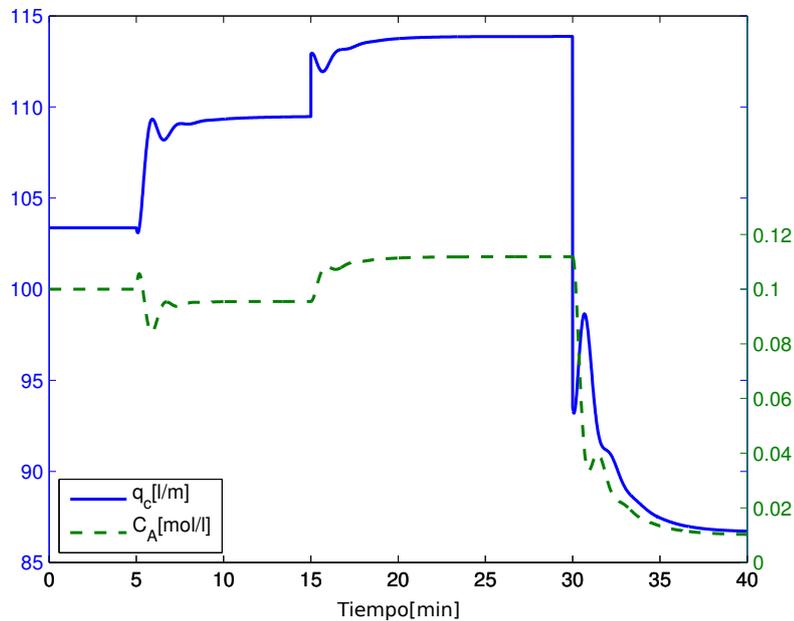


Figura 4.23: Caudal refrigerante manipulado y concentración.

Falla en sensor de temperatura

Para esta situación se realiza primeramente cambios en consigna entorno al punto de operación, mostrando que los controladores PI propuestos per-

miten seguir los cambios en consigna. Particularmente, los cambios propuestos son, en el volumen a $V = 110[l]$ en $t = 5[\text{min}]$ y en la temperatura a $T = 435[^\circ\text{K}]$ en $t = 15[\text{min}]$.

En la Fig. 4.22 se muestra lo que ocurre en el sistema ante una degradación en la lectura del sensor de temperatura del -5% en $t = 30[\text{min}]$. Se observa que el lazo de control reduce el caudal de refrigerante q_c para ajustar a la temperatura del reactor al valor consigna de acuerdo con un erróneo valor medido, asumiendo que el reactor necesita acumular más calor. Sin embargo, la temperatura real del reactor obtenida a través de los residuos indica que la misma es mucho mayor al final del transitorio. Este ajuste *innecesario* por parte del controlador ante un error en el sensado conlleva a que se reduzca el q_c , aumentando la T y consecuentemente arrastrando dicho cambio a la concentración C_A , como se muestra en la Fig. 4.23.

En la Fig. 4.24 se pueden observar como se comportan los residuos ante una falla en el sensor de temperatura, que contrastando con la Tabla 4.4 se infiere que ha acontecido una falla en el sensor de temperatura.

Falla en sensor de volumen

En esta simulación se muestra al igual que en el ejemplo anterior un cambio en consigna en $t = 5[\text{min}]$ desde $V = 100[l]$ a $V = 110[l]$, y luego se simula una degradación en la lectura del sensor de volumen de -5% en $t = 35[\text{min}]$.

En la Fig. 4.25 se muestra lo que ocurre en el sistema ante la falla en el mismo. La realimentación proveniente del sensor de volumen (usualmente es un sensor de nivel) falla abruptamente en un 5% , y el lazo de control corrige ese error identificado, haciendo que el nivel se mantenga en los $110[l]$ como lo indica el set-point. Pero al igual que en el caso anterior, la variable real del proceso se ubica cercano a los $116[l]$, regulando a un valor equivocada.

La detección de fallas se puede inferir de los residuos Fig. 4.27 junto con la Tabla 4.4.

En la Fig. 4.26 se aprecia como el lazo en temperatura no muestra cambios luego de un transitorio cuando se produce la falla en el sensor de volumen.

Falla en caudal refrigerante manipulado

En la Fig. 4.28 se presenta una degradación en el caudal refrigerante manipulado q_c de -10% en $t = 20[\text{min}]$. Se observa como el lazo de control recupera la consigna en temperatura, dado que la temperatura del reactor es leída correctamente y consecuentemente el controlador mueve q_c hasta recuperar la temperatura de setpoint. En la Fig. 6.5 y Fig. 6.6 se aprecia como los residuos del banco UIO, detectan y permiten diagnosticar la falla mencionada. En la Fig. 6.6 se aprecia como se estima correctamente la falla en q_c .

(f_{qc}) , de acuerdo a la Ec. (4.137), y que es expresada como desviación del caudal de estado estacionario.

4.7. Comentarios finales sobre observadores y ecuaciones de paridad

En la literatura, los generadores de residuos basados en las relaciones de paridad, a menudo se denominan estructuras de lazo abierto, mientras que los generadores basados en observador son llamados estructura a lazo cerrado. Esta manera de adjetivar estos generadores puede traer confusión, por que estos conceptos utilizados generalmente en el ámbito de la teoría de control, caracterizan dinámicas de sistemas que se comportan de diferentes manera.

Las ecuaciones de paridad y los generadores basados en observador poseen la misma dinámica, o lo que es más importante: la elección de un vector en el espacio de paridad es equivalente con la selección de una matriz del observador. En otras palabras, todas las aproximaciones de diseño utilizando las relaciones de paridad pueden ser implementadas como generador de residuos basados en observadores y viceversa.

La diferencia se encuentra en la forma en que se implementan ambos métodos: la implementación de los generadores de residuos basados en espacio de paridad utilizan una forma no-recursiva, mientras que los basados en observadores usan una forma recursiva.

Esto indica que la manera en que se diseña un generador de residuos es independiente de como se implementa el mismo. Se puede utilizar la aproximación de espacio de paridad para el diseño y luego transformar los parámetros que se obtienen para obtener un observador diagnóstico finalmente realizar el DO para una implementación online.

La decisión de que forma se diseña y de que forma se implementa deber ser realizada teniendo en cuenta,

- los requisitos relativos a la aplicación on-line,
- cual enfoque puede ser fácilmente utilizado para diseñar un generador de residuos que cumpla con los requisitos de desempeño del sistema de FDD,
- y por supuesto, el conocimiento del diseñador y las herramientas de diseño disponibles.

Recordemos que el diseño de sistemas basados en espacio de paridad es caracterizado por su sencillo manejo matemático, únicamente se debe trabajar con operaciones de vectores y matrices. Este hecho atrae la atención de la industria de estos métodos.

Por otra parte, se ha observado a lo largo de los distintos ejemplos estudiados que el uso de detección de fallas basado en espacio de paridad y el enfoque basado en observador, para el tipo de falla aquí tratado, permite arribar a similares resultados. Esta conclusión también fue presentada por [19].

Basándose en este resultado, una estrategia llamada *diseño en espacio de paridad-implementación basada en observador* ha sido desarrollado, el cual hace uso de la ventaja computacional de la aproximación de espacio de paridad para el diseño del sistema (selección de un vector o matriz de paridad) y, luego se implementa la solución en forma de observador de forma de garantizar que sea estable numéricamente y consuma menos tiempo de computación en línea.

Resumiendo, tenemos las siguientes conclusiones interesantes:

- dada una función de transferencia, estamos en condiciones de diseñar un generador de residuos basados en espacios de paridad sin ningún conocimiento de su realización en el espacio de estados.
- el generador de residuos generado puede ser extendido a uno basado en observador.
- esta forma basada en observador puede ser aplicado tanto a sistemas discretos como continuos.
- todos los resultados anteriores son aplicables tanto a sistemas SISO, como MIMO.

4.8. Conclusiones

Este capítulo es el mas extenso de la tesis, debido a que es el corazón de la misma, mediante el cual se permitio comprender y analizar las diferentes alternativas para detectar, aislar y diagnosticar fallas en esquemas de FDD basados en modelos.

Se presentaron los conceptos básicos de redundancia analítica y generador de residuos, y se exploraron diferentes maneras de diseñarlo: desde ecuaciones de paridad, vector de paridad generalizados, arreglos sencillos de obsevadores y diseños mas complejos incorporando observados de salida y observadores de entrada desconocida. Durante el capítulo se fueron intercalando conceptos teóricos con ejemplos prácticos de sistemas a escala laboratorio.

Se trabajó con varias de las propuesta de esquemas de detección de fallas basados en modelo, ya que para poder realizar una correcta corrección o compensación de la acción de control y de esta manera que el sistema de control tolerante a fallas opere correctamente, es necesario una adecuada identificación y estimación de las fallas.

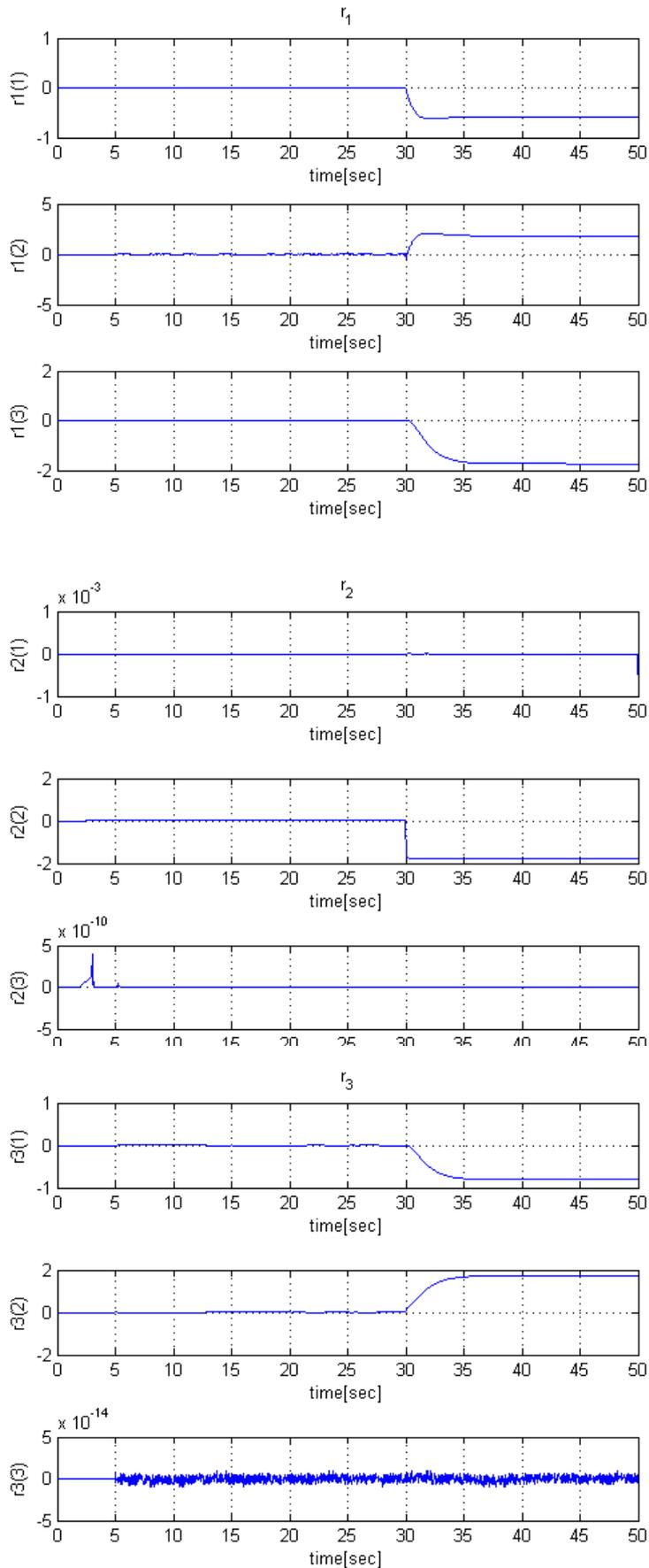


Figura 4.24: Residuos ante falla en el sensor de temperatura

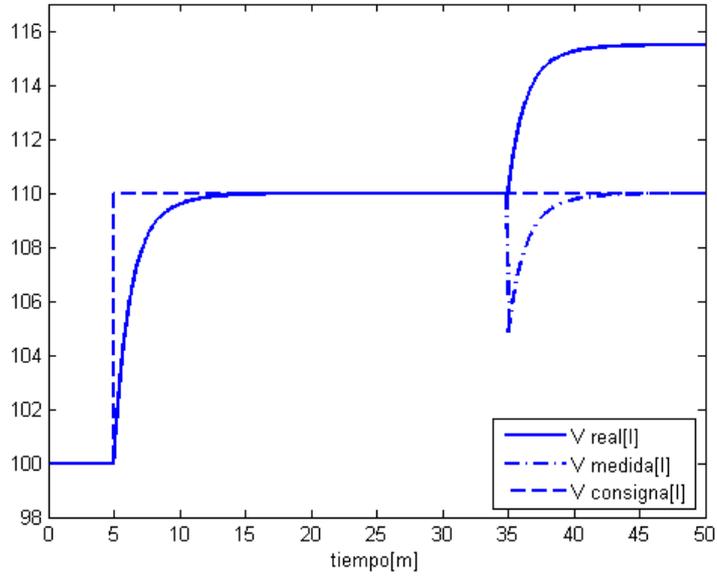


Figura 4.25: Volumen real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5% de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V .

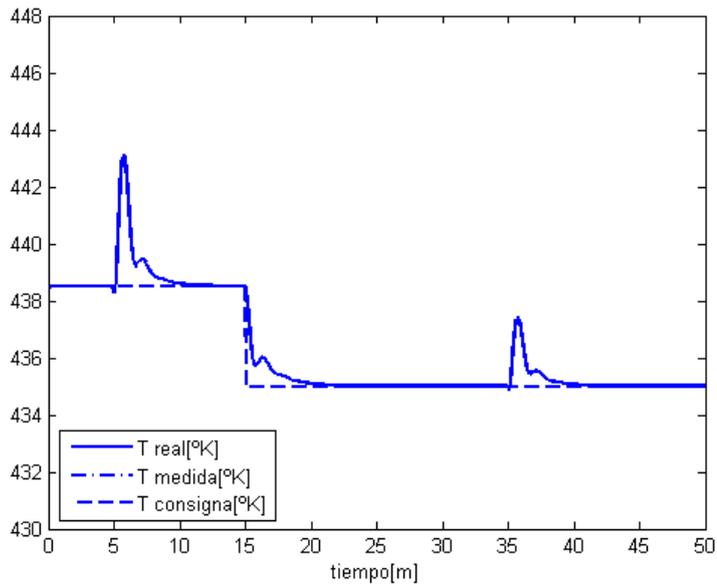


Figura 4.26: Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5% de $t = 35[\text{min}]$ en el sensor de V .

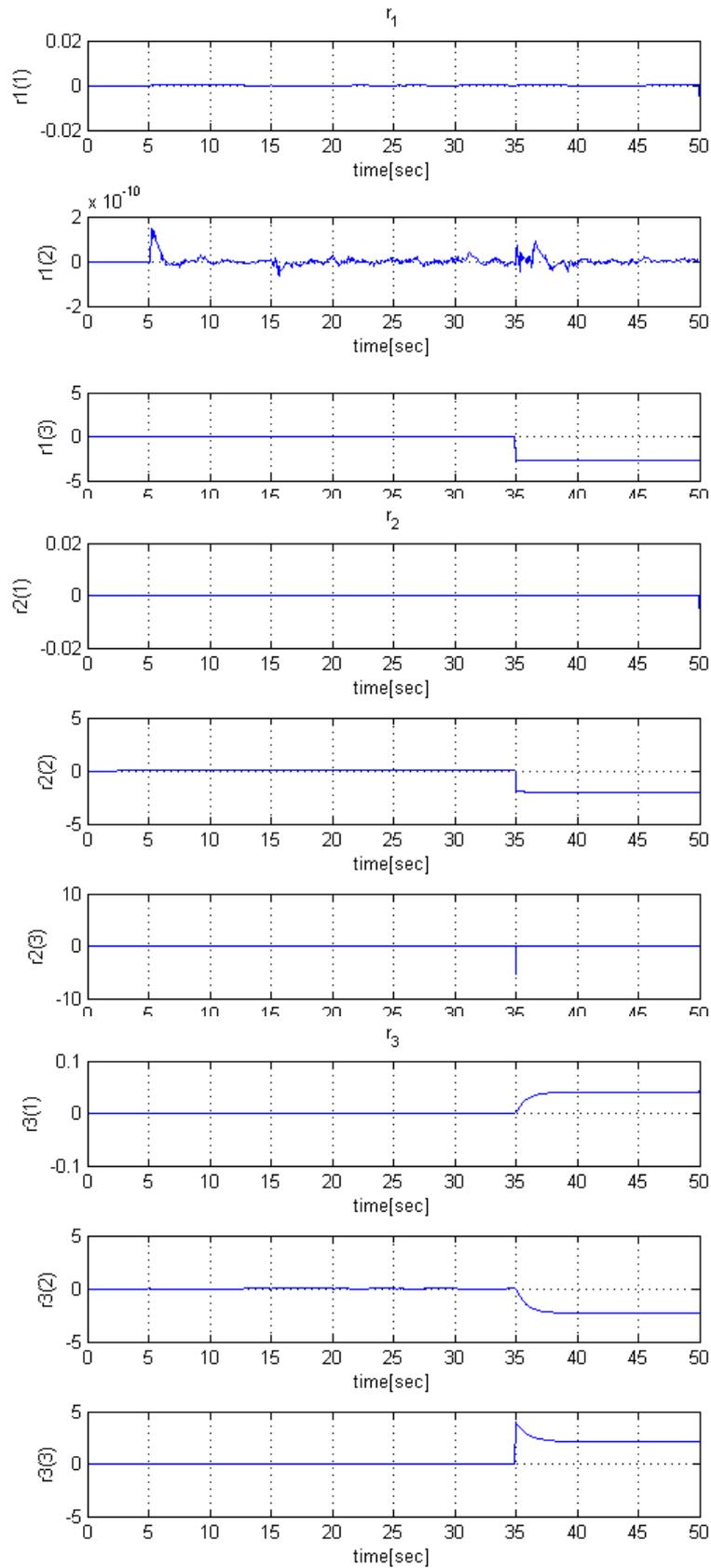


Figura 4.27: Residuos ante falla en el sensor de volumen

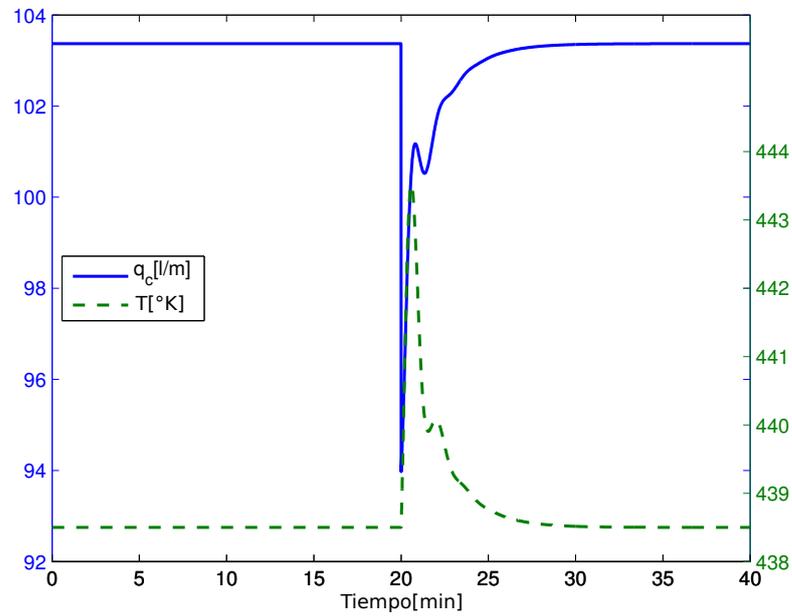


Figura 4.28: Caudal de refrigeración q_c y temperatura del reactor T con falla en el caudal de -10% en $t = 20$ [min].

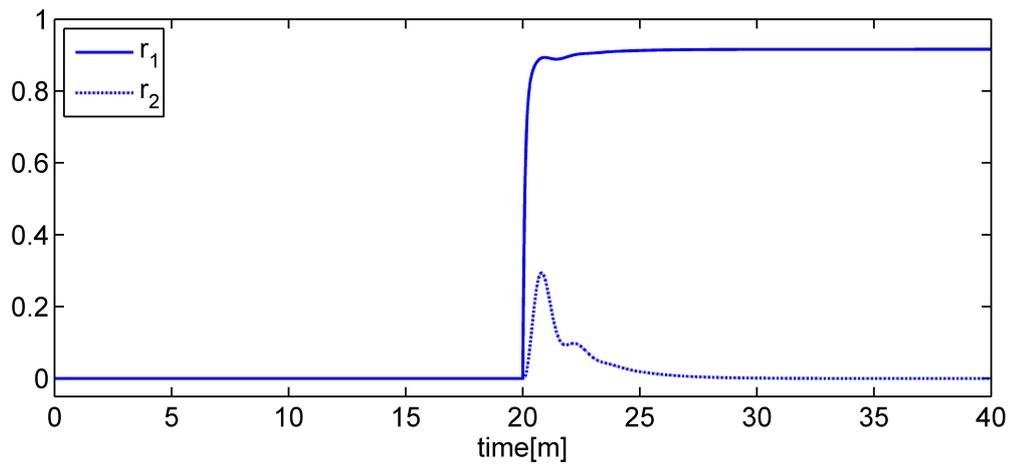


Figura 4.29: Residuos del banco de UIO para una falla ocurrida en el $f_{q_c} = -10\%$ en $t = 20$ [min].

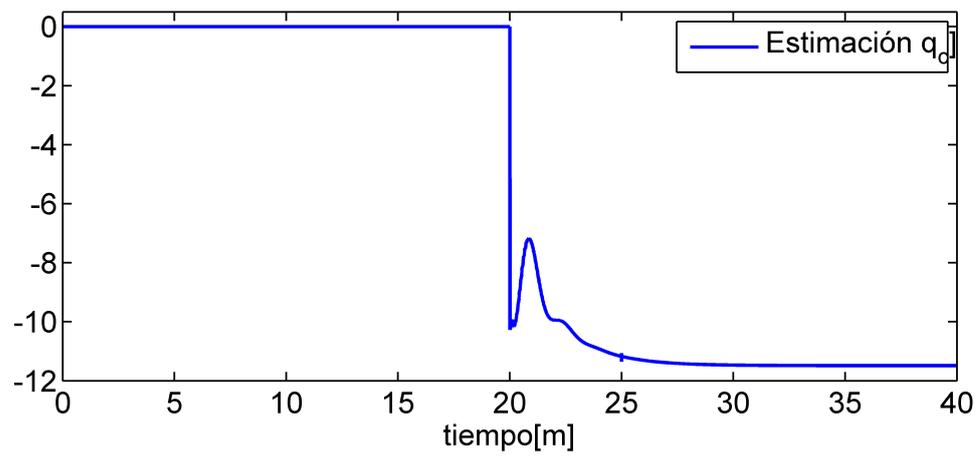


Figura 4.30: Estimación de la falla en caudal de refrigerante (f_{qc}) expresada como desviación del estado estacionario.

Capítulo 5

Evaluación de residuos y diagnóstico

5.1. Evaluación de residuos

Como vimos en los capítulos anteriores, una de las partes centrales de la detección y aislación de fallas es la generación de residuos. Pero estos residuos no indican ningún tipo de información relevante si no son evaluados correctamente. Se considera que un residuo se ha activado si al compararlo con alguna función umbral su magnitud lo supera a la función umbral.

Se denomina función *evaluación de residuos* al funcional definido por $J(r(t))$, asociada con una función umbral $T(t)$ de acuerdo con el siguiente test,

$$J(r(t)) \geq T(t) \quad \text{para} \quad f(t) = 0 \quad (5.1)$$

$$J(r(t)) < T(t) \quad \text{para} \quad f(t) \neq 0 \quad (5.2)$$

donde $f(t)$ es el vector de fallas.

Por lo tanto, si el límite es excedido por la función $J(\cdot)$ que evalúa a un residuo o a un vector de residuos, se puede inferir que el mismo se ha activado e indicando que una falla pudo haber ocurrido.

Existen muchas maneras de definir $J(r(t))$ y $T(t)$. Por ejemplo $J(r(t))$ puede ser elegido como la norma-2 del vector de residuos, o evaluar cada componente del vector de residuos, y el $T(t)$ como una constante (límite fijo).

Dependiendo de la manera en que calculamos los residuos la función $J(\cdot)$ determinará directamente que una falla ha ocurrido (en el caso de los residuos direccionales), o será necesario un posterior *módulo de decisión* o *módulo inferidor* (para el caso de los residuos estructurales obtenidos por ecuaciones de paridad o banco de observares), para determinar que se ha producido una falla.

5.1.1. Definición de la función $T(t)$

La función $T(t)$ puede ser elegida como una constante (en el caso que los residuos tomen sólo valores positivos, por ejemplo al considerarse la norma-2 del vector del residuo), o utilizar el método de los dos umbrales cuando se trabaja directamente con las componentes del vector, y en algunos casos se ha encontrado que se utilizan técnicas basada en lógica borrosa (no utilizada en esta tesis).

En la Fig. 5.1 se ilustra el método de los dos umbrales. Aquí, se establecen dos bandas, fuera de las cuales se considera que los residuos tienen un comportamiento anómalo. Estos umbrales han de colocarse en torno al valor

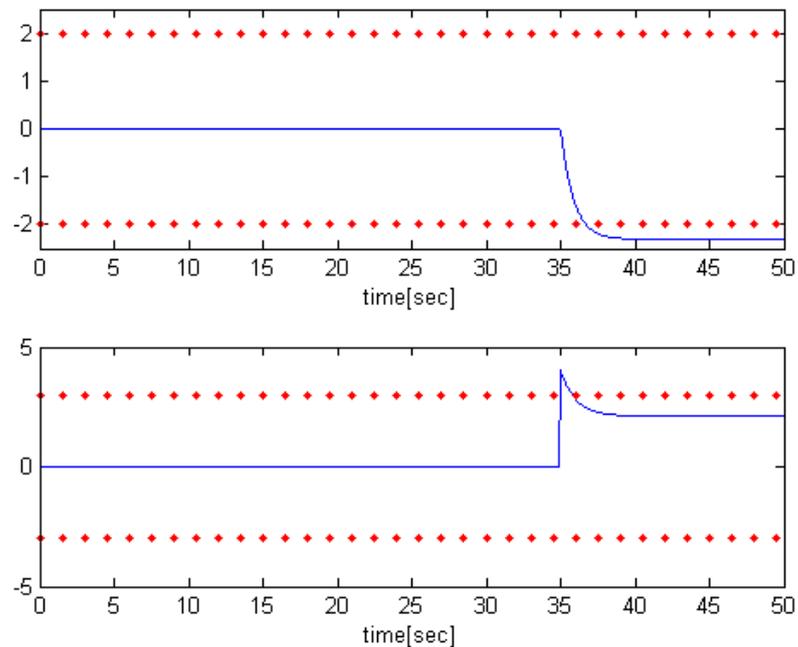


Figura 5.1: Método de los dos umbrales fijos.

medio del comportamiento de dicho residuo en la situación de funcionamiento nominal sin fallo, distanciados de este valor en dos o cuatro veces la varianza en la situación sin fallo.

La elección de estos umbrales tiene una influencia decisiva en el diagnóstico:

- umbrales holgados, nos salvaguardan de falsas alarmas, pero ralentizarán la detección al tardar más el residuo en salirse de la banda considerada.
- umbrales más estrechos adelantan la detección, pero aumentando el riesgo de falsas alarmas.

Por lo tanto debe buscarse una situación de compromiso basada en la experiencia, y teniendo en cuenta los valores extremos indicados que marcan las dos tendencias.

El diagnóstico puede apoyarse en un contador auxiliar que indique cuanto tiempo o cuantos periodos de muestreo (en el caso discreto) ha estado el residuo fuera de su comportamiento habitual, así si se establece el tiempo o muestras que el residuo ha de estar fuera de banda para declararlo activo.

Este conteo se incrementará cuando sobrepase por arriba el umbral, y se decrementará cuando lo haga por debajo, en cualquier caso, cuando supere en valor absoluto, el límite establecido se declarará activo.

En la segunda gráfica de la Fig. 5.1 se aprecia que si no se tuviera en cuenta un tiempo para la determinación de la falla, se hubiera incurrido en una falsa alarma.

La toma de decisión es realizada de acuerdo con test lógicos elementales presentes en [32].

5.2. Aislación de fallas

5.2.1. Residuos Estructurales

Los residuos que se obtienen desde las ecuaciones de paridad y bancos de observadores generalmente son aislados por medio de *residuos estructurales* que son diseñados de tal manera que cada residuo individual, reacciona selectivamente a un subconjunto de fallas. Esto es, se requiere que únicamente algunos componentes del vector de residuos no sean cero, como respuesta a una falla específica. Esto permite formar patrones binarios de fallas, o una estructura de residuos para la identificación de las fallas, debido a que cada residuo no es afectado completamente por todo el conjunto de fallas.

Como vimos en algunos ejemplos anteriores, el patrón de aislación luce como se muestra en la Tabla 5.1.

	r_1	r_2	r_3
$\pm f_1$	0	\pm	\pm
$\pm f_2$	\pm	0	\pm
$\pm f_3$	\pm	\pm	0

Tabla 5.1: Ejemplo de patrón de residuos para diferentes tipos de fallas aditivas, con \pm se indica el signo de la falla y el consecuente signo del residuo.

El objetivo en el diseño de residuos estructurales es generar un buen patrón de aislación del vector de residuos. Los residuos deberían ser independientes al menos de una falla para ser detectada. En la tabla se observa una diagonal de ceros, que indica la independencia del residuo r_i con respecto a la falla f_i , permitiendo realizar una correcta aislación de las fallas.

5.2.2. Residuos Direccionales

El enfoque tomando residuos direccionales genera un vector de residuos que tiene la propiedad de poseer direcciones fijas en el espacio de residuos para distintas fallas particulares, y permite aislar una falla por su ubicación en el espacio de residuos.

Lo primero que se debe hacer es determinar las direcciones predefinidas donde los residuos caen cuando una falla determinada sucede. Teniendo las direcciones de las fallas predeterminadas, aislar una falla resulta en un proceso sencillo de analizar.

La mayor ventaja que posee este método con respecto a los residuos estructurales, es que no solamente puede aislar fallas cuando el sistema ha llegado a su estado estacionario (SS), sino que también permite identificar durante el desarrollo de la dinámica transitoria del sistema, aspecto fundamental en sistema con dinámica lenta, como los son los procesos de la industria química como reactores, tanques, entre otros.

En la Tabla 5.2 se observa como se evalúan los residuos direccionales, ante tres fallas distintas. El incremento en la magnitud del vector GPV ($|GPV|$), nos indica que una falla ha ocurrido. Luego las direcciones predeterminadas de ocurrencias de fallas nos permiten inferir que elemento ha fallado, haciendo que el ángulo entre el GPV y la dirección determinada tienda a cero $\angle(GPV, f_i) \approx 0$.

Retomando el ejemplo del Motor-DC del Cap.4 (Sec.4.3.4) se observa en la Fig.5.2 como en $t = 3$ ocurre una falla en el sensor de velocidad, inmediatamente el módulo del GVP crece, indicándonos que una falla ha ocurrido. Al mismo tiempo observamos la dirección que toma el vector de paridad generalizado, observando que cae en la dirección de la falla (haciendo que el ángulo entre el GPV y la dirección determinada por la falla del sensor de velocidad sea cero), permitiendo identificar claramente la misma.

	$ GPV $	$\angle(GPV, f_1)$	$\angle(GPV, f_2)$	$\angle(GPV, f_3)$
f_1	$\neq 0$	0	$\neq 0$	$\neq 0$
f_2	$\neq 0$	$\neq 0$	0	$\neq 0$
f_3	$\neq 0$	$\neq 0$	$\neq 0$	0

Tabla 5.2: Ejemplo de patrón de residuos direccionales.

5.3. Matriz de incidencia en diagnóstico de residuos estructurales

Como se vio en el el Cap.4, tanto sea para la detección de fallas mediante ecuaciones de paridad (Sec.4.3.3) o mediante banco de observadores (Sec.4.5),

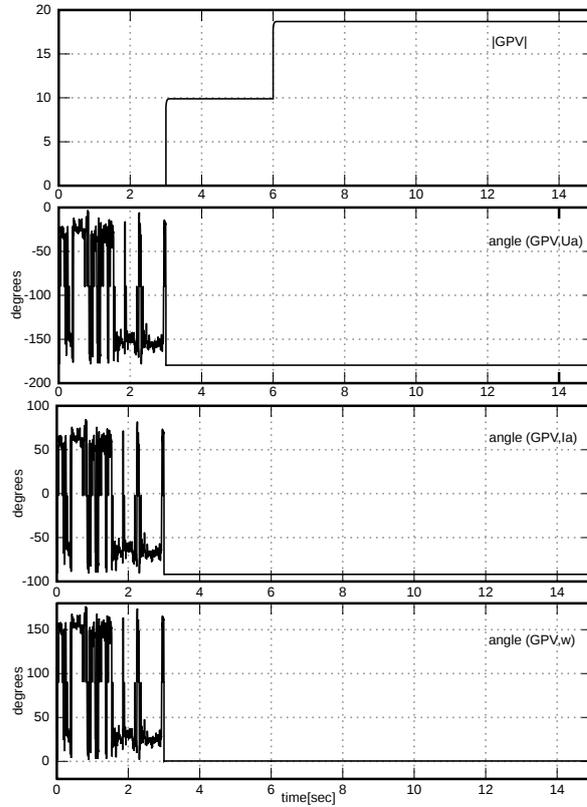


Figura 5.2: Residuos direccionales para el ejemplo del motor-DC. Gráficas de $|GPV|$, $\sphericalangle(GPV, f_{Ua})$, $\sphericalangle(GPV, f_{la})$ y $\sphericalangle(GPV, f_w)$

en ambos casos se necesita definir una matriz de inferencia, mediante la cual el comportamiento del conjunto conformado por los distintos residuos nos indiquen un diagnóstico correcto de la falla acontecida.

5.3.1. Consideraciones sobre diagnosticabilidad

Se define la matriz de incidencia Π para la metodología de detección de fallas F :

$$\Pi = Inc(F) \quad (5.3)$$

donde la matriz $Inc(F)$ es una matriz booleana con sus elementos definidos como:

$$\pi_{ij} = 1 \text{ si } f_{ij} \neq 0 \quad (5.4)$$

$$\pi_{ij} = 0 \text{ si } f_{ij} = 0 \quad (5.5)$$

Si F es la matriz del modelo de entrada-salida, entonces $\pi_{ij} = 1$ significa que una desviación en la medida de la variable j (ya sea ésta un actuador o sensor) originada por un fallo, influye en el i -ésimo residuo, y si observamos

que $\pi_{ij} = 0$ sucede indica que ese fallo en la j -ésima entrada o salida, no influye en el residuo i . Según la estructura de la matriz de incidencia:

- El sistema definido por la matriz F tiene una estructura sensible al conjunto de fallos asociados a las variables de entradas y salidas $u(t)$ e $y(t)$ si ninguna de las columnas de su matriz de incidencia Π tiene todos sus elementos nulos.
- El sistema tendrá una estructura débilmente aislante sí al menos dos columnas de Π son iguales.
- La estructura será fuertemente aislante si todas las columnas de Π tienen al menos dos elementos distintos entre sí.

Puede resultar interesante la transformación del modelo obtenido para obtener una disposición más adecuada para el diagnóstico según las condiciones anteriores. El nuevo modelo puede tener menos, más, o las mismas ecuaciones que el original. Si fuesen más, algunas serían linealmente dependientes, pero la estructura de la matriz de incidencia distinta.

El problema consiste en hallar la matriz T tal que:

$$F^* = TF \tag{5.6}$$

El modelo buscado viene dado por F^* , y se especifica a partir de la matriz de incidencia Π^* . Cada fila en Π^* determina una ecuación algebraica lineal. Las características de la solución dependerán de la matriz T . Este tipo de transformaciones pueden conducir a cientos de modelos que satisfagan las condiciones de diagnosticabilidad.

La aparición de ceros, o bien dependencias lineales en el modelo inicial, reduce el número de modelos transformados posibles. En particular, si la dependencia por columnas es total (rango de la matriz es uno) no es posible efectuar el diagnóstico por medios analíticos, y será necesario añadir nuevos sensores.

5.4. Conclusiones

En este breve capítulo se presentó con mayor formalidad lo referido a la evaluación de residuos. Se apreció como los residuos por sí solos no indican ningún tipo de información relevante si no son evaluados correctamente. Para poder determinar que un residuo se haya activado, debemos compararlo con alguna función umbral. Por lo tanto, se necesitan al menos tres elementos: un generador de residuos, con una función umbral y una matriz de incidencia asociada.

Se comentó diferentes tipos de funciones umbrales: una constante fija cuando se evalúa al residuo mediante alguna norma, el método de los dos

umbrales se toma cada uno de los elementos del vector de residuos, y las direcciones predeterminadas cuando se utiliza residuos direccionales.

Por otro lado se mostró cómo se realiza la aislación cuando los residuos se diseñan por medio de ecuaciones de paridad u observadores, necesitando una matriz o patrón de aislación, denominados a estos residuos estructurales; y como se realizan si se diseñan por medio del vector de paridad generalizado, o genéricamente se los conoce como residuos direccionales.

Capítulo 6

Adaptación y compensación de fallas

6.1. Introducción

Los fallos en los sensores y los actuadores no actúan de la misma manera en un sistema, provocando diferentes consecuencias, por lo que la ley de control adaptada no se computa de la misma manera para ambos casos.

Se puede decir que la solución que se dispone para estos dos tipos de fallas es de naturaleza completamente distinta. En el caso de una falla en un sensor, lo que se hace es tomar la estimación de esa variable medida de algunos de los observadores del banco de observadores diseñado para tal fin y se realimenta esta señal estimada al sistema¹. Es decir se toma como '*buena medición*' de la variable de salida a la estimación de la misma. De esta manera se reconfigura o *adapta* el controlador ante la falla.

Desde un punto ingenieril, cuando existe la posibilidad de redundancia física, como lo es habitualmente en procesos críticos (plantas nucleares, aviones o reactores, entre otros), se utiliza sensores en dúplex y se determina cuál de los diferentes sensores nos otorga la medición más acertada de la variable física medida, como lo vimos en la Sec. 4.5.4.

Ahora bien, cuando se determina que una falla se ha producido en un actuador la estrategia adoptada es *compensar* la acción de control, sumando un valor a la manipulada proporcional a la falla acontecida, siempre que los nuevos valores a los que se somete la manipulada este dentro de los límites apropiados, fuera de la saturación de la misma. Por lo que es necesario una *estimación* lo más exacta posible de la misma.

¹Refiriéndonos a un control feedback como puede ser un PID, feedback multilazo, o si trabajamos en variables de estados, por medio de realimentación de estados.

6.2. Adaptación y compensación de fallas.

En la Fig. 6.1 se observa el esquema general de diagnóstico, adaptación y compensación de fallas adoptado. En el mismo se visualizan los distintos esquemas: en el Cap. 4 se exploraron distintas opciones en lo que refiere al *Módulo de Detección y Diagnóstico de Fallas* y en el Cap. 5 se trabajó en lo que refiere a la *Evaluación de residuos* y a la *Matriz de Inferencia*.

A continuación se muestra como se resuelve el problema de fallas en los sensores y seguidamente como adaptamos el sistema cuando ocurre un falla en los actuadores, y de que manera está esquematizado en la Fig. 6.1.

6.2.1. Adaptación de fallas en los sensores.

La adaptación al fallo en un sensor se puede conseguir al utilizar una estimación libre de fallas del elemento defectuoso para *adaptar la ley de control*.

El procedimiento consisten en tomar la estimación sin fallas del j -ésimo sensor dañado, al que denominamos \hat{y}_j , el cual se obtiene de algún observador (por ejemplo de entrada desconocido). El mismo es diseñado para ser insensible de las fallas del j -ésimo sensor. Consecuentemente, el vector de salida utilizado para implementar la ley de control y_c es construido de la siguiente manera:

$$y_c(t) = \begin{pmatrix} \check{y}_1(t) \\ \vdots \\ \check{y}_j(t) \\ \vdots \\ \check{y}_m(t) \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

donde cada elemento del vector $\check{y}_j(t)$ es computado como:

$$\check{y}_j(t) = (1 - I(f_j)) y_j + I(f_j) \hat{y}_j(t) \quad (6.2)$$

En esta expresión y_j es la salida real de la planta, $\hat{y}_j(t)$ es la salida estimada por algún observador y,

$$I(f_j) = \begin{cases} 1 & \text{falla en el } j - \text{ésimo sensor} \\ 0 & \text{sensor libre de fallas} \end{cases} \quad (6.3)$$

Esta última ecuación, es la forma matemática del módulo que se ha denominado *Adaptación por Fallas en Sensores* en el esquema general de la Fig. 6.1. Además, como se puede observar la adaptación a las fallas proviene de los resultados del módulo de diagnóstico de fallas que se ha desarrollado en el Cap. 4.

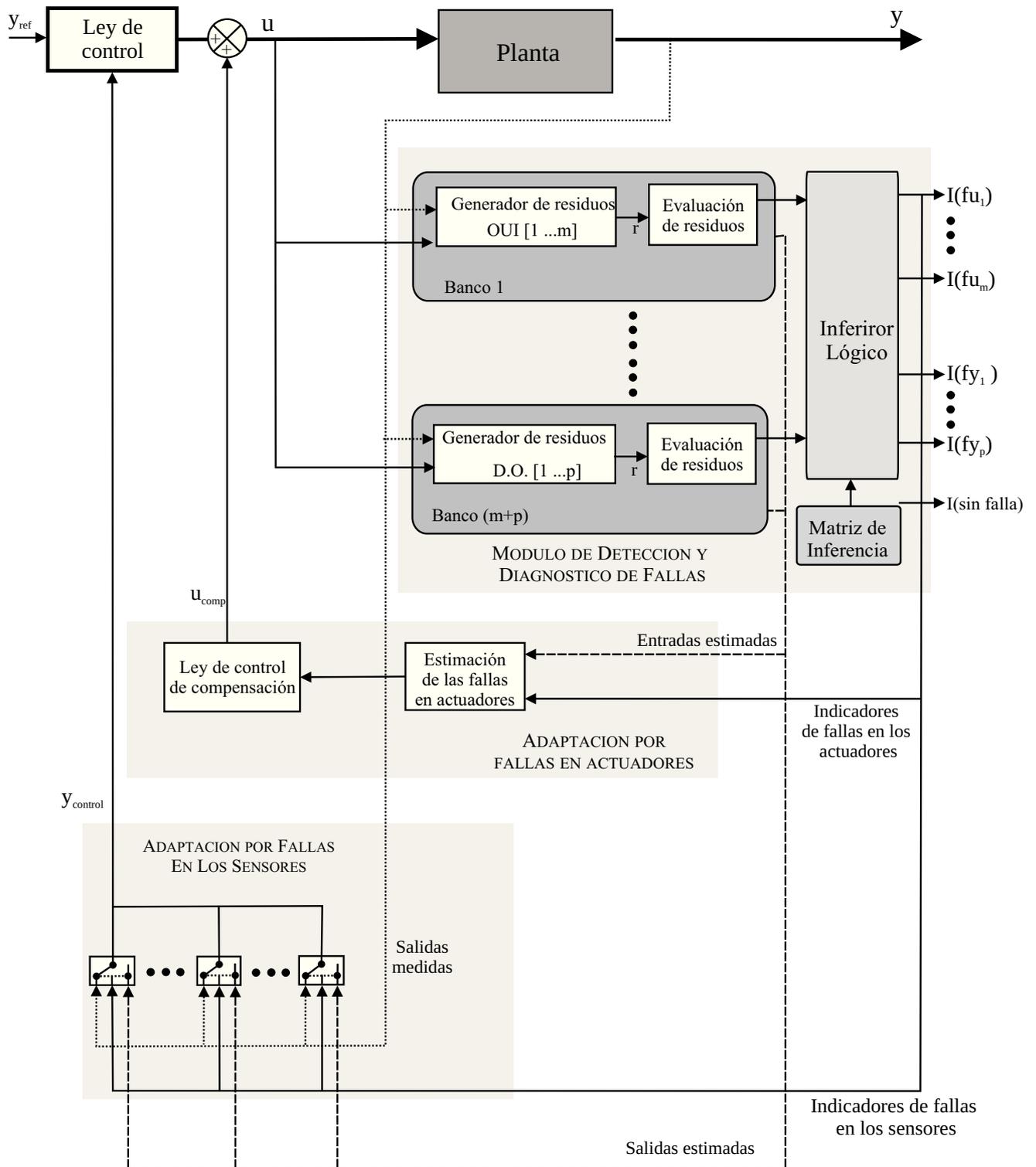


Figura 6.1: Esquema general de Diagnóstico de Fallas y la Adaptación.

6.2.2. Adaptación de fallas en los actuadores.

Ante la presencia de una falla en el i -ésimo actuador, la ecuación en espacio de estados que representa al sistema, queda de la forma,

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + F_u f_u^i(t) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{6.4}$$

Para compensar el efecto de la falla en el sistema, una nueva ley de control u_{comp} es calculada para ser sumada a la ley nominal de control. Luego la nueva ley de control (u^{FTC}) aplicada al sistema es

$$u^{FTC}(t) = u(t) + u_{comp}(t)\tag{6.5}$$

Entonces la dinámica del sistema dado por Ec. (6.5) con la nueva u^{FTC} luce,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu^{FTC}(t) + F_u f_u^i(t) = Ax(t) + Bu(t) + Bu_{comp}(t) + F_u f_u^i(t)$$

donde la acción de control adicional u_{comp} debe ser computada de manera tal que el sistema en falla se recupere lo más rápidamente posible al valor antes de la falla. Luego, la condición a cumplir para eliminar la falla resulta ser,

$$Bu_{comp}(t) + F_u f_u^i(t) = 0\tag{6.6}$$

Para esto último se utiliza una estimación de la falla \hat{f}_u , obtenida del módulo de diagnóstico (Sec. 4.5.7). Luego resolviendo la Ec. (6.6) la acción de control a sumarse necesaria para contrarrestar la falla es,

$$u_{comp}(t) = -B^+ F_u \hat{f}_u(t)\tag{6.7}$$

Siempre que la matriz B sea de rango completo, donde B^+ es la matriz pseudo-inversa de la matriz B .

6.3. Aplicaciones a los modelos estudiados

6.3.1. Tres tanques con interconexión

En esta sección se retoma el ejemplo donde se considera un sistema hidráulico que puede ser utilizado para el tratamiento del agua o almacenamiento de líquidos de plantas industriales y donde el control de los niveles de líquido en una planta es crucial con el fin de responder a las especificaciones deseadas.

El sistema hidráulico experimental de laboratorio representado en la Fig. 6.2 compuesto por tres tanques cilíndricos de idéntico diámetro d . El caudal a la entrada a los tanques 1 y 2 son reguladas por válvulas de control neumáticas que otorgan los caudales de entrada q_{m1} y q_{m2} al sistema. Tres sensores

de presión diferencial en conjunto con sus respectivos *strain gauge*² son utilizados para medir las tres alturas de los tanques. Se proponen dos lazos de control en el sistema cuyos controladores indicados en la figura como LC1 y LC2, están apareadas con las variables $h_1 - q_{m1}$ y $h_2 - q_{m2}$, respectivamente.

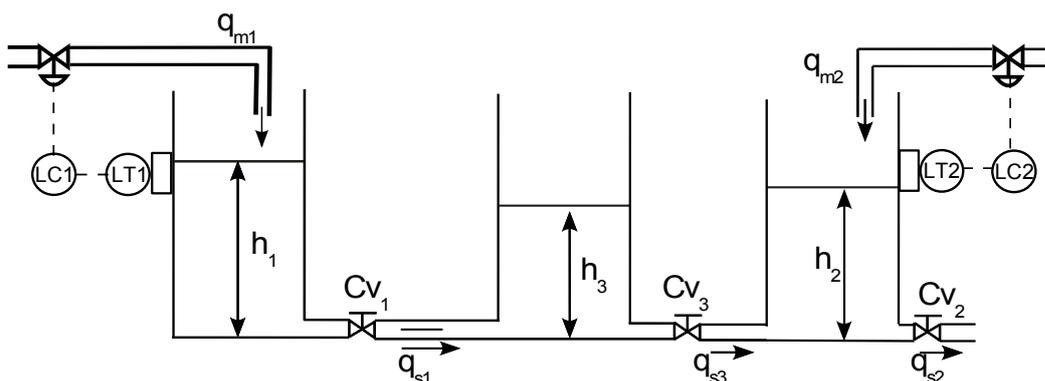


Figura 6.2: Diagrama esquemático del sistema de tres tanques con los lazos de control.

La habilidad del método presentado para compensar una falla mediante la corrección de la acción de control se muestra ante una falla en el ECF, en nuestro caso la válvula de control de caudal de entrada q_{m1} (Picó y Adam [61]).

En este ejemplo se compara el desempeño del sistema de control clásico (CC) sin control tolerante a fallas con una corrección de fallas (CF) presente en un sistema de control tolerante a fallas (FTC).

Observando la Fig. 6.3 se pueden apreciar tres cambios. Primeramente en $t = 100$ se nota un cambio en consigna de $h_1 = 0,44[m]$ a $h_1 = 0,45[m]$, donde el lazo de control en ambos esquemas se comportan satisfactoriamente. Luego, en $t = 800[s]$ una falla en el actuador es simulada, la cual se considera que es abrupta y con una degradación del 5%. Finalmente en $t = 1200[s]$ se introduce un nuevo cambio escalón en el set point de $\Delta h_1 = 0,02[m]$ para evaluar el control en tracking luego de la falla. La respuesta dinámica en el último caso indica que sigue la consigna correctamente dado que se dispone de los modos integrales necesarios para tal efecto.

Note que una vez que la falla en $t = 800[s]$ es aislada y estimada, la ley de control de compensación es aplicada de manera de reducir el efecto de la falla en el sistema. Se presentan dos casos, en el primero la aislación y estimación se concreta en $\Delta t = 10[s]$, y en el segundo en $\Delta t = 18[s]$, tal como se observa en el acercamiento realizado a la altura del tanque en la Fig. 6.4 y la manipulada apreciada en la Fig. 6.5.

²Galgas extensiométricas

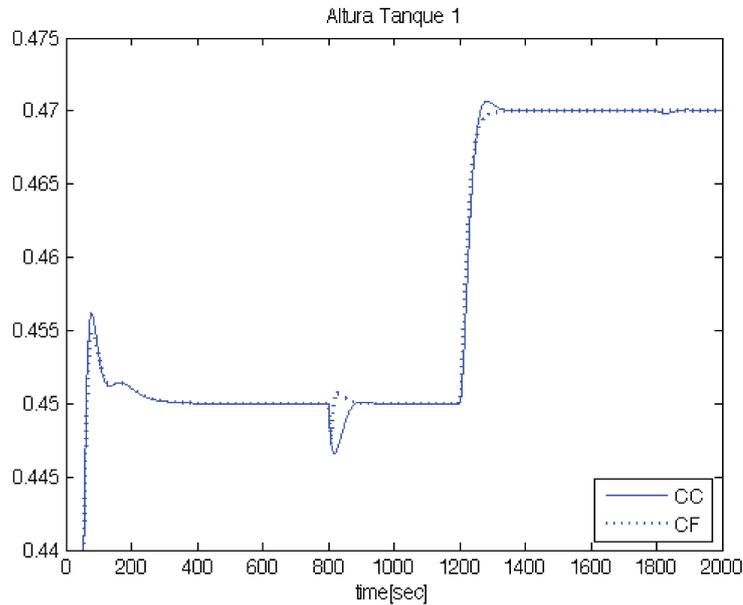


Figura 6.3: Nivel del Tanque 1 con falla en el caudal de entrada q_1

Dado que una falla en el actuador se la puede pensar que actúa en el sistema como una perturbación, y debido a la presencia de un integrador en el lazo de control, las salidas de nuestro sistema recuperan sus valores nominales como se muestra en la Fig. 6.4.

En la Fig. 6.5 también se visualiza la corrección de la acción de control con la nueva u_{acomp} definida en la Ec. (6.7).

Con el método de corrección de fallas (CF), la salida se decremanta menos que en el caso de la ley de control clásico (CC), entonces con esta acción de corrección se alcanzan valores nominales más rápido debido a que la falla es estimada y la nueva ley de control se encuentra disponible para compensar el efecto de la falla al instante $t_1 = 810[s]$ (CF_1) y $t_2 = 818[s]$ (CF_2), cuando la falla es aislada.

Analizando la Fig. 6.4, se puede observar que luego que una falla ocurre, el desempeño del sistema de control con CF es mejor que con el control clásico (CC). Estos resultados también se pueden confirmar observando la entrada de caudal q_{m1} (Fig. 6.5). En la ley de control clásica la manipulada se incrementa lentamente tratando de compensar el efecto de la falla en el sistema, pero con la corrección de fallas la manipulada se incrementa rápidamente y también permite una compensación sobre las salidas controladas del sistema.

Para visualizar como la falla en q_{m1} repercute en todo el sistema se observa en la Fig. 6.6 como la altura del tanque 2 viene influenciada por la misma y como retoma el valor en consigna de $h_2 = 0,25[m]$, luego que el controlador LC2 recupera el valor.

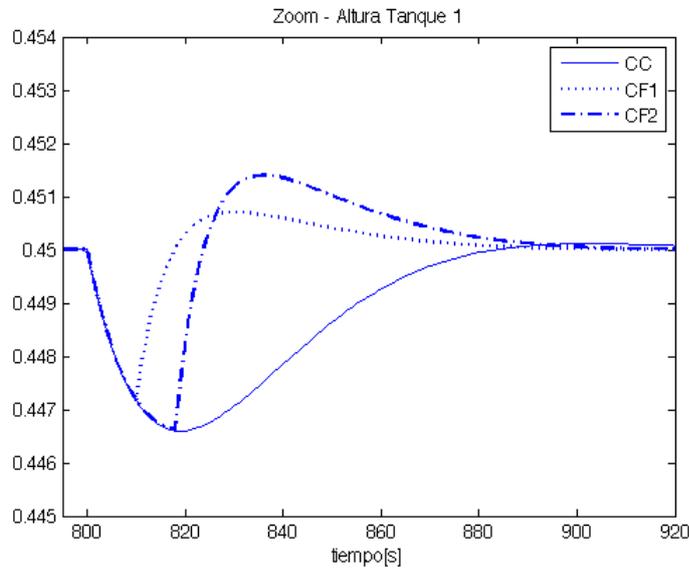


Figura 6.4: Zoom en nivel del tanque 1 con falla en el caudal de entrada q_1 .

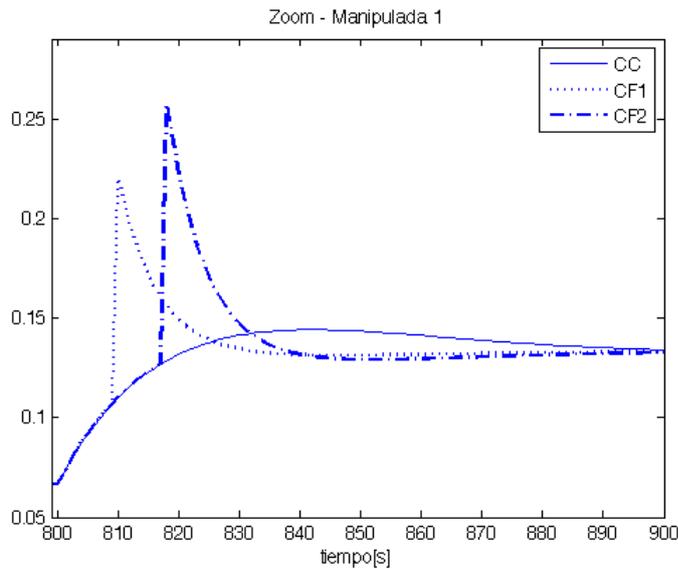


Figura 6.5: Flujo de entrada q_1 con falla en la válvula 1.

En la Tabla [6.1](#) se muestra la norma 2 del error de tracking definida como:

$$\|e_t\|_2 = \|r - y\|_2, \quad (6.8)$$

utilizada para evidenciar la performance de las dos situaciones en el intervalo de tiempo comprendido entre 795[s] y 1000[s].

Note que, cuando se implementa el método de corrección de fallas, la norma del error de tracking para las salidas h_1 y h_2 son significativamente

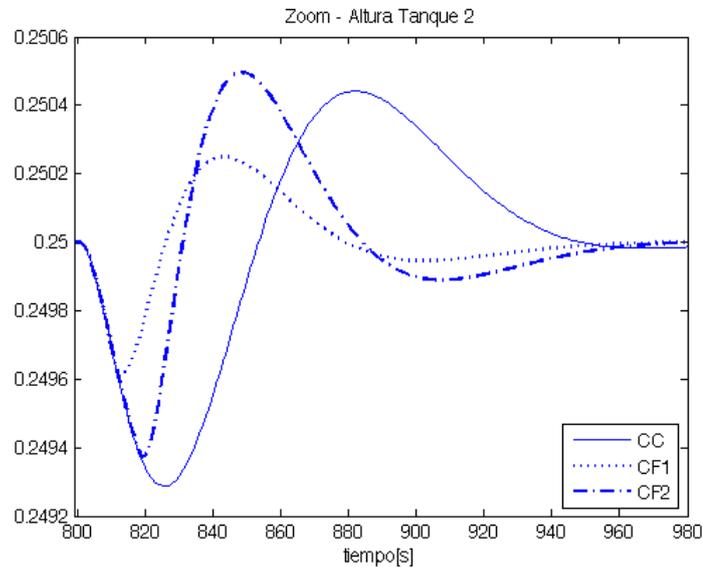


Figura 6.6: Dinámica del nivel del Tanque 2 con falla en el caudal de entrada q_1 con la ley de control clásica(CC), y con la corrección de fallas(CF).

Tabla 6.1: Norma 2 del error en el tracking

	CC	CF_1	CF_2
$\ e_{t1}\ _2$	0,0189	0,0088	0,0143
$\ e_{t2}\ _2$	0,044	0,018	0,034

más pequeñas que en el caso del control clásico sin FTC. Para evidenciar mejor esto, los distintos desempeños dinámicos de las salidas controladas h_1 y h_2 se presentan en la Tabla 6.2, con una norma del error de tracking normalizada con respecto al control clásico (CC).

Tabla 6.2: Norma 2 del error en el tracking, normalizada con la $\|e_{ti}\|_2$ en CC.

	CC	CF_1	CF_2
$\ e_{t1}\ _2$	1	0,4679	0,7569
$\ e_{t2}\ _2$	1	0,4046	0,7705

Se puede observar también, que mientras mas se retrasa la estimación de la falla, la corrección de la acción de control pierde sentido. En otras palabras, si la respuesta dinámica del sistema realimentado ya ha recuperado gran parte del valor nominal antes que la falla sea detectada, la adaptación ya no resulta necesaria.

6.3.2. CSTR

La bondad del FTC ante fallas aditivas, incluyendo un módulo de detección y diagnóstico de fallas por medio de bancos de observadores dedicados, se aprecian en las simulaciones numéricas que se presentan a continuación (Picó y Adam, [59]). En esta sección se retoma el ejemplo presentado en el Cap.4, Sec.4.6.2 y se asume el control tolerante a fallas presentado en la Sec. 6.2 representado en la Fig.6.1.

Falla en sensor de temperatura

Para esta situación se realiza primeramente cambios en consigna entorno al punto de operación, mostrando que los controladores PI propuestos permiten seguir los cambios introducidos. Particularmente, los cambios en consigna son:

- en $t = 5[\text{min}]$ cambio escalón en volumen de $V = 100[\text{l}]$ a $V = 110[\text{l}]$,
- en $t = 15[\text{min}]$ cambio escalón en la temperatura del reactor de $T = 438[^\circ\text{K}]$ a $T = 435[^\circ\text{K}]$.

En la Fig.6.7 se muestra la respuesta dinámica al escalón en la consigna del volumen del reactor y en la Fig.6.8 como influye dicho cambio en el temperatura del reactor.

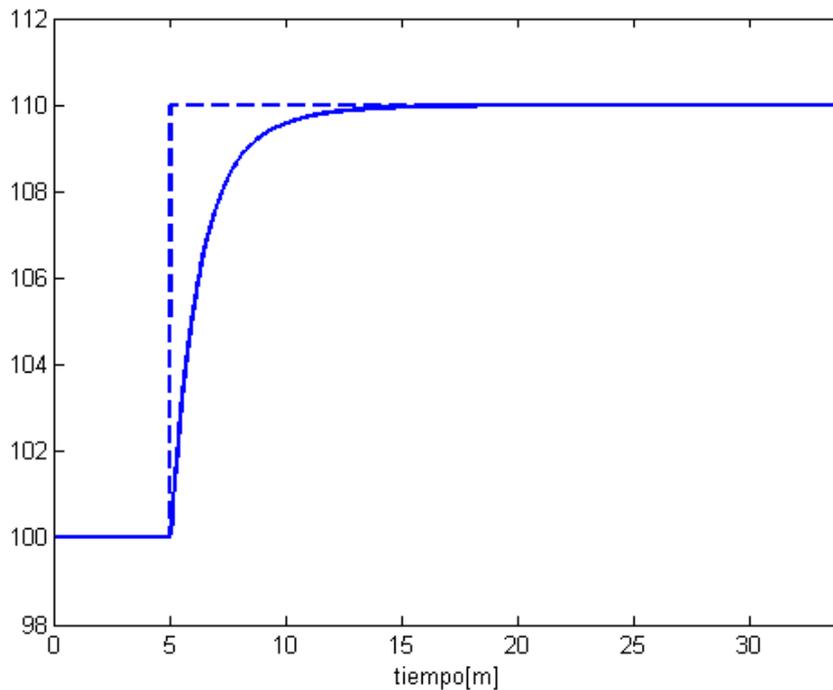


Figura 6.7: Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$.

Luego en la misma figura se muestra lo que ocurre en el sistema ante una degradación en la lectura del sensor de temperatura del -5% en $t = 30[\text{min}]$. Sin el control tolerante a falla, se observa que el lazo de control reduce el caudal de refrigerante q_c (Fig. 6.9) para ajustar a la temperatura del reactor al valor consigna de acuerdo con un valor de temperatura medido erróneo, asumiendo que el reactor necesita acumular más calor. Sin embargo, la temperatura real del reactor es mucho mayor al final del transitorio, debido a este ajuste *innecesario* por parte del controlador.

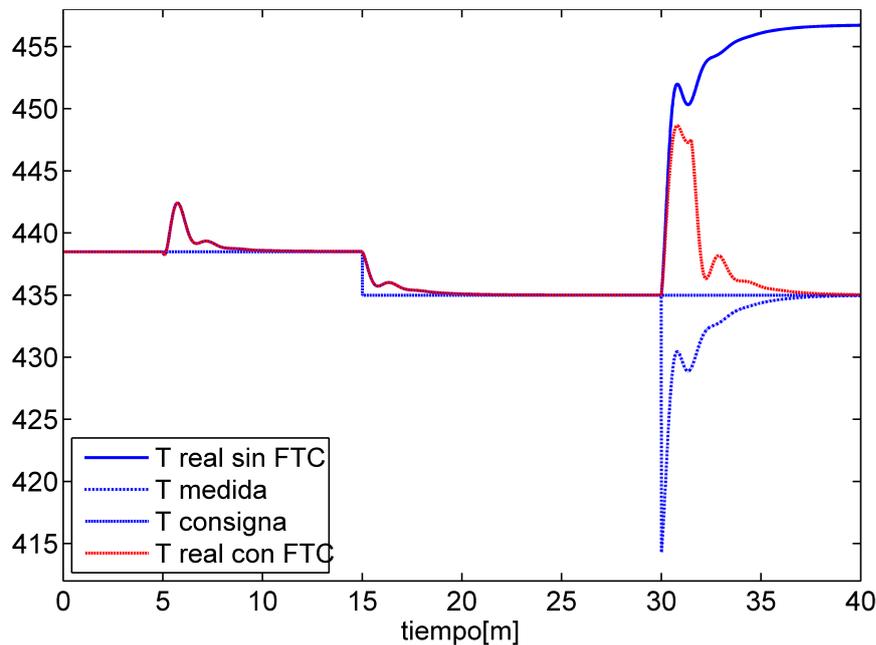


Figura 6.8: Temperatura real sin FTC, medida, consigna y con el Control Tolerante a Falla. Cambio en consigna en V en $t = 5[\text{min}]$ y T en $t = 15[\text{min}]$ y degradación de 5% at $t = 30[\text{min}]$.

En la misma gráfica se observa que bajo el control tolerante a fallas, el módulo de *Adaptación por fallas en los sensores* de la Fig. 6.1 se activa, tomando como señal correcta la de alguno de los observadores, por lo que interviene la corrección del sistema de control tolerante a fallas manteniendo el valor en consigna en temperatura de $T = 435[\text{K}]$.

En la Fig. 6.10, se muestra como los residuos r_T , r_V y r_{CA} indican la presencia de una falla en temperatura de acuerdo con la Tabla 4.5.

Falla en el sensor de Volumen

En esta simulación se muestra con el mismo ejemplo anterior un cambio en consigna en $t = 5[\text{min}]$ desde $V = 100[\text{l}]$ a $V = 110[\text{l}]$, y luego se simula una degradación en la lectura del sensor de volumen de -5% en $t = 35[\text{min}]$.

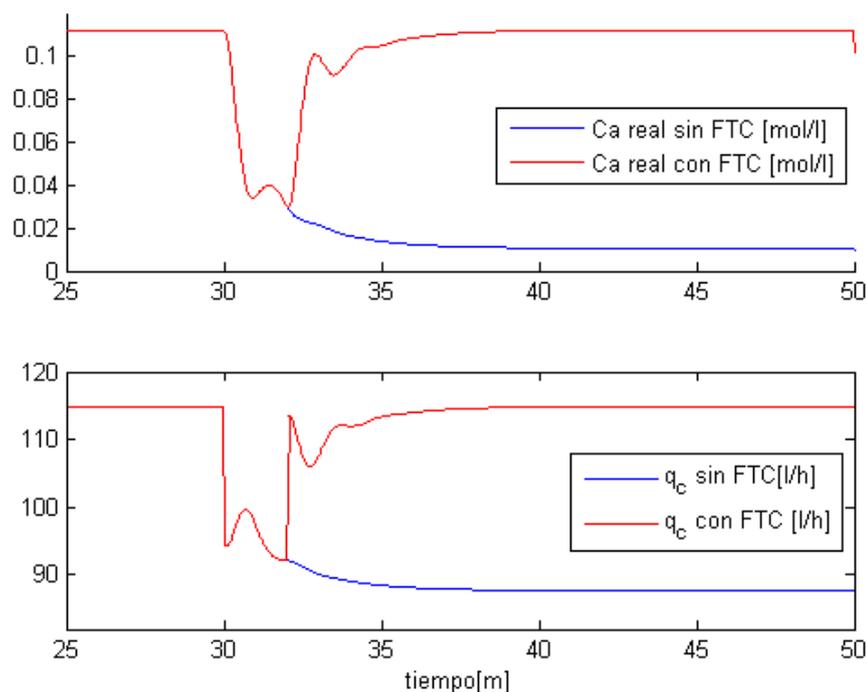


Figura 6.9: Concentración ante falla del 5 % en $t = 30$ [min] en el sensor de T con y sin FTC. Caudal manipulado q_c con y sin FTC.

De acuerdo con los resultados del Cap. 4 en la Sec. 4.6.4, donde se muestra lo que ocurre en el sistema sin control tolerante a fallas (señales en azul): la realimentación proveniente del sensor de volumen (usualmente es un sensor de nivel) falla abruptamente en un 5%, midiendo en el instante de la falla un valor de $V = 104,5$ [l] y el lazo de control corrige este error de medición para mantener el nivel en 110[l]. Sin embargo, la variable real del proceso se ubica cercanos a los 115,5[l], regulando a un valor equivocado. Asimismo, de acuerdo al tipo de falla asumida, en dicha figura se observa la lectura del sensor de volumen y como el controlador cree estar corrigiendo correctamente.

Por otro lado en dicha figura también se aprecia como el FTC se desempeña (señales en rojo). Luego de un tiempo en el que se infiere que una falla ha acontecido, el módulo de *Adaptación por fallas en los sensores*, conmuta la señal proveniente del sensor en falla por una señal proveniente del banco de observadores siguiendo la estrategia de control que se representa en la Fig. 6.1. Entonces, la variable controlada real recupera el valor en consigna, mientras que la señal medida proveniente del sensor sigue dando un valor erróneo.

Note que los cambios en consigna de temperatura en el instante $t = 15$ [min] no influyen en la dinámica del volumen del reactor, siendo esto con-

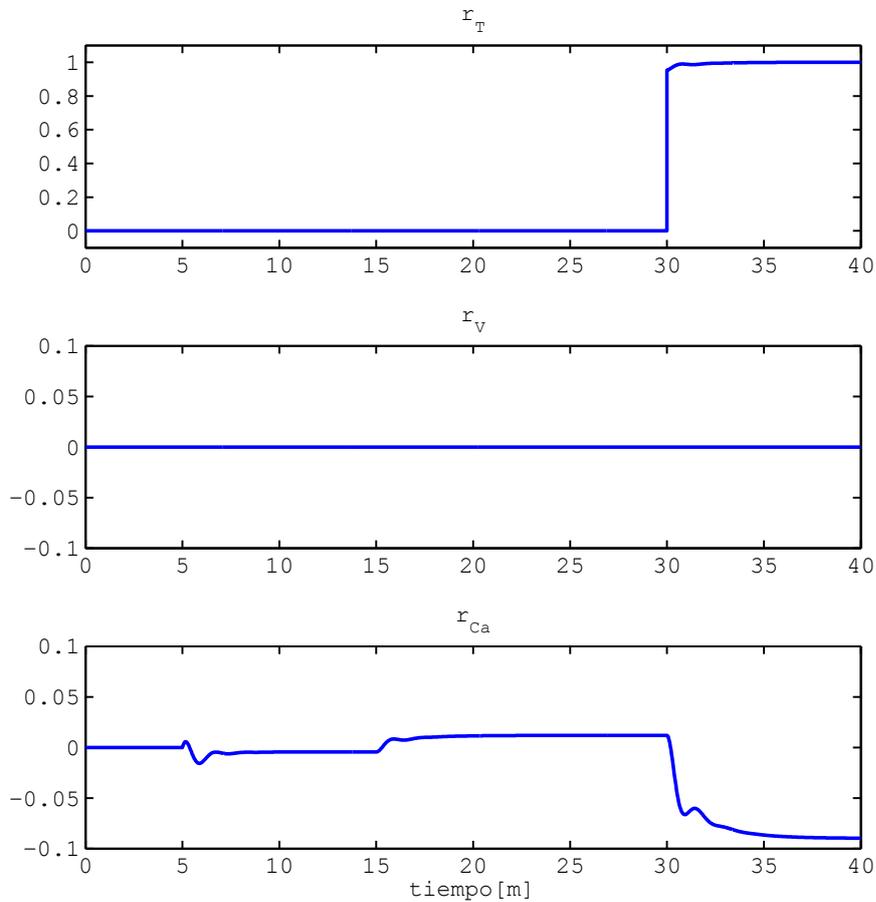


Figura 6.10: Residuos r_T, r_V y r_{Ca} , ante una falla en el sensor de temperatura.

sistente con la física del problema.

En la Fig. [6.11](#) se observa como evoluciona la temperatura del reactor ante los cambios en consignas antes mencionados y frente a la falla en el sensor de volumen. Note que cuando se realiza un cambio en consigna en el volumen este produce un cambio en la temperatura del reactor obligando al lazo de control de temperatura a corregirlo ($t = 5$ [min]). Luego en $t = 35$ [min] se aprecia las correcciones en temperatura realizadas por el lazo de control correspondiente con y sin FTC.

En la Fig. [6.12](#) se muestra para el intervalo de tiempo entre $t = 30$ [min] y $t = 50$ [min] la variación de temperatura y el caudal refrigerante manipulado para el problema con y sin FTC. Note en la segunda gráfica que sin FTC, dado que el volumen real del reactor no es el de consigna se hace necesario incrementar el caudal refrigerante para extraer la cantidad de calor necesario que lleve la temperatura al valor de consigna.

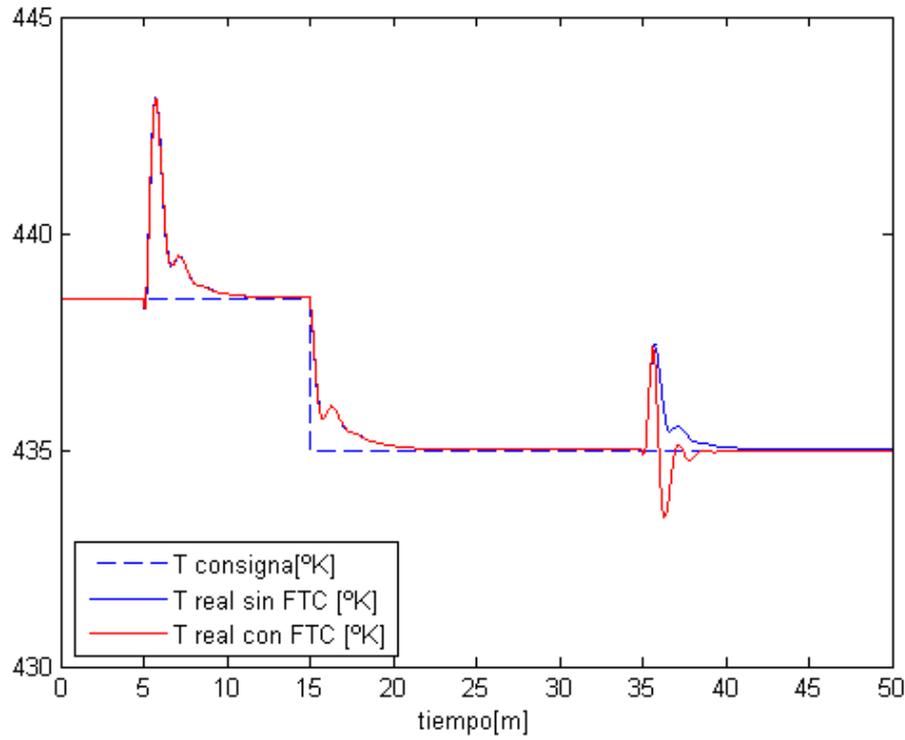


Figura 6.11: Temperatura real, medida y consigna. Cambio en consigna en Volumen en $t = 5$ [min] y cambio en consigna en Temperatura en $t = 15$ [min]. Degradación de 5 % de $t = 35$ [min] en el sensor de V con y sin FTC.

6.4. Conclusiones

En este capítulo se introdujo un mecanismo de control tolerante a fallas, por el cual se puede lograr un buen desempeño del sistema ante la presencia de una falla abrupta consistente en la degradación de un sensor o un actuador.

Se mostró como la adaptación a la falla en un sensor se puede conseguir utilizando una estimación libre de fallas del elemento defectuoso para *corregir la ley de control*. La estimación de la variable libre fallas que suplanta a la señal del sensor dañado se obtiene de algún observador que otorgue un valor correcto de la misma.

Por otro lado, para compensar el efecto de una degradación en el funcionamiento de un actuador, el mecanismo que se propone es calcular una nueva ley de control la cual es sumada a la ley nominal de control. Luego, la nueva ley de control aplicada al sistema *compensa* el funcionamiento anómalo del actuador. Notar que, a lo largo de los ejemplos no se consideró fallas del tipo *out of order*, las cuales conllevarían a diseñar un sistema con hardware redundante.

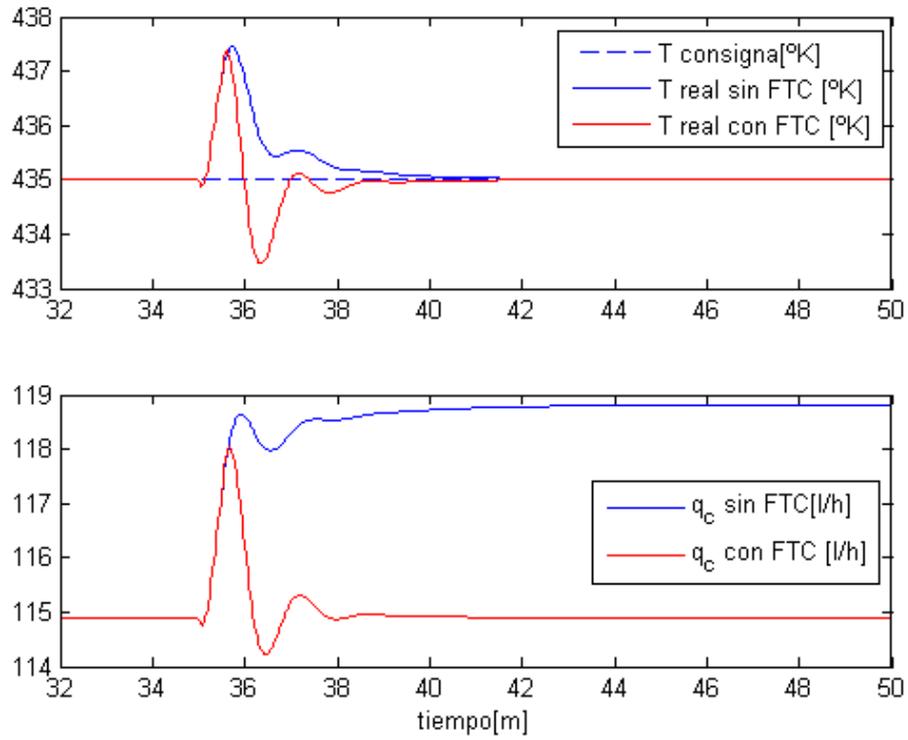


Figura 6.12: Temperatura ante degradación de 5% de $t = 35$ [min] en el sensor de V con y sin FTC. Caudal manipulado q_c con y sin FTC.

Para mostrar las mejoras producidas por el esquema de control tolerantes a fallas propuesto, se presentaron dos ejemplos de sistemas altamente estudiados en la ingeniería química como lo son: un sistemas de tres tanques interconectados y un reactor-tanque. En ambos ejemplos se compararon las performance del sistema realimentado con un controlador tradicional y lo que sucede cuando se diseña o proyecta un sistema de control tolerante a fallas.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Resumen de la Tesis

En esta tesis se abordó el problema de diseño de controladores tolerante a fallas en sistemas típicos de la industria de procesos, los que generalmente son no lineales, variantes en el tiempo y tienen límites en sus estados. Durante el desarrollo de la misma se trabajó exclusivamente con fallas del tipo abrupta que implica la degradación de la señal de salida en los elementos de control final y de medición. Asimismo, se presentaron diferentes técnicas de detección y diagnóstico de fallas y estrategias de recuperación, mediante el uso de herramientas matemáticas modernas, capaces de lograr que el sistema o proceso químico presente una performance aceptable.

Recapitulando los temas tratados en los diferentes capítulos de la tesis podemos decir que, en el Capítulo 2, se presentó una introducción a la temática, con las definiciones utilizadas, un esquema general de un control tolerante a fallas, las clasificaciones en distintos tipos de fallas, ya sea desde su origen como de su representación temporal, delimitando las utilizadas en el presente trabajo, y definiciones correspondientes a los tipos de redundancia que podemos implementar en un proceso. El Capítulo 3, se dedicó a los fundamentos de la identificación de sistemas, herramientas matemáticas necesarias para una correcta utilización práctica de los diferentes métodos de detección y diagnóstico de fallas, y utilizado para identificar el sistema de tanques que se dispone en el laboratorio.

A continuación, en el Capítulo 4, se hizo un exhaustivo análisis de los diferentes metodologías en detección, aislamiento y diagnóstico de fallas en esquemas de FDD basados en modelos. Se presentaron los conceptos básicos de redundancia analítica y generador de residuos, y se exploraron diferentes maneras de diseñarlo.

En ese capítulo se arribó a las siguientes conclusiones:

- dada una función de transferencia, estamos en condiciones de diseñar

un generador de residuos basados en espacios de paridad sin ningún conocimiento de su realización en el espacio de estados.

- el generador de residuos generado puede ser extendido a uno basado en observador.
- esta forma basada en observador puede ser aplicado tanto a sistemas discretos como continuos.
- todos los resultados anteriores son aplicables tanto a sistemas SISO, como MIMO.

En el Capítulo 5 se presentó con mayor formalidad la evaluación de residuos. Se indicó como los residuos por sí solos no indican ningún tipo de información relevante si no son evaluados correctamente; por lo que se necesitan al menos tres elementos: un generador de residuos, una función umbral y una matriz de incidencia asociada. Finalmente, en el Capítulo 6, se muestra la estrategia de adaptación y re-acomodación utilizado en el esquema de control tolerante a fallas adoptado, ante fallas abruptas en sensores y actuadores, aplicados a los ejemplos abordados a lo largo de la Tesis.

7.2. Conclusiones de la Tesis

El estudio de las diversas técnicas implicó conocer y dominar las estrategias de diseño de controladores tolerante a falla con fines prácticos, para así poder implementarlas en procesos típicos de la tecnología química como son los sistemas hidráulicos, reactores, entre otros.

Un aporte de la presente tesis fue el esquema de FTC de la Fig. 6.1, el cual resulta ser relativamente simple de implementar en algún sistema de control industrial o a escala de laboratorio. Asimismo se destaca que un esquema similar fue presentado por Noura [52]. Dentro del esquema aquí propuesto, se realizó un análisis de las distintas estrategias de los submódulos del sistema de FTC, haciendo incapie en la detección y aislación de fallas, ya que es un importante campo de investigación en procesos industriales debido a las mejoras que esta disciplina otorga en términos de seguridad y fiabilidad de los procesos.

Se presentaron distintos esquemas basados en modelos que permiten diseñar residuos por medio de redundancia analítica, con el propósito de obtener un módulo de diagnóstico y detección de fallas (FDD): residuos estructurales determinados por medio de ecuaciones de paridad, residuos direccionales provenientes de la factorización estable, y diversos tipos de observadores y bancos conformados por los mismos.

Durante el desarrollo de la Tesis se observó que las ecuaciones de paridad y los generadores basados en observador poseen dinámica similar, o lo que

es más importante: la elección de un vector en el espacio de paridad es equivalente con la selección de una matriz del observador. Entonces, al momento de pensar en diseñar un generador de residuos que permita detectar y aislar fallas debemos tener en claro que podemos diseñar el mismo mediante ecuaciones de paridad o mediante observadores, obteniendo resultados similares en ambos casos. La diferencia se encuentra en la forma en que se implementan ambos métodos: la implementación de los generadores de residuos basados en espacio de paridad utilizan una forma no-recursiva, mientras que los basados en observadores usan una forma recursiva.

Las diferentes estrategias de detección y aislación se ejemplificaron con distintos sistemas: un motor de corriente continua (DC-motor), un sistema de tres tanques con interacción y un tanque continuo agitado (CSTR).

Si bien existe bibliografía que aporta ejemplos con sistemas no lineales, a los que se les aplica FDD basados en modelos para detectar fallas ([52], [25], entre otros), se ha observado escasa referencias en aplicaciones de FDD a CSTR, entre los que se destaca los aportes de Sotomayor y Odloak [70] y Caccavale *et al.* [9].

7.3. Alcances y Futuros Desarrollos

En futuros trabajos, siguiendo con esta línea de investigación se trabajará con un esquema de control tolerante a fallas robusto ([52], [40], [6], [61], entre otros) e integrado conceptos al esquema de diagnóstico aquí utilizado de manera de corregir los desvíos en la performance.

Por otro lado, se comenzará a explorar la utilidad de herramientas modernas como lo son las LMI o el MPC aplicandolas a FTCS. Las LMI¹ surgieron en los años 90, cuando se advirtió que el conjunto de especificaciones robustas en variables de estado encontraban un marco común de formulación, llamada Desigualdades Lineales Matriciales (LMI) (Boyd *et al.*, [8]). Por eso, una de las posibles líneas de investigación futuras es combinar los conceptos ampliamente explorado en esta tesis sumándoles la idea de reformular el problema de control como un problema de optimización convexa.

Por otro lado, debido a la complejidad y el tamaño de las planta industriales modernas han surgido nuevas estrategias de control como lo es el MPC. Como cualquier estrategia de control, el MPC suele ser vulnerable al mal funcionamiento de los sensores y actuadores. En este punto cabe rescatar lo mencionado por Sotomayor y Odloak [70] referente a que la integración de grandes plantas de proceso en un solo controlador MPC centralizado puede aumentar la vulnerabilidad de estos sistemas bajo ocurrencias de anomalías, que pueden degradar significativamente la rendimiento del sistema global de control. El control MPC puede esconder una incipiente falla gra-

¹Linear Matrix Inequalities

dual hasta que la falla en el control se vuelve inevitable. En otros casos, el carácter multivariable del controlador MPC puede amplificar una incidencia local propagándolo a todo el resto del sistema.

Por lo tanto, un tema importante es lograr eficiencia, fiabilidad y seguridad de los procesos a gran escala supervisando el controlador MPC centralizado, es decir, diagnosticar fallas en el sistema de control mientras la planta todavía está funcionando en una región controlable.

Apéndice A

Conceptos básicos utilizados

A.1. Principio de los mínimos cuadrados

Si bien este método fue propuesto por Karl Gauss en 1809 e independiente por Legendre en 1806, a la fecha no ha perdido vigencia, ya que muchas técnicas de identificación de parámetros están centrados en esta aproximación básica.

Para este método, se supone que los parámetros del sistema no cambian rápidamente con el tiempo, asegurando de este modo cierta *estacionariedad* de la planta o los parámetros del proceso. Considere la ecuación de salida medida de un sistema como,

$$\hat{y} = x\theta + \epsilon, \quad (\text{A.1})$$

mientras que la ecuación de salida real del sistema es,

$$y = x\theta, \quad (\text{A.2})$$

donde y es un vector de las salidas reales, \hat{y} es el vector de mediciones afectadas por ruido, θ es el vector de parámetros desconocidos y ϵ representa un vector de ruido, que se asume Gaussiano y tiene media cero.

Es bien conocido ([35], **ver citas de ingeniería básica** entre otros) que el método propone un funcional de costo a minimizar para obtener los parámetros de nuestro sistema dado por,

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \epsilon_k^2 = \frac{1}{2} (\hat{y} - x\theta)^T (\hat{y} - x\theta) \quad (\text{A.3})$$

donde J es un funcional de costo, ϵ el error al tiempo k . A continuación desarrollaremos el funcional y como se logra minimizarlo para un sistema bajo la representación en tiempo discreto.

A.2. Identificación de Sistema Discretos por Mínimos Cuadrados

De acuerdo con Ljung [35], Zanini [79], entre otros para identificar los parámetros de un modelo lineal expresado en ecuaciones en diferencias (Modelo ARMA) se considera la planta real dada por la Ec. (3.12) incluyendo una perturbación o incertidumbre ϵ_k de manera de englobar imperfecciones del modelo lineal. Por lo que se puede reescribir de la forma,

$$y[k+1] = \sum_{i=0}^M b_i u[k-i] + \sum_{i=1}^N a_i y[k-i] + \epsilon_k = x_k^T \theta_k + \epsilon_k \quad (\text{A.4})$$

$$\hat{y}[k+1] = \sum_{i=0}^M \hat{b}_i u[k-i] + \sum_{i=1}^N \hat{a}_i y[k-i] = x_k^T \hat{\theta}_k \quad (\text{A.5})$$

donde se definen los vectores

$$\hat{x}_k = \begin{pmatrix} u[k] \\ \vdots \\ u[k-M] \\ y[k] \\ \vdots \\ y[k-N] \end{pmatrix}, \quad \hat{\theta}_k = \begin{pmatrix} \hat{b}_1 \\ \vdots \\ \hat{b}_M \\ \hat{a}_1 \\ \vdots \\ \hat{a}_M \end{pmatrix}. \quad (\text{A.6})$$

Escribiendo en forma compacta la diferencia entre la salida de la planta y el modelo en el instante $k+1$, habrá una *error de estimación*

$$e_{k+1} = y_{k+1} - \hat{y}_{k+1} \quad (\text{A.7})$$

Si se toman todas las muestras, desde $k=1, \dots, k+1$ se construye un vector de errores de la forma, (**revisar con Astrom, Zanini**)

$$E_{k+1} = \begin{pmatrix} e[k+1] \\ \vdots \\ e[1] \end{pmatrix} = Y_{k+1} - \phi_k \hat{\theta}_k \quad (\text{A.8})$$

donde

$$Y_{k+1} = \begin{pmatrix} y[k+1] \\ \vdots \\ y[1] \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

y

$$\phi_k = \begin{bmatrix} x^T[k] \\ \vdots \\ x^T[0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u[k] & \cdots & u[k-M+1] & y[k] & \cdots & y[k-M] \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u[0] & \cdots & u[-M] & y[0] & \cdots & y[-N] \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

De acuerdo con la Ec. (A.3),

$$J_k = e_k^T e_k \quad (\text{A.11})$$

por lo que se calcula el mínimo error cuadrático en el modelo al derivar con respecto a $\hat{\theta}$,

$$\frac{\partial J_k}{\partial \theta} = 2\phi_k^T Y_k - 2\phi_k^T \phi_k \hat{\theta}_k = 0 \quad (\text{A.12})$$

donde el valor que hace mínimo a J es,

$$\hat{\theta}_k^* = [\phi_k^T \phi_k]^{-1} \phi_k^T Y_k. \quad (\text{A.13})$$

donde $\hat{\theta}_k^*$ son los parámetros estimados de la planta que minimizan el funcional del costo del error. En el Anexo B.1, se extiende la manera de calcular de manera recursiva de calcular los parámetros $\hat{\theta}$.

A.3. Observadores de estado

En ciertas ocasiones, en problemas prácticos algunas de las variables de estado no son físicamente accesibles a través de una medición directa, por lo que resulta necesario estimar estas variables de estado *no medibles*.

La estimación de variables de estado por lo general se denomina observación, y al dispositivo que estima u observa las variables de estado se llama observador de estado. Un observador de estado estima las variables de estado basándose en las mediciones de las variables de salida $y(t)$ y conociendo las variables de control $u(t)$.

Si el observador de estado capta todas las variables de estado del sistema, sin importar si algunas están disponibles para una medición directa, se denomina observador de estado de orden completo; mientras que en ocasiones sólo se requiere la observación de las variables de estado que no se miden, y no de aquellas que también se miden directamente.

Si las variables de salida son medibles y se relacionan en forma lineal con las variables de estado, no necesitamos observar todas las variables de estado, sino solo las $n - m$ variables de estado en las que n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión del vector de salida. Un observador que estima menos de n variables de estado, en donde n es la dimensión del vector de estado, se denomina observador de estado de orden reducido.

La importancia, en el contexto del *control moderno* (citas, consultar a Eduardo), de disponer mediante estimación o medición directa de todas las variables estados de un sistema proviene de la necesidad de contar con ellas para generar un vector de control a través de la realimentación de estados.

DEFINICIÓN A.1 (Observabilidad). *Dado un sistema lineal e invariante en el tiempo que se describe mediante las ecuaciones dinámicas Ec. (2.2), se dice*

que un estado $x(t_0)$ es observable si dada cualquier entrada $u(t)$, existe un tiempo finito $t_f \geq t_0$ tal que el conocimiento de $u(t)$ para $t_0 \leq t \leq t_f$, son suficientes para determinar $x(t_0)$. Si cada estado del sistema es observable para un t_f finito, se dice que el sistema es completamente observable.

Esta es la definición formal de Observabilidad de Kuo, [30]. A continuación expondremos la condición necesaria y suficiente para que el sistema sea observable. Solo es posible diseñar un observador de estado si el sistema satisface la condición de observabilidad.

Teorema A.1 (Condición de observabilidad). *Para que el sistema descrito por las ecuaciones sea completamente observable es condición necesaria y suficiente que la matriz de observabilidad Q de $(n \times nm)$*

$$Q = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{pmatrix} \quad (\text{A.14})$$

tenga rango n donde n es el número de estados y m es la dimensión del vector de salidas $y(t)$.

Dado un proceso lineal invariante en el tiempo descrito por las ecuaciones en espacio de estados Ec(4.18), las cuales recordamos,

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (\text{A.15})$$

asumiendo que la estructura y los parámetros del modelos son conocidos, un observador de estado de orden completo, basado en la medición de las entradas y salidas, es gobernado por,

$$\dot{\tilde{x}}(t) = A\tilde{x}(t) + Bu(t) + K_e e_y(t) \quad (\text{A.16})$$

donde $\tilde{x}(t)$ es el vector de estado estimado, $\tilde{y} = C\tilde{x}(t)$ es la salida estimada y es introducido el término corrector $e_y(t) = y(t) - C\tilde{x}(t)$ y luego,

$$\dot{\tilde{x}}(t) = [A - K_e C] \tilde{x}(t) + Bu(t) + K_e y(t) \quad (\text{A.17})$$

donde K_e indica la matriz de ganancia de realimentación que tiene que ser elegida adecuadamente para lograr un rendimiento deseado del observador. En esta ecuación el último término es la corrección que contiene la diferencia entre la salida medible y y la salida estimada $C\tilde{x}(t)$, el cual reduce las diferencias entre el sistema real y su modelo. Si restamos la Ec.(2.2) con la Ec.(A.17) obtenemos la ecuación de error del observador,

$$\dot{x} - \dot{\tilde{x}}(t) = Ax - A\tilde{x}(t) - K_e(Cx - C\tilde{x}) \quad (\text{A.18})$$

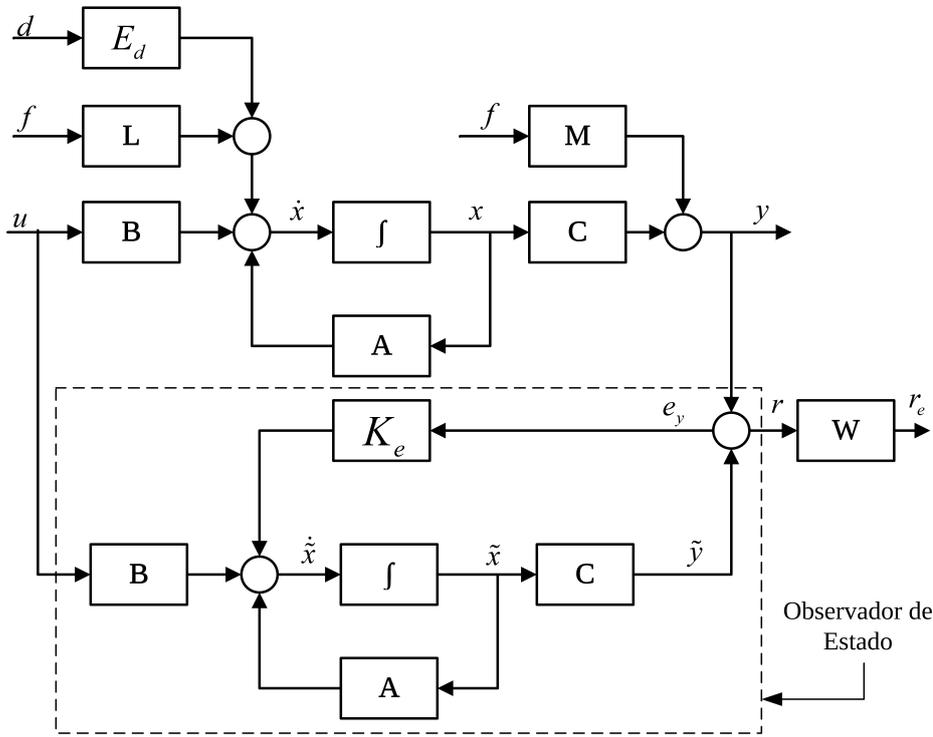


Figura A.1: Proceso y Observador de Estado de Orden completo.

Definiendo el vector de error del observador estados $e(t)$ como el error entre los estados del proceso real y del observado. Esto es,

$$e(t) = x(t) - \tilde{x}(t) \quad (\text{A.19})$$

Assumiendo que se conoce el modelo perfecto del proceso, es decir tanto proceso como modelo poseen los mismos parámetros, la dinámica del error de estado es,

$$\dot{e}(t) = [A - K_e C] e(t) \quad (\text{A.20})$$

Por lo que la matriz $(A - K_e C)$ determina el comportamiento dinámico del mismo. Si esta matriz es estable, el observador es estable, y el error de estado convergerá asintóticamente,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (\text{A.21})$$

para cualquier valor inicial $x(0)$ y $\tilde{x}(0)$, y por lo tanto para cualquier desviación inicial entre estado real y observado, $e(t) \rightarrow 0$ puede ser alcanzado con un diseño correcto de la matriz de realimentación del observador K_e .

Apéndice B

Demostraciones y procedimientos

B.1. Manera recursiva de calcular la matriz de parámetros $\hat{\theta}$.

Existe una manera recursiva de calcular la matriz de parámetros $\hat{\theta}$, la cual no se desarrolla aquí pero puede encontrarse en [79] (Detalle en el Anexo x?).

El algoritmo plantea dos ecuaciones a resolverse simultáneamente en cada muestra:

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} - P_k x_k [\hat{y}_k - y_k] \quad (\text{B.1})$$

$$P_k = P_{k-1} - \frac{P_{k-1} x_k x_k^T P_{k-1}}{1 + x_k^T P_{k-1} x_k} \quad (\text{B.2})$$

donde P_k se define como:

$$P_k^{-1} = \Phi_k^T \Phi_k \quad (\text{B.3})$$

Otra manera de expresar la misma que se encuentra en la bibliografía es,

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} - K_k [y_k - x_k^T \hat{\theta}_{k-1}] \quad (\text{B.4})$$

$$K_k = \frac{P_k x_k}{1 + x_k^T P_k x_k} \quad (\text{B.5})$$

$$P_{k+1} = P_k - K_k x_k^T P_k \quad (\text{B.6})$$

B.2. Procedimiento para obtener el Filtro de Beard and Jones

1. Sea μ el primer entero positivo que satisface $CA^{\mu-1}l_i \neq 0$. Encontrar \hat{K}_e tal que

$$A^\mu l_i - \alpha l_i^0 = \hat{K}_e CA^{\mu-1} l_i. \quad (\text{B.7})$$

donde $l_i^0 \in l_i \oplus Al_i \oplus A^2 l_i \oplus \dots \oplus A^{\mu-1} l_i$, siendo \oplus el operador de suma directa.

Esta elección de \hat{K}_e satisface la condición (i) de la Def. 4.4

Notar que $Q_f = l_i \oplus Al_i \oplus A^2 l_i \oplus \dots \oplus A^{\mu-1} l_i$.

2. Encontrar un operador lineal T , tal que,

$$\begin{aligned} TCQ_f &= 0 \text{ donde } T : Y \rightarrow Y \\ d(\text{Ker}(T)) &= 1 \quad d(\text{Ker}(T)) = m - 1 \end{aligned}$$

3. Sea W_f el subespacio no-observable de $(TC, A - \hat{K}_e C$.

Notar que W_f contiene a Q_f . Luego, si $d(W_f) = v$, existe un único vector generador g que satisface,

$$\text{i) } CA^k g = 0 \text{ con } k = 0, 1, \dots, v - 2$$

ii) $CA^{v-1} g = CQ_f$ Luego el conjunto $g, Ag, \dots, A^{v-1} g$ es un base para W_f .

4. Puede verse que el grado del polinomio mínimo asociado con W_f es v . Luego $\Psi(\lambda)$ es el polinomio mínimo para W_f con los autovalores deseados $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, v$

$$\Psi(\lambda) = \prod_{i=1}^v (\lambda - \lambda_i) = \lambda$$

Luego, D_1 se obtiene resolviendo,

$$D_1 C Q_f = \Psi(A) g \quad (\text{B.8})$$

satisface los autovalores asignados de W_f , y consecuentemenet de Q_f .

5. Luego encontrar D_2 tal que $(A - D_1 C - D_2 TC)$ tenga los restantes $n - v$ autovalores en las ubicaciones deseadas. Esto completa los autovalores requeridos, la condición (ii) de la Def. 4.4, y luego

$$D = D_1 - D_2 T$$

Apéndice C

Artículos Publicados

Durante el desarrollo de esta tesis de maestría se presentaron a diversos congresos resultados que fueron obteniéndose a lo largo del desarrollo de la misma. A continuación se presenta un listado de los mismos:

1. M.F. Picó and E.J. Adam. *Comparing fault detection and isolation methods in a laboratory experimental servomotor*. Caip'2011 - 10° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos. Girona, España. 30 de Mayo al 3 de Junio de 2011.
2. M. F. Picó and E. J. Adam. *Advantages in residual methods for fault detection and isolation problem*. XIV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC 2011. Oro Verde, Entre Ríos, Argentina. 16 al 18 de Noviembre de 2011.
3. M. F. Picó and E. J. Adam. *Control Tolerante a Fallas en un Sistema de Tanques Aplicando Redundancia Analítica en el Diagnóstico de Fallas*. CIETA 2012 - IX Congreso Internacional Electrónica y Tecnologías de Avanzada. 7 al 10 de Noviembre de 2012 - Universidad de Pamplona, Colombia.
4. M. F. Picó and E. J. Adam. *Diagnóstico de fallas en un CSTR usando banco de observadores* XV Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control RPIC 2013. San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. 16 al 20 de Setiembre de 2013.
5. M. F. Picó and E. J. Adam. *Control Tolerante a Fallas en un CSTR utilizando banco de observadores para el diagnóstico de fallas*. CAIQ'2013 - VII Congreso Argentino de Ingeniería Química. Rosario, Argentina. 20 al 23 de Octubre 2013.
6. M. F. Picó and E. J. Adam. *Control Tolerante a Fallas utilizando Bancos de Observadores para la detección de fallas: Aplicación a un sistema*

de tres tanques interconectados. II Congreso Argentino de Ingeniería
- AADECA 2014 XXIV Congreso Argentino de Control Automático.
Buenos Aires, 27 al 29 de Octubre de 2014.

Bibliografía

- [1] E. J. Adam. *Instrumentación y Control de Procesos*. Ediciones UNL, ISBN 978-987-657-284-2, 2011.
- [2] R. V. Beard. Failure accomodation in linear systems through self-organization. report mtv-71-1. *Man Vehicle Laboratory, MIT*, 1971.
- [3] C.M. Belcastro. Application of fault detection, diagnosis and reconfiguration of a heat exchanger. *IEEE Control System Magazine*, 18(3):52–63, 2001.
- [4] Bismarckstr-Amira-GmbH. Documentation of the three-tank system. In *65, D-47057*, Duisburg, Germany, 1994.
- [5] M. Blanke, C. Frei, F. Kraus, R.J. Patton, and M. Staroswiecki. What is fault-tolerant control? *In Proceedings of the 4th IFAC symposium on fault detection, supervision and safety technical process*, pages 40–51, 2000.
- [6] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. *Diagnosis and Fault-Tolerant Control Systems*. Springer, 2006.
- [7] M. Blanke, M. Staroswiecki, and N.E. Wu. Concepts and methods in fault tolerant control. *In Proceedings of the 2001 American control conference*, pages 2606–2620, 2001.
- [8] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 1994.
- [9] F. Caccavale, M. Iamarino, F. Pierri, and V. Tufano. *Control and Monitoring of Chemical Batch Reactors*. Springer, 2011.
- [10] P.R. Chandler. Self-repairing flight control system reliability and maintainability program. executive overview. *In Proceedings of the IEEE national aerospace and electronics conference*, pages 586–590, 1984.

- [11] E Chow and Willsky A. Analytical redundancy and the design of robust failure systems. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 29(7):603–614, 1984.
- [12] R. N. Clark. Instrument fault detection. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, 14:456–465, 1978.
- [13] R. N. Clark. A simplified instrument failure detection scheme. *IEEE Trans. Aerospace Electron. Syst.*, 14:558–563, 1978.
- [14] S.X. Ding. *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Springer-Verlag, 2008.
- [15] I. Eckerman. *Chemical industry and public health. Bhopal as an example. Master of Public Health. Essay*. Nordic School of Public Health, Göteborg, Sweden, 2001.
- [16] C. Edwards, T. Lombaerts, and Hafid Smaili (Eds.). *Fault Tolerant Flight Control - A Benchmark Challenge*. Lectures Notes in Control and Information Sciences - Springer, 2010.
- [17] J.S. Eterno, J.L. Weiss, D. P. Looze, and A.S. Willsky. Design issues for fault tolerant restructurable aircraft control. *In Proceedings of the 24th IEEE conference on decision and control*, pages 900–905, 1985.
- [18] P. M. Frank. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge-based redundancy – a survey and some new results. *Automatica*, 26(3):459–474, 1990.
- [19] J. Gertler. *Fault detection and diagnosis in engineering systems*. Marcel Dekker, Inc., 1998.
- [20] J. Gertler and D. Singer. A new structural framework for parity equation-based failure detection and isolation. *Automatica*, 26:381–288, 1990.
- [21] B. Heiming and J. Lunze. De?nition of the three-tank benchmark problem for controller recon?guration. *In In Proceedings of the European Control Conference*, Karlsruhe, Germany, 1999.
- [22] M. Hou and P. C. Müller. Design of observers for linear systems with unknown inputs. *IEEE Trans. On Automatic Control*, 37(6):871–875, 1992.
- [23] C. S. Hsieh. Performance gain margins of the two-stage lq reliable control. *Automatica*, 38(11):1985–1990, 2002.

- [24] R. Isermann. Model-based fault detection and diagnosis - status and applications. *Annual Reviews in Control*, 29:71–85, 2005.
- [25] R. Isermann. *Fault-Diagnosis System*. Springer, 2006.
- [26] R. Isermann and P. Balle. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes. *Control Engineering Practice*, 5(5):653–662, 1997.
- [27] J. Jiang and Q. Zhao. Design of reliable control systems possessing actuator redundancies. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 23(4):709–718, 2000.
- [28] H. L. Jones. *Failure detection in linear systems. Ph.D.thesis*. Department of Aeronautics and Astronautics, MIT, 1973.
- [29] D. Koeniga, S. Nowakowski, and T. Cecchin. An original approach for actuator and component fault detection and isolation. In *In 3rd IFAC Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for Technical Processes*, pages 95–105, Hull, UK, 1997.
- [30] B. C. Kuo. *Automatic Control Systems*. Prentice Hall, 1995.
- [31] Gérard Le Lann. An analysis of the ariane 5 flight 501 failure-a system engineering perspective. In *Engineering of Computer-Based Systems, 1997. Proceedings., International Conference and Workshop on*, pages 339–346. IEEE, 1997.
- [32] S. Leonhardt and M. Ayoubi. Methods of fault diagnosis. *Control Eng. Pract.*, pages 683–692, 1997.
- [33] Y.W. Liang, D.C. Liaw, and T.C. Lee. Reliable control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 45(4):706–710, 2000.
- [34] F. Liao, J.L. Wang, and G.H. Yang. Reliable robust flight tracking control. an lmi approach. *IEEE Transaction on Control System Technology*, 10(1):76–89, 2002.
- [35] Lennart Ljung. *System Identification: Theory for the User*. Prentice Hall, 1999.
- [36] D.P. Looze, J.L. Weiss, J.S. Eterno, and N.M. Barrett. An automatic redesign approach for restructurable control systemsonline multiple-model-based fault diagnosis and accommodation. *IEEE Control System Magazine*, 5:16–22, 1985.

- [37] J. Lunze, J. Askari-Maranani, A. Cela, P.M. Frank, A.L. Gehin, and B. Heiming. Three-tank control reconfigurable. In *Control of complex systems*, pages 241–283, 2001.
- [38] W. Luyben. *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*. Mc Graw Hill, 1990.
- [39] J.M. Maciejowski and C.N. Jones. Mpc fault tolerant flight control case study: Flight 1982. In *Proceedings of the 5th IFAC symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes*, pages 121–126, 2003.
- [40] M. Mahmoud, J. Jiang, J. Lunze, and Y. Zhang. *Active Fault Tolerant Control*. Springer, 2003.
- [41] T. Matsubara. Ariane 5: who dunnit? *IEEE Software*, pages 15–16, 1997.
- [42] P.S. Maybeck and R.D. Stevens. Reconfigurable flight control via multiple model adaptive control methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 27(3):470–479, 1991.
- [43] J. McMahan. *Flight 1080*. Air Line Pilot, 1978.
- [44] P. S. Min. *Detection of Incipient Failures in Dynamic Systems*. Ph.D.thesis. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan, 1987.
- [45] P. S. Min. Robust application of beard-jones detection filter. *Lecture Notes in Control and Information Sciences. Advances in Computing and Control*, 130:162–173, 1989.
- [46] D.D. Moerder, N. Haylo, J.R. Broussard, and A.K. Caglayan. Application of precomputed control laws in a reconfigurable aircraft flight control system. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 12(3):325–333, 1989.
- [47] J. Monaco, D. Ward, R. Barron, and R. Bird. Implementation and flight test assessment of an adaptive, reconfigurable flight control system. In *Proceedings of 1997 AIAA Guidance, navigation and control conference*, pages 1443–1454, 1997.
- [48] R. Montoya, W. Howell, W. Bundick, A. Ostroff, R. Hueschen, and C. Belcastro. Restructurable controls. *Tech. Report NASA CP-2277. Proceedings of a workshop held at NASA*, 1983.

- [49] J. D. Morningred, B. E. Paden, D. E. Seborg, and D. A. Mellichamp. An adaptive nonlinear predictive controller. *in Proc. Amer. Contr. Conf.*, 2:1614–1619, 1990.
- [50] M.R. Napolitano, C. Neppach, V. Casdorff, and S. Naylor. Neural-network-based scheme for sensor failure detection, identification, and accommodation. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 18(6):1280–1286, 1995.
- [51] H. Noura, D. Sauter, F. Hamelin, and D. Theilliol. Fault-tolerant control in dynamic systems: Application to a winding machine. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(1):33–49, 2000.
- [52] H. Noura, D. Theilliol, J.C. Ponsart, and A. Chamseddine. *Fault-Tolerant Control Systems*. Springer, 2009.
- [53] K. Ogatta. *Modern Control Engineering*. Prentice Hall, 1997.
- [54] M. Omana and J. H. Taylor. Robust fault detection and isolation using a parity equation implementation of directional residuals. In *IEEE Adv. Process Control Applic. for Industry Workshop (APC2005)*, 2005.
- [55] United States. President’s Commission on the Accident at Three Mile Island. Excerpts from report of president’s commission on the accident at three mile island. *IEEE - Technology and Society*, 7(28):9–11, 1979.
- [56] R. J. Patton and J. Chen. Observer-based fault detection and isolation: Robustness and applications. *Control Eng. Practice*, 5(5):671–682, 1997.
- [57] R.J. Patton. Fault tolerant control: The 1997 situation. In *Proceedings of 3rd IFAC symposium on fault detection, supervision and safety for technical processes*, pages 1033–1055, 1997.
- [58] M. F. Picó and E. J. Adam. Advantages in residual methods for fault detection and isolation problem: application in laboratory experimental dc-motor. In *XIV Reunión de trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2011*, Oro Verde, Argentina, 16-18 Noviembre 2011.
- [59] M. F. Picó and E. J. Adam. Control tolerante a fallas en un CSTR utilizando banco de observadores para el diagnóstico de fallas. In *VII Congreso Argentino de Ingeniería Química, CAIQ’2013*, Rosario, Argentina, 20-23 Octubre 2013.
- [60] M. F. Picó and E. J. Adam. Diagnóstico de fallas en un CSTR usando banco de observadores. In *XV Reunión de trabajo en Procesamiento de la Información y Control, RPIC 2013*, San Carlos de Bariloche, Río Negro, 16-20 Setiembre 2013.

- [61] M.F. Picó and E.J. Adam. Control tolerante a fallas en un sistema de tanques aplicando redundancia analítica en el diagnóstico de fallas. In *CIETA 2012. IX Cong. Int. Electrónica y Tecnologías de Avanzada*, Pamplona, Colombia, 7-10 Nov. 2012.
- [62] M.M. Polycarpou and A.J. Helmicki. Learning methodology for failure detection and accommodation. *IEEE Control System Magazine*, 15(3):16–24, 1995.
- [63] J.E. Potter and M.C. Suman. Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments. *Integrity in Electronic Flight Control Systems*, AGARDOGRAPH-224:15.11–15.25, 1977.
- [64] V. Ramana-Dhara. The bhopal gas leak: Lessons from studying the impact of a disaster in a developing nation.
- [65] H.E. Rauch. Autonomous control reconfiguration. *IEEE Control System Magazine*, 15(6):37–48, 1995.
- [66] C. N. Rautenberg and C. E. Dáttellis. *Control Lineal Avanzado y Control Óptimo*. Asociación Argentina de Control Automático (AADECA), 2004.
- [67] M. Rogovin. Three mile island: A report to the commissioners and to the public. Technical report, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA), 1979.
- [68] T. Söderström and P. Stoica. *System Identification*. Prentice Hall, 1989.
- [69] E. D. Sontag. *Mathematical Control Theory. Deterministic Finite Dimensional System*. Springer - Verlag, 1990.
- [70] O.A.Z. Sotomayor and D. Odloak. Observer-based fault diagnosis in chemical plants. *Chemical Engineering Journal*, 112:93–108, 2005.
- [71] M. Steinberg. Historical overview of research in reconfigurable flight control. *Proceeding of IMechE, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 219:263–275, 2005.
- [72] R.F. Stengel. Intelligent failure-tolerant control. *IEEE Control System Magazine*, 11(4):14–23, 1991.
- [73] D. Theilliol, H. Noura, and J.C. Ponsart. Fault diagnosis and accommodation of a three-tank system based on analytical redundancy. *ISA Transactions*, 41(3):365–382, 2002.

- [74] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. part i: Quantitative model-based methods. *Computers and chemical engineering*, 27:293–311, 2003.
- [75] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. part ii: Qualitative models and search strategies. *Computers and chemical engineering*, 27:313–326, 2003.
- [76] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S.N. Kavuri. A review of process fault detection and diagnosis. part iii: Process history based methods. *Computers and chemical engineering*, 27:327–346, 2003.
- [77] E.C Viswanadham and N. Taylor J. H. Luce. A frequency domain approach to fdi with application to ge-21 turbine engine control system. *Control -theory and advanced technology*, 3(12):47–72, 1987.
- [78] G.G. Yen and L.W. Ho. Online multiple-model-based fault diagnosis and accommodation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 50(2):296–312, 2003.
- [79] A. Zanini. *Teoría de Control para Procesos Industriales*. AADECA, 2006.
- [80] Y.M. Zhang and J. Jiang. Integrated active fault-tolerant control using imm approach. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(4):1121–1235, 2001.
- [81] Y.M. Zhang and J. Jiang. An active fault-tolerant control against partial actuator failure. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 149(1):95–104, 2002.
- [82] Y.M. Zhang and J. Jiang. Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems. *Annual Reviews in Control*, 32(2):229–252, 2008.