

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Detección de Fallas Mediante Sistemas Takagi-Sugeno: Aplicación en
una Central Termoeléctrica**

presentada por
Ing. Jesús Reyes Martínez

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Codirector de tesis
M.C. Guadalupe Madrigal Espinosa

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Subdirección Académica

Departamento de Ingeniería Electrónica

TESIS DE MAESTRÍA EN CIENCIAS

**Detección de Fallas Mediante Sistemas Takagi-Sugeno:
Aplicación en una Central Termoeléctrica**

presentada por
Ing. Jesús Reyes Martínez

Director de tesis
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Codirector de tesis
M.C. Guadalupe Madrigal Espinosa

Jurado:

Dr. Manuel Adam Medina – Presidente
Dr. Juan Reyes Reyes – Secretario
Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza – Vocal
M.C. Guadalupe Madrigal Espinosa – Vocal suplente

Cuernavaca, Morelos, México. Julio de 2016.

Cuernavaca, Mor., 14 de junio de 2016.

OFICIO No. DIE/124/2016

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

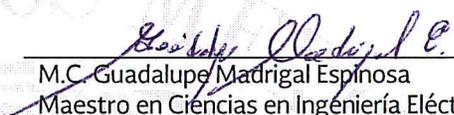
Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Jesús Reyes Martínez** con número de control **M14CE078** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado, "**Detección de Fallas Mediante Sistemas Takagi-Sugeno: Aplicación en una Central Termoeléctrica**" y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

CODIRECTOR DE TESIS



Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
Doctor en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5505019



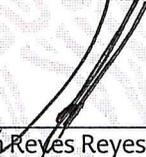
M.C. Guadalupe Madrigal Espinosa
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica
Cédula profesional 2579043

REVISOR 1



Dr. Manuel Adam Medina
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5992003

REVISOR 2



Dr. Juan Reyes Reyes
Doctor en Ciencias en la Especialidad de
Control Automático
Cédula profesional 4214833

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Estudiante
Expediente

CMAZ/Irr

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 16 de junio de 2016
OFICIO No. SAC/211/2016

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. JESÚS REYES MARTÍNEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Detección de Fallas Mediante Sistemas Takagi-Sugeno: Aplicación en una Central Termoeléctrica"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"CONOCIMIENTO Y TECNOLOGIA AL SERVICIO DE MEXICO"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



SEP TecNM
CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA

C.p. Lic. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
Expediente

GVGR/mcr

Dedicatoria

Dedicado a mis padres, hermanos y a la profesora Clara Isela Gómez Rosales(†).

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por la vida que me ha otorgado y por todas esas personas buenas que ha puesto en mi camino.

Agradezco a mis padres Francisco Reyes y Gertrudis Martínez por el amor que me han otorgado, su apoyo, comprensión, paciencia, por la humildad que me han transmitido para poder lograr mis metas y por todas las oportunidades que me han brindado para poder llegar hasta estas instancias.

A la profesora Clara Isela Gómez Rosales(†) por todo el apoyo, cariño, consejos, enseñanzas y motivación para salir adelante, por ser otra madre para mi, la cual llevo en el corazón.

A mis hermanos Micaela, Camelia y Wilfrido por todo y cada uno de los momentos que han estado a mi lado, por sus consejos y apoyo brindado siempre.

A mis sobrinos Angeles, Mariel, Francisco, Jeremy y Josue por la confianza y el cariño que me demuestran en cada momento que pasamos juntos.

A mis asesores al Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza y al M.C. Guadalupe Madrigal Espinosa por la confianza, apoyo, consejos, conocimientos y aportaciones brindadas en cada momento para el desarrollo de este trabajo de tesis. Por su amistad brindada y sobre todo por ayudarme a cumplir esta meta.

A mis revisores el Dr. Manuel Adam Mediana y al Dr. Juan Reyes Reyes por sus comentarios, observaciones, apoyos, por ayudarme a ser más seguro y creer en mi y sobre todo por su amistad brindada en cada momento.

Agradezco a la Dra. Gloria Osorio, la C. Lorena Ruiz, Dr. Carlos Daniel, Dr. Enrique Quintero, Dr. Ricardo Fabricio, Dr. Vicente Guerrero, Dr. Jaime Arau y al Dr. Francisco por el apoyo brindado durante el desarrollo de mi formación académica en CENIDET.

A la M.D.U. Antonia Zamudio Radilla, al Ing. Anatolio Alegría Rosario y a mis amigos: Montserrat Alegría, Susana Sainz, Didhier Montiel y Juan Joachin, por apoyarme en uno de los momentos más difíciles en este proceso.

A mis compañeros de CENIDET: Ivonne, Patricia, Reyna, Adriana, Iris , Amairani, Hugo, Oscar, Sual, Adrian, Cesar, Daniel, Carlos, Emanuel, Diego, Luis, Abraham, Ricardo, Pablo, Moises, Leonardo Orozco, Leonardo Daniel y muchos más compañeros por su apoyo y por hacer amena la estancia durante este periodo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para emprender y culminar mis estudios de maestría.

Agradezco a la comunidad CENIDET por la amabilidad y atención brindada durante este periodo.

Resumen

En esta tesis se presenta el diseño y la simulación de dos sistemas de detección y localización de fallas en sensores para el generador de vapor de una central termoeléctrica. El primer sistema de detección y localización de fallas está basado en un modelo en representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal de Åström. El segundo sistema de detección y localización de fallas en sensores, está basado en observadores no lineales.

Se presenta la adaptación del modelo no lineal del generador de vapor de la central termoeléctrica basado en las pruebas de observabilidad realizadas.

Posteriormente para el sistema de detección y localización de fallas basado en la representación Takagi-Sugeno, se diseñaron dos observadores Takagi-Sugeno como generadores de residuo. En el segundo sistema de detección y localización de fallas se diseñaron dos observadores de alta ganancia como generadores de residuo.

Se plantea la estimación del nivel de agua en el domo mediante las señales estimadas de los observadores, para ambos sistemas de detección y localización de fallas.

Finalmente se presentan simulaciones de los sistemas de detección y localización de fallas. Las simulaciones se realizaron con falla en el sensor de presión en el domo, falla en el sensor de potencia eléctrica generada y falla en el sensor de nivel en el domo. Se añadió ruido de medición a cada una las señales de los sensores.

Abstract

This thesis it is presented the design and simulation of two fault detection and isolation system in sensors for the unit boiler-turbine. The first fault detection and isolation system it is based with the Takagi-Sugeno representation of Åström nonlinear model. The second fault detection and isolation in sensors, it is based in nonlinear observers.

It is presented the adaptation of nonlinear model of unit boiler-turbine, based on tests of observability.

Them for fault detection and isolation system based in the Takagi-Sugeno representation, designed two Takagi-Sugeno observers as generator of residue. In the second fault detection and isolation system we designed high gain observers as generator of residue.

It is proposes the estimation of level drum through the estimated signals of observers, for both fault detection and isolation systems.

Finally, it is presented simulations of the fault detection and isolation system. The simulations performed with fault in pressure drum sensor, fault in power out sensor and fault in level drum sensor. It is added noise measurement in each sensor signal.

Índice general

| Contenido | Página |
|--|-----------|
| Índice de figuras | XX |
| Índice de tablas | XXI |
| Notación | XXIII |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Planteamiento del problema | 2 |
| 1.1.1. Problemática asociada con el lazo de control de agua de alimentación | 3 |
| 1.1.2. Problemática asociada con el lazo de control de combustible | 4 |
| 1.1.3. Planteamiento propuesto | 6 |
| 1.2. Justificación | 6 |
| 1.3. Objetivos | 7 |
| 1.3.1. Objetivo General | 7 |
| 1.3.2. Objetivos Particulares | 7 |
| 1.4. Hipótesis | 7 |
| 1.5. Alcances | 7 |
| 1.6. Aportaciones | 8 |
| 1.7. Estado del arte | 8 |
| 1.7.1. Modelos Takagi-Sugeno en centrales termoeléctricas. | 8 |
| 1.7.2. Observadores en centrales termoeléctricas. | 9 |
| 1.7.3. Detección de fallas en sensores | 10 |
| 2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica | 11 |
| 2.1. Modelo matemático de la central termoeléctrica | 11 |
| 2.2. Estudio de la observabilidad del modelo de Åström | 14 |
| 2.2.1. Teoría de observabilidad en sistemas lineales | 15 |
| 2.2.2. Teoría de observabilidad de un sistema no lineal | 16 |
| 2.2.3. Observabilidad en el modelo de Åström | 17 |
| 2.3. Construcción del modelo Takagi-Sugeno del generador de vapor | 21 |
| 2.3.1. Teoría de modelos Takagi-Sugeno | 21 |
| 2.3.2. Construcción del modelo Takagi-Sugeno para el generador de vapor | 25 |

| | |
|---|------------|
| 2.4. Conclusiones del capítulo 2 | 27 |
| 3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor. | 29 |
| 3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica . . | 29 |
| 3.1.1. Teoría del diseño de observadores | 30 |
| 3.1.2. Diseño de observadores Takagi-Sugeno para el generador de vapor de la central termoeléctrica | 37 |
| 3.1.3. Diseño de observadores de alta ganancia para el generador de vapor de la central termoeléctrica | 42 |
| 3.2. Diseño del control para el generador de vapor | 45 |
| 3.2.1. Linealización del modelo no lineal de Åström | 46 |
| 3.2.2. Diseño del controlador de presión | 47 |
| 3.2.3. Diseño del controlador de nivel | 50 |
| 3.3. Conclusión del capítulo 3 | 52 |
| 4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor | 53 |
| 4.1. Teoría de sistemas de detección de fallas | 53 |
| 4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor | 58 |
| 4.2.1. Diseño de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno | 58 |
| 4.2.2. Simulaciones y resultados de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno | 63 |
| 4.2.3. Diseño del sistema de detección y localización de fallas mediante observadores de alta ganancia | 80 |
| 4.2.4. Simulaciones y resultados de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores de alta ganancia | 83 |
| 4.3. Conclusiones del capítulo 4 | 100 |
| 5. Conclusiones | 103 |
| 5.1. Originalidad | 103 |
| 5.2. Actividades realizadas | 103 |
| 5.3. Demostración de la hipótesis | 104 |
| 5.4. Trabajos futuros | 105 |
| Bibliografía | 105 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | <i>Diagrama esquemático de una central termoeléctrica.</i> | 2 |
| 1.2. | <i>Diagrama del lazo de control de agua de alimentación.</i> | 4 |
| 1.3. | <i>Diagrama del lazo de control del flujo de combustible.</i> | 5 |
| 3.1. | <i>Región LMI.</i> | 33 |
| 3.2. | <i>Región circular LMI.</i> | 33 |
| 3.3. | <i>Región cónica LMI.</i> | 34 |
| 3.4. | <i>Diagrama a bloques del control de presión.</i> | 48 |
| 3.5. | <i>Diagrama a bloques del control de nivel.</i> | 50 |
| 4.1. | <i>Generador de residuo con observador.</i> | 55 |
| 4.2. | <i>Residuo, síntoma y umbral.</i> | 55 |
| 4.3. | <i>Esquema de p observadores dedicados para p fallas en sensores.</i> | 57 |
| 4.4. | <i>Esquema de p observadores generalizados para p fallas en sensores.</i> | 58 |
| 4.5. | <i>Diagrama a bloques del sistema FDI mediante observadores T-S.</i> | 59 |
| 4.6. | <i>Convergencia de los observadores T-S.</i> | 64 |
| 4.7. | <i>Apertura de la válvula de vapor sobrecalentado generado.</i> | 66 |
| 4.8. | <i>Señales de salidas con un funcionamiento nominal del sistema.</i> | 67 |
| 4.9. | <i>Residuos generados con un funcionamiento nominal del sistema.</i> | 68 |
| 4.10. | <i>Señales de salida con falla en el sensor de presión.</i> | 70 |
| 4.11. | <i>Residuos generados con falla en el sensor de presión.</i> | 71 |
| 4.12. | <i>Señales de salida con falla en el sensor de potencia.</i> | 73 |
| 4.13. | <i>Residuos generados con falla en el sensor de potencia.</i> | 74 |
| 4.14. | <i>Señales de salida con falla en el sensor de nivel.</i> | 76 |
| 4.15. | <i>Residuos generados con falla en el sensor de nivel.</i> | 77 |
| 4.16. | <i>Residuos generados.</i> | 79 |
| 4.17. | <i>Diagrama a bloques del sistema FDI mediante observadores de alta ganancia.</i> | 81 |
| 4.18. | <i>Convergencia de los observadores HG.</i> | 84 |
| 4.19. | <i>Apertura de la válvula de vapor sobrecalentado generado.</i> | 86 |
| 4.20. | <i>Señales de salidas con un funcionamiento nominal del sistema.</i> | 87 |
| 4.21. | <i>Residuos generados con un funcionamiento nominal del sistema.</i> | 88 |
| 4.22. | <i>Señales de salidas con falla en el sensor de presión.</i> | 90 |
| 4.23. | <i>Residuos generados con falla en el sensor de presión.</i> | 91 |

| | |
|--|----|
| 4.24. <i>Señales de salida con falla en el sensor de potencia.</i> | 93 |
| 4.25. <i>Residuos generados con falla en sensor de potencia.</i> | 94 |
| 4.26. <i>Señales de salida con falla en el sensor de nivel.</i> | 96 |
| 4.27. <i>Residuos generados con falla en el sensor de nivel.</i> | 97 |
| 4.28. <i>Residuos generados.</i> | 99 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. <i>Nomenclatura para el modelo de Åström.</i> | 12 |
| 4.1. <i>Matriz de firma de fallas.</i> | 56 |
| 4.2. <i>Umbrales para residuos T-S.</i> | 69 |
| 4.3. <i>Firma de falla en sensor de presión en el domo.</i> | 72 |
| 4.4. <i>Firma de falla en sensor de potencia eléctrica generada.</i> | 75 |
| 4.5. <i>Firma de falla en sensor de nivel de agua en el domo.</i> | 78 |
| 4.6. <i>Matriz de firma de fallas FDI T-S.</i> | 78 |
| 4.7. <i>Firma de falla.</i> | 80 |
| 4.8. <i>Umbrales para residuos HG.</i> | 89 |
| 4.9. <i>Firma de falla en sensor de presión en el domo.</i> | 92 |
| 4.10. <i>Firma de falla en sensor de potencia eléctrica generada.</i> | 95 |
| 4.11. <i>Firma de falla en sensor de nivel de agua en el domo.</i> | 98 |
| 4.12. <i>Matriz de firma de fallas FDI HG.</i> | 98 |
| 4.13. <i>Firma de falla.</i> | 99 |

Notación

| | | |
|---------------|---|---|
| t | — | Tiempo. |
| s | — | Segundos. |
| m | — | Metros. |
| rpm | — | Revoluciones por minuto. |
| kg/cm^2 | — | Kilogramos por centímetros cuadrados (unidad de presión). |
| MW | — | Mega watts. |
| $^{\circ}C$ | — | Grados celsius. |
| x_1, P_D | — | Presión en el domo. |
| x_2, P_O | — | Potencia eléctrica generada. |
| x_3 | — | Densidad en el domo. |
| x_w | — | Nivel de agua en el domo. |
| α_{cs} | — | Razón de evaporación. |
| q_e | — | Calidad del vapor. |
| u_1 | — | Apertura de la válvula de flujo de combustible. |
| u_2 | — | Apertura de la válvula de flujo de vapor. |
| u_3 | — | Apertura de la válvula de flujo de agua de alimentación. |
| \mathbb{R} | — | Números reales. |
| ω | — | Variables programadas. |
| η | — | Funciones de ponderación. |
| e | — | Error. |
| \dot{x} | — | Derivada del estado con respecto al tiempo. |
| \hat{x} | — | Estimación del estado. |
| x^T | — | Vector de estado transpuesto. |
| ∂ | — | Derivada parcial. |
| $\phi(x)$ | — | Función de transformación. |
| \dot{x} | — | Derivada del estado con respecto al tiempo. |
| \hat{x} | — | Estimación del estado. |
| \mathcal{O} | — | Observador. |
| Σ | — | Sumatoria. |

Acrónimos

| | | |
|------------|---|--|
| NL | — | No lineal. |
| T-S | — | Takagi-Sugeno. |
| HG | — | Alta ganancia (por su acrónimo en inglés). |
| FDI | — | Detección y localización de fallas (por su acrónimo en inglés). |
| GOS | — | Esquema de observadores generalizados (por su acrónimo en inglés). |
| DOS | — | Esquema de observadores dedicados (por su acrónimo en inglés). |
| <i>det</i> | — | Determinante. |

Capítulo 1

Introducción

La ingeniería de control automático cubre varias disciplinas técnicas y científicas, incluyendo las técnicas de medición, principios de actuación, sistemas de información y microcomputadoras y los métodos de control automático basados en la teoría de sistemas.

Las funciones de control automático se implementan en varios niveles. En el nivel bajo se encuentra el control anticipativo, continuo, secuencial y de retroalimentación continua. En el nivel medio se encuentra el control adaptativo, la supervisión y manejo de fallas. En el nivel alto se encuentra la optimización de la planta, la programación y el funcionamiento del interfaz humano-máquina (Isermann, 2011).

Debido a que los seres humanos se eliminan de la manipulación directa de los procesos, la operación de los procesos técnicos requiere una supervisión cada vez más avanzada y el control automático debe funcionar de una manera fiable y segura. El diseño de las funciones adecuadas para sistemas de control continuo y discreto sigue los principios básicos, así como soluciones hechas a la medida del proceso, las cuales provienen de las consideraciones teóricas para sistemas y el control.

La automatización de los procesos mediante lazos de control automático, si bien ha permitido liberar a los operadores humanos de su control y operación manual, no los ha inmunizado frente a las fallas.

Los sistemas de detección de fallas son importantes debido a que permiten detectar fallas en sensores, actuadores y equipos, que son las que se manejan en los procesos. La detección de fallas en procesos, actuadores y sensores se realiza mediante el uso de las diferentes señales medibles dependientes. Las dependencias se expresan mediante modelos matemáticos de los procesos (Isermann, 2005).

1.1. Planteamiento del problema

Una central termoeléctrica de tipo vapor es una instalación industrial en la que la energía química del combustible se transforma en energía calorífica para producir vapor, éste se conduce a la turbina, donde su energía cinética se convierte en energía mecánica, la que se transmite al generador para producir energía eléctrica.

Estas centrales utilizan el poder calorífico de combustibles derivados del petróleo (combustóleo, diésel y gas natural), para calentar agua y producir vapor con temperaturas del orden de los $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presiones entre 120 y 170 kg/cm^2 , para impulsar las turbinas que giran a 3600 rpm .

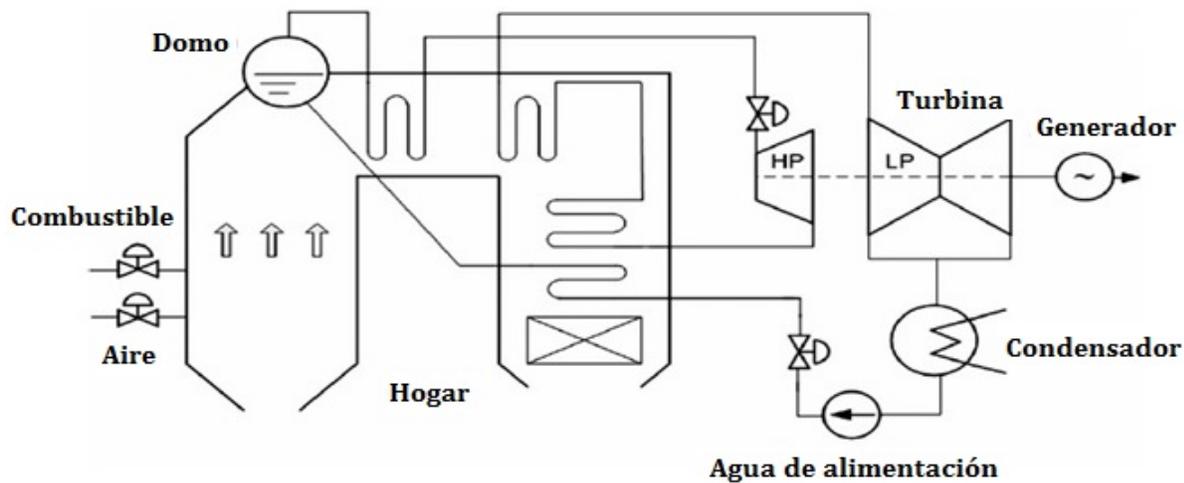


Figura 1.1: Diagrama esquemático de una central termoeléctrica.

En la Figura (1.1) (Li *et al.*, 2012) se muestra el diagrama de un generador de vapor de una central termoeléctrica, donde la generación de vapor se produce en el domo de la central termoeléctrica. El proceso del generador de vapor se divide en dos sistemas.

- ◆ Un sistema es el sistema de gas de combustión (Combustible-Aire). Este sistema proporciona el calor que se transfiere al agua, las entradas a este sistema son el flujo de combustible y el flujo de aire necesario para quemar el combustible y tener una buena combustión. En este sistema el combustible y aire se mezclan a fondo y se queman en el hogar de la central. Los gases resultantes son conocidos como gases de combustión, los cuales son enviados al ambiente.
- ◆ En el sistema de vapor de agua, la entrada es el agua de alimentación, la cual recibe calor a través de una barrera de metal sólido, se calienta, se convierte en vapor y sale del sistema en forma de vapor el cual es llamado vapor saturado. El vapor saturado es llevado nuevamente al hogar de la central termoeléctrica debido a que se necesita

1. Introducción

un vapor seco a una temperatura del orden de $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presiones entre 120 y 170 kg/cm^2 , este vapor es llamado vapor sobrecalentado y es llevado hacia las turbinas.

La turbina de vapor se divide en 2 partes:

- ◆ La turbina de alta presión recibe como entrada el flujo de vapor sobrecalentado. Se transforma la energía del flujo de vapor en energía mecánica, la turbina cuenta con álabes que tienen una forma particular para poder realizar el intercambio de energía.

- ◆ Este sistema cuenta con la turbina de baja presión, el vapor sobrecalentado que sale de la turbina de alta presión es llevado nuevamente al hogar y es vuelto a calentar para llevarlo a la turbina de baja presión y provocar el movimiento de los álabes de la turbina. Esta energía mecánica producida por el flujo de vapor, se transmite a un generador para producir la energía eléctrica.

El vapor que sale de la turbina es llevado a un condensador y este se convierte de la fase vapor a su fase líquida, esta agua vuelve a ser llevada al domo de la central termoeléctrica como el flujo de agua de alimentación.

1.1.1. Problemática asociada con el lazo de control de agua de alimentación

El objetivo del control de flujo de agua de alimentación es el de establecer un equilibrio entre la cantidad de vapor que sale del domo y la cantidad de agua que entra. Una medida de este equilibrio en las calderas de recirculación, es el nivel del domo, que debe mantenerse constante. Instintivamente parece que dicho nivel disminuirá transitoriamente cuando aumente el flujo de vapor, sin que el flujo de agua haya tenido tiempo para aumentar. Del mismo modo parecería que el nivel tiene que aumentar al disminuir el flujo de vapor, sin que el flujo de agua haya tenido tiempo para disminuir.

En la práctica ocurre lo contrario: un aumento en la demanda de vapor produce una disminución transitoria de la presión del domo que permite una expansión del volumen de las numerosas burbujas de vapor contenidas en la mezcla agua-vapor de la zona de vaporización, haciendo que el volumen de agua-vapor aumente transitoriamente, incluso aunque disminuya el flujo de agua de alimentación.

De forma similar, una disminución en la demanda de vapor origina un aumento en la presión del domo que hace que se contraigan las burbujas de vapor, con lo que disminuye el volumen de la mezcla agua-vapor y el nivel disminuirá transitoriamente aunque el flujo de agua aumente. En la Figura (1.2) (Dukelow, 1991) se muestra un diagrama de control de agua de alimentación.

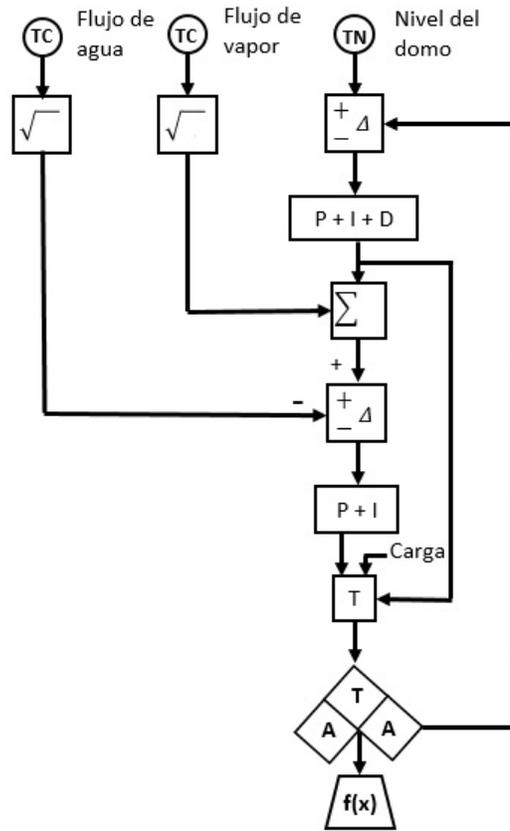


Figura 1.2: Diagrama del lazo de control de agua de alimentación.

Un alto nivel en el domo puede ocasionar inducción de agua a las tuberías de vapor saturado, ocasionando con esto la posibilidad de introducir vapor húmedo o agua a la turbina, el vapor húmedo o agua introducida puede formar gotas de agua que a altas velocidades se convierten en proyectiles que provocan laminación y fisuras a los álabes. Un bajo nivel en el domo puede ocasionar esfuerzos térmicos considerables en las paredes del domo y los tubos del generador de vapor, al estar sometidos a calor radiante generado en el hogar. Debido a que la forma geométrica del domo es elíptica la variable nivel es crítica y cuenta con redundancia física para su medición.

1.1.2. Problemática asociada con el lazo de control de combustible

En la Figura (1.3) se muestra el control de flujo de combustible. Su objetivo principal es regular la inyección de combustible, la cual debe ser la menor posible y esto se realiza mediante el control de la relación entre la alimentación de combustible y la alimentación de aire en el hogar. Entre la alimentación de combustible y aire guardan una proporción

1. Introducción

para generar una buena combustión y se emita la mayor cantidad de oxígeno posible a la atmósfera (Dukelow, 1991).

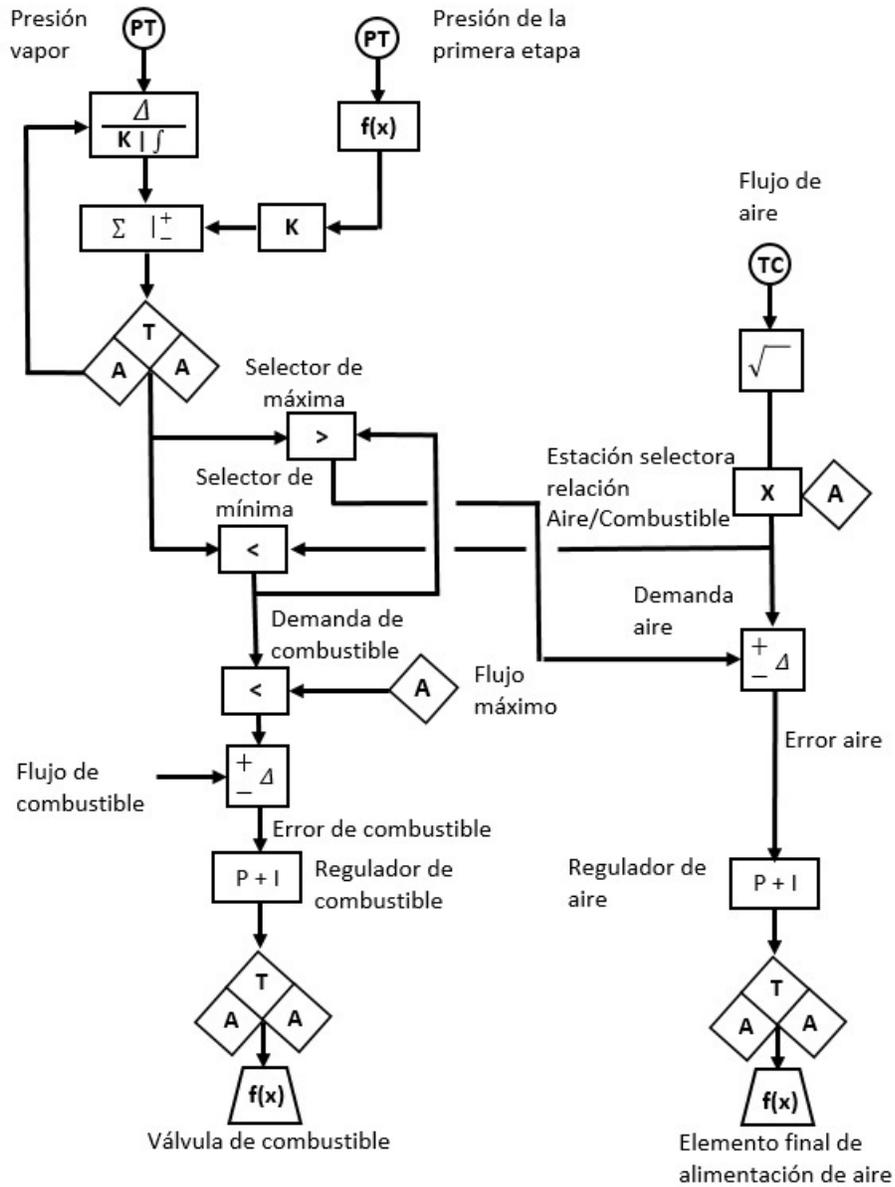


Figura 1.3: Diagrama del lazo de control del flujo de combustible.

En el ámbito de la generación eléctrica mediante centrales termoeléctricas es importante estar monitoreando el nivel de agua y la presión en el domo, ya que estas son variables críticas del sistema. Estas variables al verse afectadas pueden dar lugar a que la central salga de operación, considerando que las variables pueden ser afectadas por malas mediciones en sensores o malos funcionamientos en algún actuador de alimentación o de control en el proceso.

1.1.3. Planteamiento propuesto

Para esto se pretende diseñar un sistema de detección y localización de fallas basado en modelo para el sensor de presión y nivel en el domo, los cuales estarán en constante monitoreo y así prevenir pérdidas de producción de vapor o un mal funcionamiento del proceso. El objetivo del sistema de detección y localización de fallas es poder detectar el momento en que ocurra una falla en algún sensor del generador vapor y localizar el sensor que esta fallando, para ser calibrado o ser remplazado dependiendo el caso.

Mediante un banco de observadores Takagi-Sugeno y un banco de observadores de alta ganancia se realizara la detección y localización de fallas, debido a que mediante los observadores es posible crear una redundancia en sensores o estimar estados que no son medibles, siempre y cuando el modelo cumpla con las condiciones necesaria para su diseño y construcción. Se espera garantizar la seguridad del proceso y detectar un mal funcionamiento de los sensores de medición, para evitar pérdidas en la producción de vapor y evitar esfuerzos térmicos de las paredes del domo debido a altas temperaturas.

1.2. Justificación

La detección de fallas es la determinación de la presencia de fallas en el sistema así como el instante de su aparición. La detección de fallas es importante debido a que éstas pueden ocasionar pérdidas de productividad y calidad del producto, un funcionamiento degradado del sistema o en el peor de los casos el paro total del sistema. Con la detección de fallas se busca evitar pérdidas económicas en las empresas y aumentar la seguridad en los operadores, así como en el proceso para evitar poner en riesgo vidas humanas.

En una central termoeléctrica es importante la detección de fallas ya que malas mediciones en los sensores pueden ocasionar accidentes dentro del proceso y salir de operación por tiempos indefinidos. Estos casos anteriores pueden causar daños a los equipos, pérdidas de vidas humanas, daños al medio ambiente, falta de producción de vapor y por lo tanto falta de producción de energía eléctrica y pérdidas económicas los costos por los daños generados y alrededor de 8 millones de pesos por día, ya que estas son las principales fuentes de generación de energía eléctrica en el país y en el mundo, esto provoca un monitoreo constante en las variables críticas del sistema las cuales logren sacar de operación la planta.

1. Introducción

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un esquema de detección de fallas mediante sistemas tipo Takagi-Sugeno, aplicado a sensores de presión y nivel en el domo del generador de vapor en una central termoeléctrica con la finalidad de garantizar la seguridad del sistema.

1.3.2. Objetivos Particulares

- ✓ Estudiar el funcionamiento de centrales termoeléctricas y sus sistemas de control, utilizando el modelo no lineal de Åström.
- ✓ Diseñar un esquema de detección y localización de fallas basado en modelo mediante observadores Takagi-Sugeno y observadores de alta ganancia para el sensor de presión y el sensor de nivel en el domo, del generador de vapor en una central termoeléctrica.
- ✓ Mostrar el comportamiento del esquema de detección y localización ante distintos escenarios de fallas, en un ambiente de simulación.
- ✓ Comparación del sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno contra el sistema de detección y localización de fallas mediante observadores de alta ganancia diseñados.
- ✓ Someter los resultados de esta investigación al menos a un congreso nacional.

1.4. Hipótesis

Es posible detectar fallas en los sensores de las variables críticas de una central termoeléctrica con el diseño de un sistema de detección de fallas en sensores ante perturbaciones, empleando una representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal de la central termoeléctrica, mediante un banco de observadores como generadores de residuo estructurado.

1.5. Alcances

- ✓ Realizar la detección de fallas mediante un modelo no lineal simplificado de una central termoeléctrica, el cual es conocido y llamado como el modelo de Åström.
- ✓ Apartir del modelo no lineal de Åström se obtendrá un modelo tipo Takagi-Sugeno mediante el enfoque en el sector no lineal.
- ✓ Apartir de un banco de observadores de alta ganancia y observadores Luenberger, se realizará la detección de fallas mediante para sensores.

- ✓ Se comparará el modelo T-S obtenido contra el modelo no lineal y el FDI Takagi-Sugeno contra el FDI de alta ganancia, mediante simulación en un ambiente de Matlab a diferentes niveles de carga de la central.

1.6. Aportaciones

- ✓ Un modelo difuso Takagi-Sugeno del generador de vapor la central termoeléctrica mediante la técnica de enfoque en el sector no lineal.
- ✓ Un banco que consta de dos observadores Takagi-Sugeno para formar un banco de observadores los cuales fueron utilizados en el esquema de detección y localización de fallas.
- ✓ El diseño de un sistema de detección y localización de fallas en la variables críticas del generador de vapor de una central termoeléctrica mediante un banco de observador Takagi-Sugeno y observadores de alta ganancia.

1.7. Estado del arte

Los sistemas T-S son modelos matemáticos de una forma especial, con la propiedad de ser capaces de representar con exactitud o para aproximarse a un grado arbitrario de precisión de una amplia clase de sistemas no lineales en un conjunto compacto de el espacio de estados. Los cuales fueron propuestos por Takagi y Sugeno (1985) (Lendek *et al.*, 2010).

En Zheng *et al.* (2006) se presenta un modelo difuso Takagi-Sugeno de un modelo de un péndulo invertido, este se utiliza para la aplicación de técnicas lineales basadas en modelo, para la detección de fallas con inducción de retardos en la red de control.

Jiang *et al.* (2010) consideran un modelo Takagi-Sugeno de un prototipo de un vehículo espacial, el cual facilita enormemente el análisis y la síntesis compleja del sistema no lineal. Esto debido a que la representación Takagi-Sugeno es exacta al modelo no lineal. El modelo Takagi-Sugeno sirve para la aplicación de un control tolerante a fallas adaptativo basado en técnicas difusas.

1.7.1. Modelos Takagi-Sugeno en centrales termoeléctricas.

Jizhen *et al.* (2002) presentan un método de identificación del modelo usando modelo difuso Takagi-Sugeno. Se define la entropía difusa y se propone un algoritmo de identificación en línea basado en máxima entropía difusa y pérdida de función. Usando el algoritmo de identificación, se obtiene el modelo lineal local de alta precisión de un modelo difuso caldera-turbina. Esto proporciona una nueva forma de controlar el sistema no lineal complejo utilizando estrategias de control tradicional.

1. Introducción

Habbi *et al.* (2003) presenta un modelo dinámico no lineal difuso para la unidad caldera-turbina. El modelo se deriva del sistema dinámico no lineal de Åström. Se muestra que el modelo difuso dinámico tenga una precisión de predicción no lineal global y al mismo tiempo que sus modelos locales sean aproximaciones cercanas a los linealizaciones locales del sistema dinámico no lineal.

Éstos artículos trabajan con un modelo difuso para el modelo no-lineal de la central termoeléctrica, el cual es el modelo Åström. Pero el modelo difuso no es obtenido mediante el enfoque en el sector no lineal.

1.7.2. Observadores en centrales termoeléctricas.

Moradi y Bakhtiari-Nejad (2011) presentan un modelo lineal invariante en el tiempo (LTI) de un sistema de caldera, se considera que los flujos de combustible y de agua de alimentación son las variables de entrada. Debido a la inaccesibilidad de algunas variables de estado del sistema de caldera, se diseño un observador de orden mínimo basado en el modelo de Luenberger para obtener una estimación del estado. Bajo costo de diseño y de alta precisión de la estimación de los estados son las principales ventajas del observador de orden mínimo; en comparación con los observadores de orden completo.

Wu *et al.* (2014) desarrollan una estructura de sistema de control jerárquico basado en el modelo difuso Takagi-Sugeno para lograr un control óptimo de una unidad de caldera-turbina. A través de la estimación del término de error usando un observador. Las dos capas en la jerarquía están acoplados y el sistema integrado puede realizar un control óptimo dinámico de la unidad de caldera-turbina, incluso en el caso de las variaciones de comportamiento graves de la planta como cambios altamente bruscos en la presión o nivel en la caldera.

Khani y Yazdizadeh (2009) proponen un controlador activo con rechazo de perturbaciones (ADRC) para controlar una unidad de caldera-turbina como multivariable, no lineal y sistema fuertemente acoplado. La parte principal de la ADRC es un observador de estado extendido (ESO), que es capaz de identificar las dinámicas desconocidas y la parte no lineal del sistema como un término de error. Al rechazar la perturbación definida, el sistema se puede simplificar y linealizado para su posterior diseño del controlador. Mediante el uso de este método, el diseño del controlador pone fácil y simple, donde es necesario un menor conocimiento sobre el sistema.

He *et al.* (2009) presentan un enfoque de control coordinado basado en el observador *backstepping*. Los controladores *backstepping* de la caldera y turbina están diseñados respectivamente: el observador del objeto controlado se construye en primer lugar, y después está diseñado el observador *backstepping*. El observador *backstepping* hace que se satisfagan las condiciones de estabilidad de Lyapunov para el sistema de control .

En Yu *et al.* (2010) se presenta un esquema de control no lineal robusto para un sistema de caldera-turbina-generador, en el cual, la linealización por realimentación dinámica aproximada se estableció mediante la construcción de una familia de observadores de estado extendido de segundo orden que puede calcular y compensar las no linealidades y alteraciones del sistema. En este trabajo, se aplica el diseño de control robusto H_∞ basado en el modelo linealizado del generador de vapor que consiste en la caldera, turbina y el generador.

Luan *et al.* (2006) muestra un sistema de control de seguimiento asintótico con observador de estado difuso basado en un modelo difuso Takagi-Sugeno que está diseñado para el control coordinado de sistema de caldera-turbina no lineal MIMO. El controlador difuso de seguimiento asintótico y el observador difuso están diseñados a través del uso de la técnica de compensación distribuida paralela (PDC), y el sistema de control difuso Takagi-Sugeno se construye con la presión del domo como la variable premisa.

1.7.3. Detección de fallas en sensores

La detección de fallas en línea en redes de sensores es de suma importancia debido a la variedad de desafíos de convergencia relacionados con la tecnología y sus aplicaciones conceptuales y de seguridad en los diferentes campos de trabajo.

En Bouattour *et al.* (2009) se realiza la estimación de estados y fallas en sensores simultáneamente con un enfoque H_∞ , mediante un observador descriptor para modelos difusos T-S con perturbaciones acotadas a la entrada.

En Astorga-Zaragoza *et al.* (2009) se desarrolla un método de diagnóstico de fallas en sensores basado en modelo, para sistemas lineales de parámetros variantes (LPV) descriptor. En este trabajo se propone un observador el cual realiza la detección de fallas en todo el rango del funcionamiento del sistema.

Escobar *et al.* (2011) presentan un sistema de detección y localización de fallas (FDI) en sensores, mediante observadores de alta ganancia como generadores de residuo, aplicados a un intercambiador de calor.

López-Estrada *et al.* (2015) diseñan un observador para sistemas lineales de parámetros variantes descriptor con la finalidad de estimar estados, detectar, localizar y estimar fallas en sensores, aplicado a un bioreactor anaerobio.

En Barbosa *et al.* (2011) se desarrolla un sistema de detección de fallas en sensores de un reactor de investigación IEA-R1 el cual es un reactor tipo piscina, el cual es basado en la metodología de mapas de auto-organización.

Capítulo 2

Modelo dinámico de la central termoeléctrica

El objetivo de este capítulo es mostrar el funcionamiento del generador de vapor de una central termoeléctrica y se presenta el modelo matemático, con el que se trabajará a lo largo de esta tesis. También se muestra una adaptación del modelo no lineal y la construcción de un modelo Takagi-Sugeno.

En la sección 2.1 se muestra el modelo matemático de la central termoeléctrica con el cual se trabajará, las diferentes formas de representarlo para su mejor manipulación y la nomenclatura utilizada.

En la sección 2.2 se presenta el estudio de observabilidad realizado al modelo de Åström y se muestran los cambios del modelo para la adaptación de las condiciones de observabilidad.

En la sección 2.3 podemos observar la construcción de un modelo mediante la representación Takagi-Sugeno el cual se obtiene del modelo no lineal obtenido para las condiciones de observabilidad.

2.1. Modelo matemático de la central termoeléctrica

En esta sección se muestra el modelo matemático no lineal de la central termoeléctrica, su descripción y la nomenclatura utilizada en el mismo.

En 1972, Åström y Eklund (Åström y Eklund, 1972) presentaron un modelo de primer orden, para una unidad de una caldera-turbina. Las variables de control consideradas en este modelo son el flujo de combustible y el ajuste de la válvula de control de vapor. Las variables de salida son la presión en el domo y la potencia activa. El modelo fue evaluado con datos experimentales de una caldera de 160MW.

2.1. Modelo matemático de la central termoeléctrica

Posteriormente Morton y Price (1977) actualizaron el modelo de la caldera, ellos intentaron incluir la desviación del nivel de agua en el domo de la caldera mediante la incorporación de la dinámica de evaporación en el modelo. En este modelo, la predicción del nivel era pobre para ciertos flujos.

Bell y Åström (1987) presentaron un trabajo donde muestran un modelo no lineal de tercer orden, el cual es basado en los trabajos anteriores, donde el flujo de combustible, la posición de la válvula de control de vapor y el flujo de agua de alimentación son considerados como entradas. La presión en el domo, la potencia generada y el nivel de agua en el domo como salidas. En este modelo se incluyen las ecuaciones de la razón de evaporación y la dinámica de la densidad en el domo, las cuales logran una representación razonable de la dinámica del nivel de agua en el domo de la caldera. Los resultados obtenidos fueron evaluados con los datos obtenidos por la planta real.

La nomenclatura utilizada en el modelo de Åström se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: *Nomenclatura para el modelo de Åström.*

| Variable | Parámetro |
|------------------------|---|
| x_1 | Presión del domo (kg/cm^2) |
| x_2 | Potencia generada (MW) |
| x_3 | Densidad en el domo (kg/m^3) |
| q_e | Calidad del vapor (%) |
| α_{cs} | Razón de evaporación (kg/s) |
| x_w | Nivel del domo (mts) |
| u_1 | Apertura de la válvula de flujo de combustible (0 – 1) |
| u_2 | Apertura de la válvula de flujo de vapor (0 – 1) |
| u_3 | Apertura de la válvula de flujo de agua de alimentación (0 – 1) |
| $k_i, i = 1, \dots, 9$ | Constantes |

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el modelo desarrollado por Bell y Åström en 1987. El modelo utilizado es conocido como el modelo de Åström y se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -k_1 x_1^{9/8} u_2 + k_2 u_1 - k_3 u_3 \\ \dot{x}_2 &= k_4 x_1^{9/8} u_2 - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{aligned} \quad (2.1a)$$

$$\dot{x}_3 = k_7 + (-k_8 u_2 + k_9) x_1$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)}$$

$$q_e = (0,854\theta - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096 \quad (2.1b)$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

El modelo presentado en las ecuaciones anteriores es mostrado en su forma general donde la Ecuación (2.1a) muestra las ecuaciones dinámicas del modelo y la Ecuación (2.1b) muestra las ecuaciones algebraicas del modelo. En la Ecuación (2.2a) se muestran las ecuaciones dinámicas del modelo de Åström representadas en su forma matricial.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \\ k_9 x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \\ k_4 x_1^{9/8} \\ -k_8 x_1 \end{pmatrix} u_2 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \\ k_7 \end{pmatrix} u_3 \quad (2.2a)$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)}$$

$$q_e = (0,854\theta - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096 \quad (2.2b)$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

2.2. Estudio de la observabilidad del modelo de Åström

Finalmente en las Ecuaciones (2.3a) y (2.3b) se muestra el modelo en la forma condensada.

$$\dot{x} = f_1(x) + g_{11}(x)u_1 + g_{21}(x)u_2 + g_{31}(x)u_3 \quad (2.3a)$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)}$$

$$q_e = (0,854\theta - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096 \quad (2.3b)$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

donde

$$\blacksquare \dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix}, f_1(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ -k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \\ k_9x_1 \end{pmatrix}$$

$$\blacksquare g_{11}(x) = \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, g_{21}(x) = \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8} \\ k_4x_1^{9/8} \\ -k_8x_1 \end{pmatrix}, g_{31}(x) = \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \\ k_7 \end{pmatrix}$$

Este modelo representa el comportamiento físico del sistema, donde la ecuación \dot{x}_1 representa el comportamiento de la dinámica de la presión en el domo, la ecuación \dot{x}_2 representa el comportamiento de la dinámica de la potencia generada por la central y la ecuación \dot{x}_3 representa el comportamiento dinámico de la densidad en el interior del domo. La ecuación de α_{cs} indica la razón de evaporación del agua dentro del domo y la ecuación de q_e indica la calidad del vapor que se esta generando, estas ayudan a obtener una mayor precisión en el cálculo del nivel en el domo las cuales se incluyen en la ecuación de x_w .

2.2. Estudio de la observabilidad del modelo de Åström

Antes de presentar el estudio de observabilidad realizado, se presenta como se determina la observabilidad en sistemas lineales y en sistemas no lineales. La observabilidad es muy útil tratar de resolver un problema de reconstrucción de estados no medibles.

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

2.2.1. Teoría de observabilidad en sistemas lineales

Se determinará la observabilidad para un sistema lineal, tomando en cuenta un sistema lineal de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\tag{2.4}$$

donde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ y $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ son matrices, $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado, $y \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida y $u \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas .

Un sistema es completamente observable si el estado $x(t_0)$ se determina a partir de la observación del vector de salida(y) durante un intervalo de tiempo finito, $t_0 \leq t \leq t_1$. el sistema es completamente observable si todas las transiciones del estado afectan eventualmente a todos los elementos del vector de salida.

Considerando el sistema mostrado en la Ecuación (2.4), el vector de salida es el siguiente en tiempo continuo:

$$y(t) = Ce^{At}x(0)$$

donde tenemos que

$$e^{At} = \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k(t)A^k$$

Entonces se obtiene

$$y(t) = \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k(t)CA^kx(0)$$

o bien

$$y(t) = \beta_0(t)Cx(0) + \beta_1(t)CAx(0) + \cdots + \beta_{n-1}(t)CA^{n-1}x(0)\tag{2.5}$$

Así el sistema es completamente observable, dada la salida $y(t)$ durante un intervalo de tiempo $0 \leq t \leq t_1$, $x(0)$ se determina unicamente a partir de la Ecuación (2.5).

$$O_{SL} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

Se demuestra que esto requiere que el rango de la matriz O_{SL} sea n .

A partir del análisis anterior se plantea la condición de observabilidad de un sistema lineal de la manera siguiente: Un sistema lineal es completamente observable si y solo si la matriz

$$[C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^T)^n - 1C^T]$$

Es de rango completo o tiene n vectores columna linealmente independientes. Esta es llamada **matriz de observabilidad** (Ogata, 2003).

2.2.2. Teoría de observabilidad de un sistema no lineal

Para un sistema no lineal como el que se muestra en la ecuación 2.6 las condiciones de observabilidad son las siguientes.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u) \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{2.6}$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $u \in \mathbb{R}^p$ es la señal de control y $y \in \mathbb{R}^q$ es la salida, las funciones $f(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ y $h(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ son campos vectoriales.

Los estados $x(t)$ de un sistema no lineal son observables si dada cualquier entrada $u(t)$ existe en tiempo finito $t_f \geq t_0$, tal que mediante el conocimiento de $u(t)$ y la salida $y_m(t)$ para $t_0 \leq t \leq t_f$ son suficientes para determinar el estado $x(t)$ (Hermann y Krener, 1977).

Como podemos ver la observabilidad en los modelo no lineales a diferencia de los modelos lineales estos dependen de las entradas del sistema.

- Un sistema no lineal para el cual todas sus entradas son universales es uniformemente observable (Gauthier, 1992).
- $u = 0$, con condiciones iniciales diferentes $x(0)$ y $x'(0)$, las salidas correspondientes son indistinguibles, por lo tanto esta es una entrada singular. El sistema no es uniformemente observable.

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

Para los sistemas no lineales también existe una matriz de observabilidad, la cual es formada por derivadas de Lie.

La deriva de Lie para un sistema no lineal es $L_f h(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x)$. La derivada de Lie es de la función de salida del sistema en dirección del vector de estados.

La matriz de observabilidad se muestra en la Ecuación (2.7), si esta matriz es de rango completo el sistema es observable. Cuando la matriz de observabilidad no se encuentra en función de la entrada, se dice que el sistema es observable para cualquier entrada.

$$O_{SNL} = \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(x) \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

En caso que las funciones $h(x)$ y $f(x)$ son funciones lineales, la matriz de observabilidad es equivalente a la de los sistemas lineales.

2.2.3. Observabilidad en el modelo de Åström

Se realizaron las pruebas de observabilidad al modelo no lineal para la construcción de observadores, donde se utiliza la función $f_1(x)$ de la Ecuación (2.3a) del modelo en la forma condensada, para la prueba de observabilidad.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \\ k_9 x_1 \end{pmatrix}}_{f_1(x)} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \\ k_4 x_1^{9/8} \\ -k_8 x_1 \end{pmatrix} u_2 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \\ k_7 \end{pmatrix} u_3$$

donde si el determinante del jacobiano de $f_1(x)$ es no singular el sistema es observable, esto es lo mismo a que si el determinante es diferente de cero el sistema es observable.

$$\det \left(\frac{\partial f_1(x)}{\partial x} \right) \neq 0$$

Para esto se obtuvo el jacobiano de $f_1(x)$

2.2. Estudio de la observabilidad del modelo de Åström

$$\frac{\partial f_1(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{9}{8}k_5x_1^{\frac{1}{8}} & -k_6 & 0 \\ k_9 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det \left(\frac{\partial f_1(x)}{\partial x} \right) = \det \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -\frac{9}{8}k_5x_1^{\frac{1}{8}} & -k_6 & 0 \\ k_9 & 0 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

Debido a que el $\det \left(\frac{\partial f_1(x)}{\partial x} \right) = 0$, se modificó la estructura de las ecuaciones sin alterar los valores de la misma. Los parámetros del modelo siguen siendo los mismos, se modificó la estructura de $f_1(x)$ y se tomó la entrada u_2 como parámetro variable ($\theta(u_2)$) para tratar de resolver la singularidad del jacobiano de $f_1(x)$ de la Ecuación (2.2a).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 \\ -k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \\ k_9x_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8} \\ k_4x_1^{9/8} \\ -k_8x_1 \end{pmatrix}}_{f_2(x)} u_2 + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \\ k_7 \end{pmatrix} u_3$$

Quedando expresado el modelo de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8}\theta(u_2) \\ k_4x_1^{9/8}\theta(u_2) - k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \\ k_9x_1 - k_8x_1\theta(u_2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \\ k_7 \end{pmatrix} u_3 \quad (2.8a)$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)}$$

$$q_e = (0,854\theta(u_2) - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096 \quad (2.8b)$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

Una vez obtenido el modelo de la Ecuación (2.8), se realizaron las pruebas de observabilidad nuevamente. Se obtuvo el jacobiano de $f_2(x)$, para verificar que este sea no singular.

$$\frac{\partial f_2(x)}{\partial x} = \begin{bmatrix} -\frac{9}{8}k_1x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) & 0 & 0 \\ \frac{9}{8}k_4x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x^{\frac{1}{8}} & -k_6 & 0 \\ k_9 - k_8\theta(u_2) & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det\left(\frac{\partial f_2(x)}{\partial x}\right) = \det\begin{bmatrix} -\frac{9}{8}k_1x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) & 0 & 0 \\ \frac{9}{8}k_4x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x^{\frac{1}{8}} & -k_6 & 0 \\ k_9 - k_8\theta(u_2) & 0 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

Como el $\det\left(\frac{\partial f_2(x)}{\partial x}\right) = 0$, se tomaron las dos primera ecuaciones dinámicas, debido a que el tercer estado de $f_2(x)$ se encuentra desacoplada, esto es que no afecta a nuestras dos primeras ecuaciones.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8}\theta(u_2) \\ k_4x_1^{9/8}\theta(u_2) - k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \end{pmatrix}}_{f(x)} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} u_3$$

Finalmente se propone que el modelo matemático quede de la siguiente manera

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8}\theta(u_2) \\ k_4x_1^{9/8}\theta(u_2) - k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} u_3 \quad (2.9a)$$

$$\dot{x}_3 = (-k_8\theta(u_2) + k_9x_1) + (k_7)u_3$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)} \quad (2.9b)$$

$$q_e = (0,854\theta(u_2) - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

2.2. Estudio de la observabilidad del modelo de Åström

Se utilizó la Ecuación (2.9a) para realizar las pruebas de observabilidad y verificar que la Ecuación cumpla con que el jacobiano de $f(x)$ sea no singular.

$$\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right) = \begin{bmatrix} -\frac{9}{8}k_1x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) & 0 \\ \frac{9}{8}k_4x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x^{\frac{1}{8}} & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$\det\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right) = \det\begin{bmatrix} -\frac{9}{8}k_1x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) & 0 \\ \frac{9}{8}k_4x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x^{\frac{1}{8}} & -k_6 \end{bmatrix} = \frac{9}{8}k_6k_1x^{\frac{1}{8}}\theta(u_2)$$

Como el $\det\left(\frac{\partial f(x)}{\partial x}\right) \neq 0$ podemos decir que nuestro sistema es observable y se utilizará el modelo que se muestra en la Ecuación (2.10) para los trabajos a desarrollar en esta tesis.

$$\dot{x} = f(x) + g_1u_1 + g_3u_3 \tag{2.10a}$$

$$\dot{x}_3 = (-k_8\theta(u_2) + k_9x_1) + (k_7)u_3$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)} \tag{2.10b}$$

$$q_e = (0,854\theta(u_2) - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

donde:

$$\begin{aligned} \blacksquare \dot{x} &= \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix}, f(x) = \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8}\theta(u_2) \\ k_4x_1^{9/8}\theta(u_2) - k_5x_1^{9/8} - k_6x_2 \end{pmatrix} \\ \blacksquare g_1 &= \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix}, g_3 = \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

2.3. Construcción del modelo Takagi-Sugeno del generador de vapor

2.3.1. Teoría de modelos Takagi-Sugeno

Tradicionalmente, los sistemas lineales e invariantes en el tiempo han sido ampliamente utilizados en el campo de los sistemas de control. Gracias a su linealidad y a ser invariantes en el tiempo, estos sistemas son fáciles de analizar y existen métodos y algoritmos bien establecidos para diseñar observadores y controladores para ellos (Lendek *et al.*, 2010).

Los modelos Takagi-Sugeno consisten en una base de reglas IF-THEN. Los antecedentes de cada regla particionan un subconjunto de las variables del modelo en conjuntos difusos.

El modelo de la regla *i*-ésima es:

Si z_1 es Z_1^i y \dots y $z_p(t)$ es Z_p^i entonces $y = Fi(z)$

donde el vector z tiene p componentes, $z_j, j = 1, 2, \dots, p$ y éstas representan el vector de las variables de programación, ya que estos valores determinan el grado en que las reglas se activan, Z_j^i es el conjunto difuso.

El valor de la variable de programación z_j que pertenece a un conjunto difuso Z_j^i , es dado por el valor verdadero de una función de pertenencia $w_j^i : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$. El valor verdadero para una regla se determina basado en un operador de conjunción mínimo.

$$\varphi_i(z) = \min_j \{w_{ij}(z_j)\}$$

o del producto algebraico

$$\varphi_i(z) = \prod_{j=1}^p w_{ij}(z_j)$$

El valor verdadero obtenido es normalizado

$$w_i(z) = \frac{\varphi_i(z)}{\sum_{j=1}^r \varphi_j(z)} \tag{2.11}$$

2.3. Construcción del modelo Takagi-Sugeno del generador de vapor

asumiendo que $\sum_{j=1}^m \varphi_j(z) \neq 0$, entonces para cualquier combinación permitida de las variables de programación, al menos una regla tiene un valor de verdad mayor a cero. La expresión $w_i(z)$ se conoce como la función de pertenencia normalizada. La salida de una regla es el valor dado por el consecuente de la función vectorial \mathbf{F}_i , usualmente depende de las variables programadas.

$$y = \sum_{i=1}^r w_i(z) \mathbf{F}_i(z) \quad (2.12)$$

donde y es el vector de salida del modelo, la cual es calculada como la combinación ponderada de las salida de las reglas (m), usando $w_i(z)$. Con lo anterior el sistema Takagi-Sugeno se representa de la siguiente manera.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^r w_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= \sum_{i=1}^r w_i(z) C_i x(t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida, $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$. La ecuación lineal es representada por $A_i x(t) + B_i u(t)$ es llamada modelo local o subsistema.

Construcción mediante enfoque en el sector no lineal

El método mediante el enfoque del sector no lineal fue propuesto por Ohtake *et al.* (2003). Este enfoque es uno de los métodos mas utilizados para la construcción de modelos Takagi-Sugeno para el diseño de control difuso, ya que se obtiene una representación de un sistema no lineal dada en un conjunto compacto en espacio de estado (Lendek *et al.*, 2010).

El método se desarrolló originalmente para sistemas no lineales de la forma

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f^m(x, u)x + g^m(x, u)u \\ y &= h^m(x, u)x \end{aligned}$$

donde las expresiones f^m , g^m y h^m son funciones matriciales no lineales suaves, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entrada, $y(t) \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida.

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

Las variables de programación se elijen como $z_j(\cdot) \in [\underline{nl}_j, \overline{nl}_j]$, $j = 1, 2, \dots, p$ donde z_j denota los términos no constantes en f^m , g^m y h^m . \underline{nl}_j y \overline{nl}_j son el mínimo y máximo respectivamente de z_j . Para cada z_j se construyen don funciones de ponderación como

$$\eta_0^j(\cdot) = \frac{\overline{nl}_j - z_j(\cdot)}{\overline{nl}_j - \underline{nl}_j} \quad \eta_1^j(\cdot) = 1 - \eta_0^j(\cdot) \quad j = 1, 2, \dots, p$$

Las dos funciones de ponderación están normalizadas, es decir $\eta_0^j(\cdot) \geq 0$, $\eta_1^j(\cdot) \geq 0$ y $\eta_0^j + \eta_1^j = 1$, para un solo valor de z_j . Las reglas del sistema Takagi-Sugeno están construidas en función de los términos z_j .

Si z_1 es Z_1^i y ... y $z_p(t)$ es Z_p^i entonces

$$\dot{x} = A_i x + B_i u$$

$$y = C_i x$$

donde Z_j^i , $i = 1, 2, \dots, r$, $j = 1, 2, \dots, p$. el sistema Takagi-Sugeno se compone de $r = 2^p$ reglas. Las funciones de pertenencia de las reglas son calculadas como el producto de las funciones de ponderación que corresponden a los conjuntos difusos en las reglas, es decir

$$w_i(z) = \prod_{j=1}^p w_{ij}(z_j)$$

Utilizando las funciones de pertenencia calculadas el sistema no lineal es representados exactamente por el modelo Takagi-Sugeno siguiente

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) (A_i x(t) + B_i u(t))$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) C_i x(t)$$

Construcción mediante linealización

Un método para obtener una aproximación difusa Takagi-Sugeno de un modelo no lineal es la linealización local (Johansen *et al.*, 2000). Esta linealización es una expansión de la serie de Taylor en diferentes puntos representativos, que pueden estar o no estar en equilibrio (Lendek *et al.*, 2010).

Considerando un sistema

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

$$y = h(x)$$

donde $x \in \mathbb{R}^n$ es el vector de variables de estado, $y \in \mathbb{R}^q$ es el vector de salida, $u \in \mathbb{R}^m$ es el vector de entradas y f y h son vectores de funciones no lineales.

El objetivo es obtener una aproximación de un sistema no lineal como un conjunto de r reglas de la forma

El modelo de la regla i -ésima es:

Si z_1 es Z_1^i y \dots y $z_p(t)$ es Z_p^i entonces

$$\dot{x} = A_i x + B_i u$$

$$y = C_i x$$

o equivalente a un modelo Takagi-Sugeno de la forma

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) (A_i x(t) + B_i u(u))$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^r w_i(z) C_i x(t)$$

donde A_i , B_i y C_i son matrices de los modelos lineales locales, z es el vector de variables programadas que determinan el momento de activación de las reglas y $w_i(z)$, $i = 1, 2, \dots, m$ son las funciones de pertenencias normalizadas.

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

Primero uno decide que variables describen las no linealidades, es decir las variables que deben ser las variables de programación.

Posteriormente deben elegirse un número suficiente de puntos de linealización, junto con la partición de el espacio donde las variables son definidas y la correspondiente función de pertenencia.

Al aumentar el número de puntos de aproximación, la precisión de la aproximación de los modelos difusos aumenta. Sin embargo los costos computacionales en el diseño de un controlador u observador también aumentan. Las matrices de los modelos locales se obtienen como

$$A_i = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{z_{0i},0} \quad B_i = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{z_{0i},0} \quad C_i = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{z_{0i},0}$$

donde $\left|_{z_{0i},0}$ denotan la evaluación de las derivadas parciales en el valor correspondiente de z_{0i} , para las variables de estado y de entrada que son las variables de programación y 0 para los estados o entradas que no están en z .

2.3.2. Construcción del modelo Takagi-Sugeno para el generador de vapor

A partir de la Ecuación (2.14) del modelo no lineal, se construyó el modelo difuso Takagi-Sugeno basado en el método del enfoque en el sector no lineal, debido a que este método se obtiene un representación de un sistema no lineal y puede exigir un menor costo computacional debido a que mediante un conjunto compacto de submodelos en espacio de estado se puede lograr la representación.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ k_4 x_1^{9/8} \theta(u_2) - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} u_3 \quad (2.14)$$

Para la construcción del modelo Takagi-Sugeno se definieron las no linealidades (z_n) del modelo no lineal. Después se calculó cada una de las funciones de ponderación (η) para cada término no lineal como se muestra en (Lendek *et al.*, 2010).

Para definir el rango de las no linealidades se realizó la variación de $\theta(u_2)$ entre 0,5 y 1 donde esto representa la apertura de la válvula de vapor sobrecalentado, dependiendo la demanda de potencia eléctrica.

2.3. Construcción del modelo Takagi-Sugeno del generador de vapor

- No linealidades

$$z_1 = x_1^{1/8} \theta(u_2)$$

$$z_2 = x_1^{1/8}$$

- Cálculo de las funciones de ponderación

$$z_1 = x_1^{1/8} \theta(u_2) \in [1,4187 \quad 1,7792]$$

$$\eta_0^1 = \frac{nl_1 - z_1}{nl_1 - nl_1}$$

$$\eta_1^1 = 1 - \eta_0^1$$

$$z_2 = x_1^{1/8} \in [1,8728 \quad 1,8916]$$

$$\eta_0^2 = \frac{nl_2 - z_1}{nl_2 - nl_2}$$

$$\eta_1^2 = 1 - \eta_0^2$$

Por cada función de ponderación denotada le corresponde un conjunto difuso, el cual para este modelo difuso Takagi-Sugeno tiene 4 reglas.

- Modelo Regla 1

$$A_1 = \begin{bmatrix} -k_1(1,4187) & 0 \\ k_4(1,4187) - k_5(1,8728) & -k_6 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} k_2 & -k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Modelo Regla 2

$$A_2 = \begin{bmatrix} -k_1(1,4187) & 0 \\ k_4(1,4187) - k_5(1,8916) & -k_6 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} k_2 & -k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Modelo Regla 3

$$A_3 = \begin{bmatrix} -k_1(1,7792) & 0 \\ k_4(1,7792) - k_5(1,8728) & -k_6 \end{bmatrix}, B_3 = \begin{bmatrix} k_2 & -k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. Modelo dinámico de la central termoeléctrica

- Modelo Regla 4

$$A_4 = \begin{bmatrix} -k_1(1,7792) & 0 \\ k_4(1,7792) - k_5(1,8916) & -k_6 \end{bmatrix}, B_4 = \begin{bmatrix} k_2 & -k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Después se calcularon las funciones de pertenencia para cada uno de los modelos obtenidos.

$$\omega_1 = \eta_0^1 * \eta_0^2$$

$$\omega_2 = \eta_0^1 * \eta_1^2$$

$$\omega_3 = \eta_1^1 * \eta_0^2$$

$$\omega_4 = \eta_1^1 * \eta_1^2$$

Se obtuvo el modelo Takagi-Sugeno mostrado en la Ecuación (2.15), el cual esta conformado por cuatro submodelos o modelos locales para lograr la representación del modelo mostrado en la Ecuación (2.10a).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i x + B_i u) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(C_i x) \end{aligned} \tag{2.15}$$

2.4. Conclusiones del capítulo 2

En este capítulo se presentó el modelo no lineal del generador de vapor de central termoeléctrica y se realizaron pruebas de observabilidad a dicho modelo con la finalidad de construir observadores para el mismo.

Se obtuvo un modelo en forma matricial el cual cambia la estructura original del modelo de Åström, donde se tomó la entrada u_2 como parámetro variable dentro la función $f(x)$ para resolver la singularidad del jacobiano de $f(x)$, sin embargo no cambia ninguno de sus parámetros. El cual es utilizado para la construcción de un modelo Takagi-Sugeno y se utilizará para la construcción de un observador.

Se realizó la construcción de un modelo Takagi-Sugeno mediante el método en el **enfoque en el sector no lineal** para la representación de la adaptación del modelo de Åström el cual resulto ser un modelo con cuatro modelos locales y obteniendo una representación exacta del modelo no lineal.

Capítulo 3

Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

En este capítulo se presenta el diseño de observadores Takagi-Sugeno y el diseño de observadores de alta ganancia. Finalmente se muestra el diseño del sistema de control para la regulación de la presión y del nivel en el domo.

En la sección 3.1 podemos ver la teoría utilizada para el diseño de los observadores de Takagi-Sugeno y observadores de alta ganancia, utilizados para la detección de fallas. Se muestra el análisis de observabilidad con respecto a cada una de las salidas del sistema para el diseño de los observadores Takagi-Sugeno, así como el análisis de estabilidad mediante la función de Lyapunov para asegurar la convergencia y estabilidad de los observadores. También se presenta el diseño de los observadores de alta ganancia.

En la sección 3.2 se muestra la linealización del modelo de Åström y se presenta el diseño del sistema de control y el cálculo de las ganancias de los controladores PI de presión y nivel en el domo.

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

En situaciones prácticas no todas las variables de estado de un proceso se pueden medir. En tales casos se debe diseñar un observador en caso que se deseen conocer los estados que físicamente no son medidos. Los se basan en el modelo del sistema y los datos de entrada-salida disponibles para llevar a cabo la estimación de los estados.

Una vez que la estimación de los estados está disponible, estas estimaciones se pueden utilizar para el diseño de controladores, la detección de fallas, etc.

3.1.1. Teoría del diseño de observadores

Teoría de observador Takagi-Sugeno

Un modelo Takagi-Sugeno como el que se muestra en la Ecuación (3.1) (Lendek *et al.* (2010))

$$\sum_{TS} : \begin{cases} \dot{x} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i x + B_i u) \\ y = \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(C_i x) \end{cases} \quad (3.1)$$

donde $i = 1, 2, \dots, m$, donde m es número submodelos, $x \in \mathbb{R}^n$ son los estados, $u \in \mathbb{R}^p$ son las entradas, $y \in \mathbb{R}^q$ son las salidas, ω son las variables de ponderación, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ y $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ son matrices.

Se ha considerado un observador descrito por la Ecuación (3.2), el cual puede ser visto como una generalización del clásico observador Luenberger para sistemas difusos y se conoce como observador Luenberger difuso. En nuestro caso lo llamaremos “observador Takagi-Sugeno”.

$$\mathcal{O}_{TS} : \begin{cases} \dot{\hat{x}} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z) (A_i \hat{x} + B_i u + K_i (y - \hat{y})) \\ \hat{y} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z) (C_i \hat{x}) \end{cases} \quad (3.2)$$

donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ son los estados estimados, $u \in \mathbb{R}^p$ son las entradas, $\hat{y} \in \mathbb{R}^q$ son las salidas, ω son las variables de ponderación, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ y $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ son matrices.

Análisis de estabilidad del observador

El error de estimación cuando se utiliza un observador como el que se muestra en la Ecuación (3.2) para un sistema de la forma mostrada en la Ecuación (3.1) se puede derivar.

$$e = x - \hat{x}$$

Para el análisis de estabilidad se utiliza la dinámica del error como se muestra a continuación:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}}$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$\begin{aligned}\dot{e} &= \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i x + B_i u) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i \hat{x} + B_i u + K_i(y - \hat{y})) \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i x) + \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(B_i u) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i \hat{x}) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(B_i u) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(K_i(y - \hat{y})) \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i x) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(A_i \hat{x}) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(K_i(C - C\hat{x})) \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^m \omega_i(z)((A_i)(x - \hat{x})) - \sum_{i=1}^m \omega_i(z)((K_i C)(x - \hat{x})) \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^m \omega_i(z)((A_i - K_i C)(e))\end{aligned}$$

Para esta dinámica del error varias condiciones de estabilidad han sido formuladas, la gran mayoría se derivan del uso de la función candidata de Lyapunov $V = e^T P e$, con $P = P^T > 0$.

$$V = e^T P e$$

$$\dot{V} = e^T P \dot{e} + \dot{e}^T P e$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(e^T P (A_i - K_i C) e + [(A_i - K_i C) e]^T P e)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(e^T (P A_i - P K_i C) e + e^T (A_i^T - C_i^T K_i^T) P e)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^m \omega_i(z)(e^T (P A_i - P K_i C) e + e^T (A_i^T P - C_i^T K_i^T P) e)$$

Cabe destacar que la dinámica del error es en sí un sistema difuso y por lo tanto estas se formulan como LMIs.

LMI y Regiones LMI's

En 1890, Lyapunov publicó un trabajo donde introdujo la teoría de estabilidad de Lyapunov. La solución analítica de la LMI de Lyapunov se propuso a través de la ecuación de Lyapunov. Se demostró que un sistema lineal.

$$\dot{x}(x) = Ax(t)$$

es asintóticamente estable si y solo si existe una matriz definida positiva de tal manera que P

$$A^T P + P A < 0$$

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

Esto es a lo que ahora se le llama desigualdad de Lyapunov en P , que es una simple LMI en P y por lo general la variable P se limita a ser definida positiva o negativa. Lyapunov también mostró que esta LMI podría ser resuelta de forma explícita.

La primera LMI utilizada para analizar la estabilidad de un sistema dinámico fue la desigualdad de Lyapunov, que puede ser resuelta analíticamente mediante la resolución de un conjunto de ecuaciones lineales y es considerada como la semilla plantada en el campo de las LMIs.

La idea básica del método de LMI es formular un problema dado, como un problema de optimización con objetivo lineal y una desigualdad matricial lineal (LMI) con restricciones. Una restricción LMI en un vector $x \in \mathbf{R}^m$ es uno de la forma

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i < 0$$

donde las matrices simétricas $F_i = F_i^T \in \mathbf{R}^{N \times N}$, $i = 0, \dots, m$, son dadas.

A continuación se muestran algunos casos típicos de regiones de estabilidad en el plano complejo.

- En el primer caso se muestra la estabilidad de una matriz, donde se requiere que los eigenvalores de la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se encuentre en la parte sombreada azul del plano complejo (Duan y Yu, 2013).

entonces la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es Hurwitz estable si los eigenvalores de $(A + \alpha I)$ son negativos. Acorde con la teoría de estabilidad de Lyapunov $(A + \alpha I)$ es Hurwitz estable si existe una $P_\alpha = P_\alpha^T > 0$, tal que se cumpla la siguiente desigualdad

$$(A + \alpha I)^T P_\alpha + P_\alpha (A + \alpha I) < 0$$

entonces para esta región de estabilidad tenemos la siguientes dos LMI's

$$P > 0$$

$$A^T P_\alpha + P_\alpha A + 2\alpha P_\alpha < 0$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

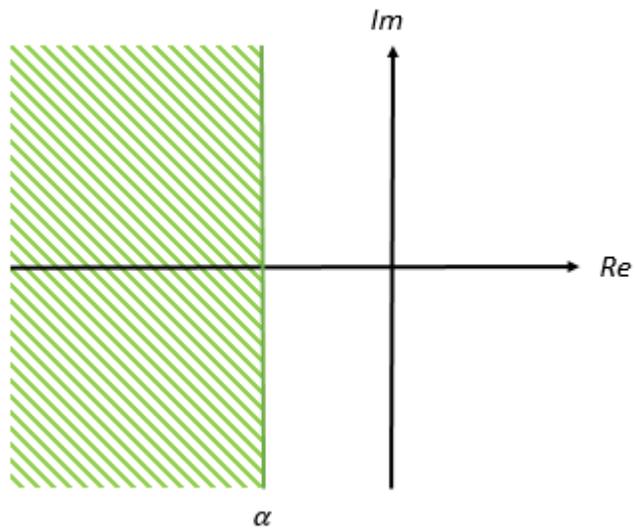


Figura 3.1: *Región LMI.*

- Para el segundo caso se requiere que los eigenvalores de la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se localicen dentro del círculo en el plano complejo como se muestra en la figura 3.2 (Duan y Yu, 2013).

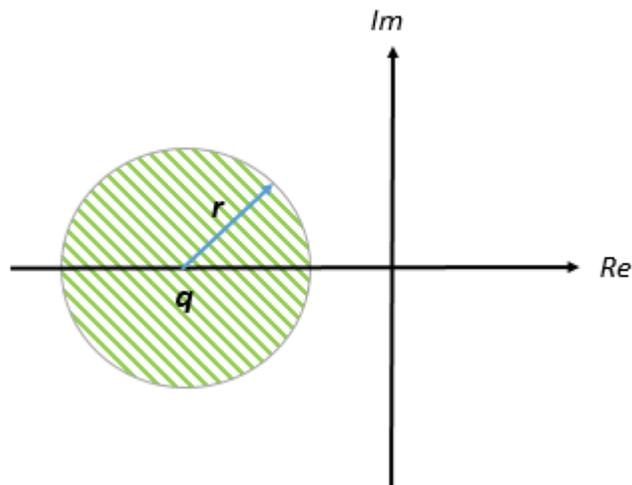


Figura 3.2: *Región circular LMI.*

para este caso la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ debe satisfacer la siguiente desigualdad

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

$$\begin{bmatrix} -rP & qP + AP \\ qP + PA^T & -rP \end{bmatrix} < 0$$

Debido a que el círculo se encuentra en la parte estable del plano complejo, es necesario cumplir otra desigualdad, entonces tenemos que $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ es estable si existe un $P = P^T > 0$ que cumpla la siguientes desigualdades

$$\begin{cases} (A + \alpha I)^T P + P(A + \alpha I) < 0 \\ \begin{bmatrix} -rP & qP + AP \\ qP + PA^T & -rP \end{bmatrix} < 0 \end{cases}$$

- En el último caso se muestra la región cónica, donde los eigenvalores de la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ deben encontrarse dentro de la región sombreada en color verde como se muestra en la Figura (3.3) (Duan y Yu, 2013).

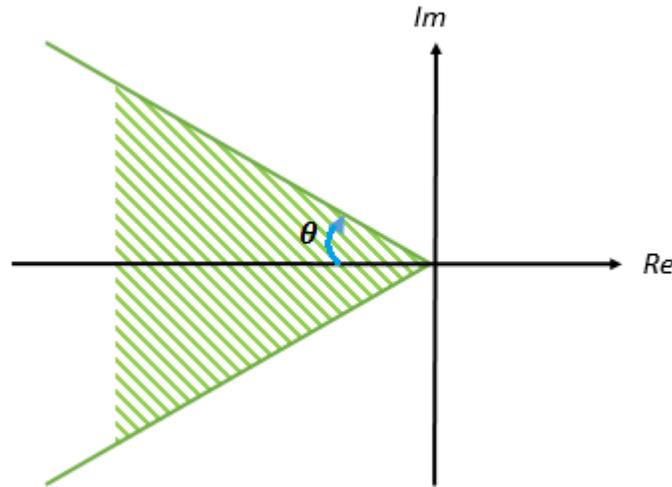


Figura 3.3: *Región cónica LMI.*

Para este caso con vértice en el origen y aplicando la desigualdad de Lyapunov, se debe cumplir la siguiente desigualdad, con $P = P^T > 0$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$\begin{bmatrix} \text{sen}(\theta)(A^T P + PA) & \text{cos}(\theta)(PA - A^T P) \\ \text{cos}(\theta)(-PA + A^T P) & \text{sen}(\theta)(PA + A^T P) \end{bmatrix} < 0$$

Teoría de observador de alta ganancia

Un observador de alta ganancia debe cumplir con ciertas condiciones y cierta metodología necesaria para su construcción, con el objetivo de estimar los estados de un sistema no lineal como se muestra en Gauthier (1992).

Considere el siguiente sistema no lineal afín al control

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t)g_i(x(t)) \\ y(t) &= h(x(t)) \end{aligned} \tag{3.3}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u_i(t) \in \mathbb{R}^m$, $i = 1, \dots, m$, m es el número de entradas. $y(t) \in \mathbb{R}^p$, $f(x(t)) \in \mathbb{R}^n$ y $g_i(x(t)) \in \mathbb{R}^n$.

Assumiendo que el sistema mostrado en la Ecuación (3.3) es observable para cualquier entrada, la matriz de observabilidad debe ser no singular, esto quiere decir que es invertible. La matriz $\phi(x(t))$ es un difeomorfismo.

$$\phi(x(t)) = \begin{bmatrix} h(x(t)) \\ L_f h(x(t)) \\ \vdots \\ L_f^{n-1} h(x(t)) \end{bmatrix}$$

donde L_f representa la derivada de Lie de la función $h(x)$ evaluada a lo largo de $f(x)$. La cual se representa de la siguiente manera:

$$L_f h(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial h(x(t))}{\partial x_i} f_i(x(t))$$

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

Esto permite realizar una transformación de coordenadas del sistema original.

$$z(t) = \phi(x(t))$$

Esta transformación de coordenadas nos permite transformar el sistema no lineal en un sistema de forma triangular como se muestra en Hammouri *et al.* (2002) y la transformación de coordenadas determina un difeomorfismo.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + F_0(z(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t)F_i(z(t)) \\ y(t) &= Cz(t) \end{aligned} \tag{3.4}$$

donde

$$\blacksquare A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ \vdots & \dots & \ddots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\blacksquare C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

$$\blacksquare F_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ L_f^{n-1}h(x) \end{bmatrix}$$

Los elementos que conforman $F_i(z(t))$ son:

$$\begin{aligned} F_1(z(t)) &= F_1(z_1(t)) \\ F_2(z(t)) &= F_1(z_1(t), z_2(t)) \\ &\vdots \\ F_n(z(t)) &= F_1(z_1(t), \dots, z_{n-1}(t)) \end{aligned}$$

Para 1992 se propone un observador para el sistema mostrados en la Ecuación (3.4), el cual se muestra en a continuación.

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + F_0(z(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t)F_i(z(t)) - S_\alpha^{-1}C^T(C\hat{x} - y) \quad (3.5)$$

donde S_α es una matriz simétrica definida positiva y es la solución de la ecuación de Lyapunov $\alpha S_\alpha + A^T S_\alpha + S_\alpha A = C^T C$ con $\alpha > 0$. Si se considera un sistema de segundo orden la matriz S_α es

$$S_\alpha = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} & -\frac{1}{\alpha^2} \\ -\frac{1}{\alpha^2} & \frac{2}{\alpha^3} \end{bmatrix}$$

en las coordenadas originales, el observador dado en la ecuación 3.5 toma la siguiente forma

$$\dot{\hat{x}} = f(\hat{x}(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t)g_i(\hat{x}(t)) - \left[\frac{\partial \phi(\hat{x}(t))}{\partial \hat{x}} \right] S_\alpha^{-1}C^T(C\hat{x} - y) \quad (3.6)$$

donde $\frac{\partial \phi(\hat{x}(t))}{\partial \hat{x}}$ es la matriz Jacobiana de $\phi(\hat{x}(t)) = \phi(x(t))|_{x(t)=\hat{x}(t)}$. Este observador es particularmente simple, este es solo una copia del sistema original, con un término de corrección que no depende del sistema, pero si en la dimensión. Mediante la variación de α el error de estimación converge exponencialmente a cero.

3.1.2. Diseño de observadores Takagi-Sugeno para el generador de vapor de la central termoeléctrica

Pruebas de observabilidad

En esta sección se presenta el diseño del banco de observadores para el modelo T-S, el cual se utilizará para detección de fallas en el modelo no lineal de la central termoeléctrica. También se presentan las pruebas de observabilidad con respecto a cada salida, para la construcción de los observadores (Khalil y Grizzle, 1996).

Se dice que el sistema es observable con respecto a la salida medida si el determinante de la matriz de observabilidad es diferente de cero, esto es

$$\det \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} \neq 0$$

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

Considerando el modelo T-S mostrado en la Ecuación (3.7).

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i x + B_i u) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(C_i x) \end{aligned} \tag{3.7}$$

- Prueba de observabilidad con respecto a la salida P_D .

Para este caso las matrices son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 z_1 & 0 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0]$$

$$CA = [-k_1 z_1 \quad 0]$$

Una vez obtenidos los valores para formar la matriz de observabilidad y se calcula el determinante.

$$\det \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -k_1 z_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -k_1 z_1 & 0 \end{bmatrix} = 0$$

Se obtuvo el determinante el cual es igual a cero y en este caso nuestro sistema no es observable. Por lo tanto no se puede construir el observador con la señal de salida P_D .

- Prueba de observabilidad con respecto la salida P_O .

Para este caso las matrices son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 z_1 & 0 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix}$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$C = [0 \quad 1]$$

$$CA = [k_4 z_1 - k_5 z_2 \quad -k_6]$$

Una vez obtenidos los valores para formar la matriz de observabilidad y se calcula el determinante.

$$\det \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$\det \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix} = -k_4 z_1 + k_5 z_2$$

Se obtuvo el determinante, el cual es diferente de cero por lo tanto nuestro sistema es observable. En este caso si se puede construir el observador con la señal de salida P_O .

- Debido a que no se pudo construir el observador con la salida P_D , se utilizó la sumatoria de las señales de los sensores ($P_D + P_O$) para construir un segundo observador para lograr la detección de fallas. Para este caso las matrices son las siguientes:

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 z_1 & 0 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 1]$$

$$CA = [-k_1 z_1 + k_4 z_1 - k_5 z_2 \quad -k_6]$$

de la misma manera que las pruebas anteriores, una vez obtenidos los valores para formar la matriz de observabilidad se necesita conocer el determinante.

$$\det \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix}$$

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

$$\det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_4 z_1 - k_5 z_2 & -k_6 \end{bmatrix} = -k_6 - (-k_1 z_1 + k_4 z_1 - k_5 z_2)$$

se obtuvo el determinante, el cual es diferente de cero por lo tanto nuestro sistema es observable con respecto a esa salida. En este caso si se puede construir el observador con la señal de salida $P_D + P_O$, tomando en cuenta que las señales de salida de los sensores se encuentran normalizadas.

Análisis de estabilidad de Lyapunov para el error de convergencia

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i x + B_i u) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(C_i x) \end{aligned} \tag{3.8}$$

Se construyó un observador para el modelo de la Ecuación (3.8) de la siguiente forma.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (A_i \hat{x} + B_i u + K_i (y - \hat{y})) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (C_i \hat{x}) \end{aligned} \tag{3.9}$$

Donde A_i , B_i , C_i son conocidas, x es el vector de estados, u es vector de estradas, ω_i es el vector de variables programadas y K_i son las ganancias para la convergencia del error para cada modelo local.

Usando el observador de la Ecuación (3.9), la dinámica del error puede ser escrita como

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{\hat{x}} \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i x + B_i u) - \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i \hat{x} - B_i u - K_i(C_i x - C_i \hat{x})) \\ \dot{e} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z)(A_i - K_i C_i)(x - \hat{x}) \end{aligned}$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) ((A_i - K_i C_i) e)$$

Para la condición de estabilidad del error, se usa la función candidata de Lyapunov

$$V = e^T P e$$

$$\dot{V} = e^T P \dot{e} + \dot{e}^T P e$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (e^T P (A_i - K_i C_i) e + [(A_i - K_i C_i) e]^T P e)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (e^T (P A_i - P K_i C_i) e + e^T (A_i^T - C_i^T K_i^T) P e)$$

$$\dot{V} = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (e^T (P A_i - P K_i C_i) e + e^T (A_i^T P - C_i^T K_i^T P) e)$$

La dinámica del error de estimación es asintóticamente estable si existe $P = P^T > 0$ y K_i tal que se cumplan las siguientes LMIs.

$$* P > 0$$

$$* \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) ((P A_i - P K_i C_i) e + e^T (A_i^T P - C_i^T K_i^T P)) < 0$$

En este caso como se produce una bilinealidad matricial, se procede a realizar un cambio de variable dentro de las desigualdades.

$$\sum_{i=1}^4 \omega_i(z) Q_i = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) P K_i$$

$$\sum_{i=1}^4 \omega_i(z) Q_i^T = \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) K_i^T P$$

De esta manera se elimina la bilinealidad y las LMIs quedan de la siguiente manera

$$* P > 0$$

$$* \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) ((P A_i - Q C_i) e + e^T (A_i^T P - C_i^T Q^T)) < 0$$

Se utilizó una región LMIs para que los observadores tengan los polos en el semiplano izquierdo del plano complejo. Para ello se utilizó la función $f_{s_1} = z^T + z + 2\zeta$, aplicando esta región de solución a la desigualdad de Lyapunov (Duan y Yu (2013)), obtenemos

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

* $P > 0$

* $\sum_{i=1}^4 \omega_i(z) ((PA_i - QC_i)e + e^T(A_i^T P - C_i^T Q^T) + 2\zeta P) < 0$

3.1.3. Diseño de observadores de alta ganancia para el generador de vapor de la central termoeléctrica

En esta sección se presenta la construcción un banco de observadores de alta ganancia para la estimación de los estados del generador de vapor. Para la construcción de los observadores de alta ganancia partimos del sistema no lineal como el que se muestra en la Ecuación (3.10), en este caso el modelo a utilizar esta dado por la Ecuación (2.9a).

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)) + \sum_{i=1}^m u_i(t)g_i(x(t)) \\ y(t) &= h(x(t))\end{aligned}\tag{3.10}$$

Donde

- $f(x) = \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ k_4 x_1^{9/8} \theta(u_2) - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix}$
- $g_1 = \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix}$
- $g_2 = \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix}$

Para el modelo no lineal se utilizaron observadores de alta ganancia los cuales son de la forma

$$\mathcal{O}_{HG} \begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + g(\hat{x})u - \left(\frac{\partial \phi(\hat{x})}{\partial \hat{x}}\right)^{-1} S_\alpha^{-1} C^T (C\hat{x} - y) \\ \hat{y} = h(\hat{x}) \end{cases}\tag{3.11}$$

donde $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$ son los estados estimados, $u \in \mathbb{R}^p$ son las entradas al sistema, $y \in \mathbb{R}^q$ son las salidas, $\hat{y} \in \mathbb{R}^q$ son las salidas estimadas, $f(\hat{x})$, $g(\hat{x})$ y $h(\hat{x})$ son campos vectoriales.

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

Para este observador la ganancia esta formada por

- La inversa del jacobiano de $\phi(x)$.
- La inversa de la matriz de la solución de la ecuación de Lyapunov (S_α) para un sistema de segundo orden.
- La matriz de salida transpuesta (C^T).

Para la construcción del observador de alta ganancia se realiza la prueba de observabilidad con respecto a la salida medida del sistema con la que se desea estimar los estados.

Donde el sistema es observable con respecto a la salida si el determinante del jacobiano(J) de la matriz de transformación es diferente de cero, esto es

$$\det(J\phi(x)) = \det\left(\frac{\partial\phi(x)}{\partial x}\right) \neq 0$$

- **Prueba de observabilidad con respecto a la salida $h(x) = P_D$.**

Se realiza la transformación de coordenadas del modelo.

donde

$$Z(t) = \phi(x) = \begin{pmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \end{pmatrix}$$
$$L_f h(x) = (1 \ 0) \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ (k_4 \theta(u_2) - k_5) x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix} = -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2)$$
$$\phi(x) = \begin{pmatrix} x_1 \\ -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \end{pmatrix}$$

Una vez obtenida la función de transformación, se realiza la prueba de observabilidad donde el determinante del jacobiano (J) de $\phi(x)$ debe ser no singular, esto es

$$\left(\frac{\partial\phi(x)}{\partial x}\right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{9}{8} k_1 x_1^{1/8} \theta(u_2) & 0 \end{bmatrix}$$

3.1. Observadores para el generador de vapor de una central termoeléctrica

$$\det(J\phi(x)) = \det \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{9}{8}k_1x_1^{1/8}\theta(u_2) & 0 \end{bmatrix} = 0$$

En este caso el sistema no es observable con respecto a la salida P_D , debido a que la matriz de transformación no es invertible y no se puede construir un observador para esta salida.

- **Prueba de observabilidad con respecto a la salida $h(x) = P_O$.**

$$Z(t) = \phi(x) = \begin{pmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \end{pmatrix}$$

$$L_f h(x) = (0 \quad 1) \begin{pmatrix} -k_1x_1^{9/8}\theta(u_2) \\ (k_4\theta(u_2) - k_5)x_1^{9/8} - k_6x_2 \end{pmatrix} = (k_4\theta(u_2) - k_5)x_1^{9/8} - k_6x_2$$

$$\phi(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ (k_4\theta(u_2) - k_5)x_1^{9/8} - k_6x_2 \end{pmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz de transformación, se realiza la prueba de observabilidad donde el determinante del jacobiano de $\Phi(x)$ debe ser no singular, esto es

$$\left(\frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{9}{8}k_4x_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x_1^{1/8} & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$\det(J\phi(x)) = \det \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{9}{8}k_4x_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x_1^{1/8} & -k_6 \end{bmatrix} = - \left(\frac{9}{8}k_4x_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x_1^{1/8} \right)$$

En este caso es posible construir un observador para esta salida, ya que la matriz de transformación es invertible.

- **Prueba de observabilidad con respecto a la salida $h(x) = P_D + P_O$.**

Se realiza la transformación de coordenadas del modelo.

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

donde

$$Z(t) = \phi(x) = \begin{pmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \end{pmatrix}$$

$$L_f h(x) = (1 \quad 1) \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ (k_4 \theta(u_2) - k_5) x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix}$$

$$L_f h(x) = -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) + (k_4 \theta(u_2) - k_5) x_1^{9/8} - k_6 x_2$$

$$\phi(x) = \begin{pmatrix} x_1 + x_2 \\ -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) + (k_4 \theta(u_2) - k_5) x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix}$$

Una vez obtenida la matriz de transformación, se realiza la prueba de observabilidad donde el determinante del jacobiano (J) de $\phi(x)$ debe ser no singular, esto es

$$\left(\frac{\partial \phi(x)}{\partial x} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{9}{8} k_1 x_1^{1/8} \theta(u_2) + \frac{9}{8} k_4 x_1^{1/8} \theta(u_2) - \frac{9}{8} k_5 x_1^{1/8} & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$\det(J\phi(x)) = \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\frac{9}{8} k_1 x_1^{1/8} \theta(u_2) + \frac{9}{8} k_4 x_1^{1/8} \theta(u_2) - \frac{9}{8} k_5 x_1^{1/8} & -k_6 \end{bmatrix}$$

$$\det(J\phi(x)) = -k_6 - \left(-\frac{9}{8} k_1 x_1^{1/8} \theta(u_2) \frac{9}{8} k_4 x_1^{1/8} \theta(u_2) - \frac{9}{8} k_5 x_1^{1/8} \right)$$

Para el caso de la sumatoria de las señales de los sensores, es posible construir un observador ya que la matriz de transformación es invertible.

3.2. Diseño del control para el generador de vapor

Se diseña un sistema de control para la regulación de la presión en el domo y el nivel en el domo debido a que son las variables críticas del sistema y deben permanecer en medidas constante para el funcionamiento del proceso.

3.2.1. Linealización del modelo no lineal de Åström

Para el diseño de los controladores se utilizó el modelo de en su forma general como se muestra en la ecuación 3.12. El modelo se linealizó considerando $x_1 = 163.9231 \text{ kg/cm}^2$, $x_2 = 120 \text{ Mw}$, $x_3 = 446 \text{ kg/m}^3$, $x_w = 0.5365 \text{ m}$, $u_1 = 0.5881$, $\theta(u_2) = 0.75$ y $u_3 = 0.7382$ los cuales son constantes, debido a que estos valores pertenecen a el punto de operación de la planta cuando la demanda es del 75 % se capacidad.

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) + k_2 u_1 - k_3 u_3 \\ k_4 x_1^{9/8} \theta(u_2) - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \\ k_7 + (-k_8 \theta(u_2) + k_9) x_1 \end{pmatrix}}_{f(x,u)}$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)} \quad (3.12)$$

$$q_e = (0,854\theta - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

Las salidas del sistema son x_1 que es la presión en el domo, x_2 que es la potencia generada y x_w que es el nivel en el domo y para el sistema no lineal se forma $h(x)$.

$$h(x) = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_w \end{pmatrix}$$

Para la linealización del modelo no lineal se realizó el jacobiano con respecto a los estados y a las entradas como en Dimeo y Lee (1995), la evaluación se realizó en el punto de operación anterior mencionado.

$$A = \left(\frac{\partial(f(x,u))}{\partial(x)} \right) = \begin{bmatrix} -\frac{9}{8}k_1 x_1^{1/8} \theta(u_2) & 0 & 0 \\ \frac{9}{8}k_4 x_1^{1/8} \theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5 x_1^{1/8} & -k_6 & 0 \\ (-k_8 \theta(u_2) + k_9) x_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,87287 * 10^{-3} & 0 & 0 \\ 8,24612 * 10^{-3} & -0,1 & 0 \\ -7,47058 * 10^{-3} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$B = \left(\frac{\partial(f(x,u))}{\partial(u)} \right) = \begin{bmatrix} k_2 & -k_3 \\ 0 & 0 \\ 0 & k_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,9 & -0,15 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1,659 \end{bmatrix}$$

$$C = \left(\frac{\partial(h(x))}{\partial(x)} \right) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 6,9808 * 10^{-3} & 0 & 3,240605 * 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$D = \left(\frac{\partial(h(x))}{\partial(u)} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0,253 & -0,01396 \end{bmatrix}$$

Una vez obtenida la linealización del modelo, se obtiene la función de transferencia. En este caso es una matriz de funciones de transferencia ($M_{ft}(s)$) debido a que se obtiene cada función de transferencia de cada salida con respecto a cada entrada.

Para obtener la función de transferencia se utilizó la ecuación $C(SI - A)^{-1}B + D$.

$$M_{ft}(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) \\ H_{31}(s) & H_{32}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0,9s^2+0,09s}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} & \frac{-0,15s^2-0,015s}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} \\ \frac{0,0074s}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} & \frac{-0,0012s}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} \\ \frac{0,253s^3+0,0323s^2-0,0211s-0,0022}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} & \frac{-0,014s^3+0,0029s^2+0,0041s+0,0004}{s^3+0,1029s^2+0,0003s} \end{bmatrix}$$

Se utilizaron las funciones de transferencia que corresponde a $H_{11}(s)$ y $H_{32}(s)$ para la construcción de los controladores, esto debido a que la función de transferencia $H_{11}(s)$ relaciona la señal de entrada de flujo de combustible con la salida de presión en el domo y la función de transferencia $H_{32}(s)$ relaciona el flujo de agua de alimentación con el nivel de agua en el domo.

3.2.2. Diseño del controlador de presión

Se diseñó un control PI para la regulación de la presión en el domo, en la Figura (3.4) se muestra el diagrama a bloques del controlador, el cual se realizó mediante la colocación de polos.

3.2. Diseño del control para el generador de vapor

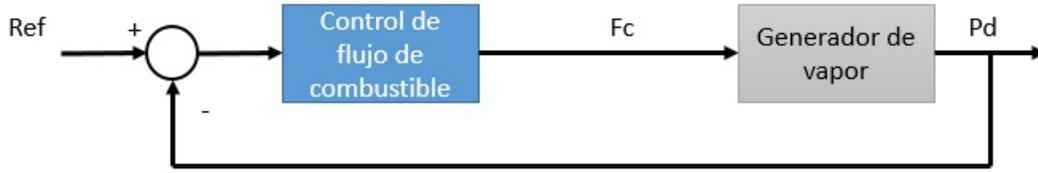


Figura 3.4: Diagrama a bloques del control de presión.

Para este caso se utilizó la función de transferencia de un controlador PI como se muestra en la Ecuación (3.13) y la función de transferencia $H_{11}(s)$ de la Ecuación (3.14).

$$F_{PI}(s) = \frac{k_p(s + \frac{k_i}{k_p})}{s} \quad (3.13)$$

$$H_{11}(s) = \frac{0,9s^2 + 0,09s}{s^3 + 0,1029s^2 + 0,0003s} \quad (3.14)$$

Utilizando el álgebra de bloques se simplificaron las dos funciones de transferencia anteriores y obtenemos 3.15.

$$I_1(s) = F_{PI}(s)H_{11}(s)$$

$$I_1(s) = \frac{0,9k_p s^3 + (0,09k_p + 0,9k_i)s^2 + 0,09k_i s}{s^4 + 0,1029s^3 + 0,0003s^2} \quad (3.15)$$

$$G_1(s) = \frac{I_1(s)}{1 + I_1(s)}$$

$$G_1(s) = \frac{0,9k_p s^3 + (0,09k_p + 0,9k_i)s^2 + 0,9k_i s}{s^4 + 0,1029s^3 + 0,0003s^2 + 0,9k_p s^3 + (0,09k_p + 0,9k_i)s^2 + 0,9k_i s}$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$G_1(s) = \frac{0,9k_p s^3 + (0,09k_p + 0,9k_i)s^2 + 0,9k_i s}{s^4 + (0,1029 + 0,9k_p)s^3 + (0,0003 + 0,09k_p + 0,9k_i)s^2 + 0,9k_i s} \quad (3.16)$$

En este caso se propuso una función de transferencia que se muestra en la Ecuación (3.17), la cual cuenta con polos negativos.

$$P_1(s) = \frac{13,1s^3 + 1,358s^2 + 0,0081s}{s^4 + 13,65s^3 + 1,358s^2 + 0,0081s} \quad (3.17)$$

se igualan los términos de los denominadores de las funciones de transferencia para poder calcular los valores de la ganancia del controlador.

Empezamos con los términos con respecto a s^3 .

$$13,6 = (0,1029 + 0,9k_p)$$

$$13,6 - 0,1029 = 0,9k_p$$

$$k_p = \frac{13,4971}{0,9} = 14,99$$

continuamos con los términos con respecto a s^2 , substituyendo el valor de k_p el cual ya fue encontrado.

$$1,358 = (0,0003 + 0,09k_p + 0,9k_i)$$

$$1,358 = (0,0003 + 1,35 + 0,9k_i)$$

$$1,358 = 1,3503 + 0,9k_i$$

$$1,358 - 1,3503 = 0,9k_i$$

$$k_i = \frac{0,0083}{0,9} = 0,0092$$

3.2. Diseño del control para el generador de vapor

Los valores obtenidos para cada ganancia mediante la colocación de polos son:

$$k_p = 15$$

$$k_i = 0,009$$

3.2.3. Diseño del controlador de nivel

Para el diseño del control de nivel de agua en el domo se utilizó un control en cascada, el controlador esclavo se encuentra incluido en la función de transferencia del nivel. En la Figura (3.5) se muestra el diagrama a bloques del control de nivel.

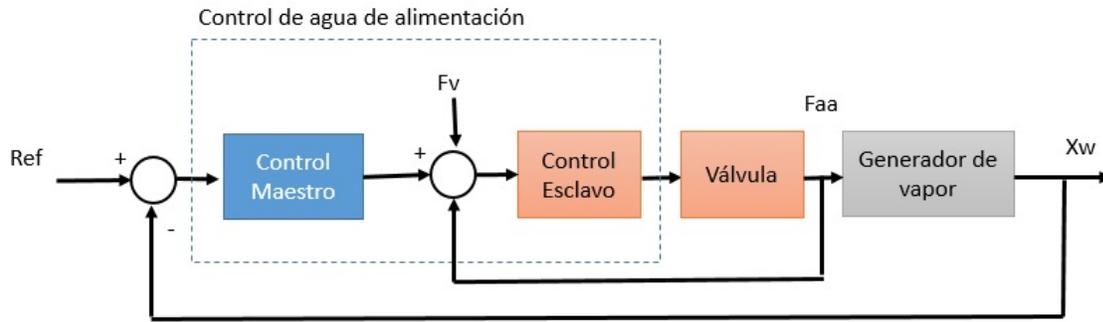


Figura 3.5: Diagrama a bloques del control de nivel.

En este caso el controlador esclavo es considerado puramente proporcional y con una ganancia unitaria. Para el controlador maestro el cual es un *PI*, se utilizó la función de transferencia de un *PI* de la Ecuación (3.13) y la función de transferencia $H_{32}(s)$ que se muestra en la Ecuación (3.18).

$$H_{32} = \frac{-0,014s^3 + 0,0029s^2 + 0,0041s + 0,0004}{s^3 + 0,1029s^2 + 0,0003s} \quad (3.18)$$

de la misma manera que para el diseño del controlador anterior, se utilizó el álgebra de bloques para la simplificación de las funciones de transferencia 3.13 y 3.18.

$$I_2(s) = F_{PI}(s)H_{11}(s)$$

$$I_2(s) = \frac{-0,014k_p s^4 + (0,0029k_p - 0,014k_i)s^3 + (0,0041k_p + 0,0029k_i)s^2 + (0,0004k_p + 0,0041k_i)s + 0,0004k_i}{s^4 + 0,10295s^3 + 0,0003s^4} \quad (3.19)$$

3. Diseño de observadores y control para el generador de vapor.

$$G_2(s) = \frac{I_2(s)}{1 + I_2(s)}$$

$$Num(s) = -0,014k_p s^4 + (0,0029k_p - 0,014k_i)s^3 + (0,0041k_p + 0,0029k_i)s^2 + (0,0004k_p + 0,0041k_i)s + 0,0004k_i$$

$$Den(s) = (1 - 0,014k_p)s^4 + (0,10295 + 0,0029k_p - 0,014k_i)s^3 + (0,0003 + 0,0041k_p + 0,0029k_i)s^2 + (0,0004k_p + 0,0041k_i)s + 0,0004k_i$$

$$G_2(s) = \frac{Num(s)}{Den(s)} \quad (3.20)$$

De la misma manera se propuso una función de transferencia para el cálculo de las ganancias k_p y k_i del controlador de nivel.

$$P_2(s) = \frac{-0,14S^4 + 0,02886S^3 + 0,04103S^2 + 0,004041S + 0,000004}{0,86S^4 + 0,1318S^3 + 0,04133S^2 + 0,004041S + 0,000004} \quad (3.21)$$

Se igualaron los términos semejantes de cada denominador de las funciones de transferencia para calcular cada una de las ganancias del controlador, primero se calculó el valor de k_p .

$$0,86 = 1 - 0,014k_p$$

$$0,86 - 1 = -0,014k_p$$

$$-0,14 = -0,014k_p$$

$$k_p = \frac{-0,14}{-0,014} = 10$$

una vez obtenido el valor de k_p se sustituyó en los términos semejantes de s^2 .

$$0,1318 = 0,10295s + 0,0029k_p - 0,014k_i$$

$$0,1318 = 0,10295 + 0,029 - 0,014k_i$$

$$0,1318 - 0,13195 = -0,014k_i$$

$$k_i = \frac{-0,00015}{-0,014} = 0,01$$

se utilizaron los valores obtenidos para comprobar los otros los otros términos del denominador.

$$0,04133 = 0,0003 + 0,0041k_p + 0,0029k_i$$

$$0,04133 = 0,0003 + 0,041 + 0,000029$$

$$0,04133 = 0,041329$$

Los valores obtenidos para cada ganancia mediante la colocación de polos son:

$$k_p = 10$$

$$k_i = 0,01$$

3.3. Conclusión del capítulo 3

En este capítulo se logró el diseño de dos observadores Takagi-Sugeno basados en la representación Takagi-Sugeno construida en el capítulo 2. Se realizaron las pruebas de observabilidad con respecto a cada salida para su construcción y se generó un observador mediante la señal del sensor de presión en el domo y otro mediante la sumatoria de las señales de los sensores de presión en el domo y de potencia eléctrica generada.

Se diseñó un sistema de control mediante colocación de polos, para el cual se linealizó en un punto de operación de la central termoelectrónica. El sistema de control regula la presión en el domo y el nivel de agua en el domo para evitar daños en el mismo y mantener una calidad en el vapor generado.

Capítulo 4

Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

El objetivo de este capítulo es mostrar los resultados obtenidos del sistema de detección y localización de fallas en sensores mediante observadores Takagi-Sugeno y observadores de alta ganancia.

En la sección 4.1 se muestra una breve teoría sobre la detección y localización de fallas basada en modelo. Posteriormente en la sección de 4.2 se muestra la construcción del sistema de detección y localización de fallas en sensores mediante observadores Takagi-Sugeno y observadores de alta ganancia. También se muestran las gráficas de los resultados del sistema de detección y localización de fallas en los sensores de presión en el domo, potencia eléctrica generada y nivel de agua en el domo del generador de vapor de la central termoeléctrica.

4.1. Teoría de sistemas de detección de fallas

En esta sección se muestran algunos conceptos importantes sobre la detección y localización de fallas, los cuales son utilizados para la construcción de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores.

Falla

Consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándares de operación. La detección de una falla es la determinación de la presencia de dicha falla en el sistema así como el instante de su aparición.

Residuo

Señal que contiene información de la falla basada en la desviación entre las medidas de las Entradas/Salidas del sistema (real) y estimaciones obtenidas mediante un modelo del mismo.

Síntoma

Es un indicador de falla, que se activa cuando ocurre cualquier desviación de un residuo diferente de cero.

Redundancia

Uso de más de un método para obtener el estado o característica de un sistema (Puig *et al.*, 2004).

- Redundancia física: *El enfoque tradicional de diagnóstico de fallas, hablando en un contexto amplio, se basa en métodos de redundancia física o de hardware, los cuales emplean múltiples sensores, actuadores, componentes de medición y control de una variable en particular. El mayor problema de este método es el costo de mantenimiento y del equipo adicional, así como el espacio requerido para dichos instrumentos. Este método se utiliza cuando existe una variable crítica en un proceso y es necesario tener una medición correcta de la misma y si un sensor falla se pueda estar comparando con la medición de otros.*
- Redundancia analítica: *Este esquema se basa en la diferencia generada por la comparación de valores disímiles medidos; esta diferencia se llama señal residual o síntoma. La mayor ventaja de un enfoque basado en modelos es que requiere hardware adicional para realizar la detección de fallas y puede implementarse vía software, en un proceso controlado por computadora. El no contar con un modelo matemático que represente el funcionamiento físico del sistema, no poder reconstruir la señal que se desea estimar y los costos computacionales que se puedan generar, pueden considerarse como limitaciones para su aplicación.*

Generadores de residuos

Los esquemas de redundancia tienen algunos aspectos similares al de un observador dinámico de estados, lo que ha motivado que los problemas de detección de fallas se aborden desde los años ochenta apoyándose del diseño de observadores. Un generador de residuo basado en observador es presentado en la Figura (4.1) (Verde *et al.*, 2013).

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

En la Figura (4.1) se puede apreciar que la diferencia entre la salida del sistema y la salida del observador es candidata a ser un residuo, dado que en condiciones nominales de operación esta diferencia debe ser cero. En el caso de exista una mal comportamiento en el sistema el residuo cambiaría su valor. La evaluación del residuo generado se realiza con el fin de detectar y aislar una falla, el cual se analiza con respecto a un umbral. El umbral es valor del residuo a partir del cual se considera la existencia de una falla (Verde *et al.*, 2013).

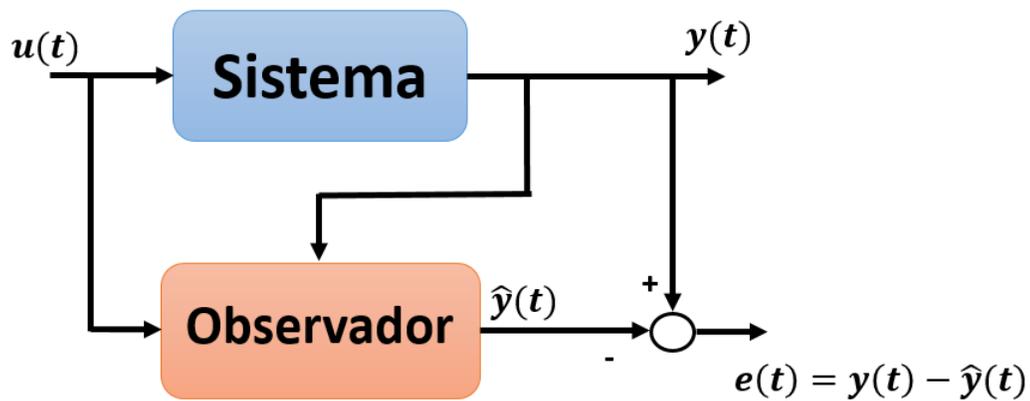


Figura 4.1: Generador de residuo con observador.

En la Figura (4.2) se muestra una señal de residuo a lo largo de un tiempo t , esta señal de residuo genera un síntoma cuando sobrepasa la señal del umbral fijo.

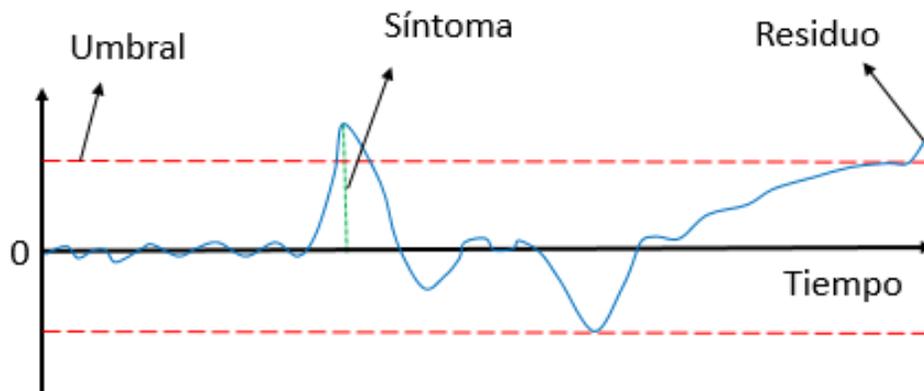


Figura 4.2: Residuo, síntoma y umbral.

Un síntoma en un residuo es evaluado a partir de una relación

$$S_i = \begin{cases} 1, & |r_i| > \mu, \quad \forall t \geq 0 \\ 0, & |r_i| \leq \mu, \quad \forall t \geq 0 \end{cases}$$

donde s_i es el síntoma que se genera, i es el número de residuos y μ es el umbral definido (Puig *et al.*, 2004).

La detección de fallas en un sistema o proceso no es suficiente desde el punto de vista de seguridad y mantenimiento, por lo cual es necesario identificar los componentes dañados para realizar acciones correctivas o llevar el proceso a una condición segura.

Para el aislamiento de fallas, los síntomas de los residuos para cada una de las fallas en los elementos (sensores o actuadores) se colocan como columnas de una matriz de firmas de fallas. En caso que ocurra un falla en el proceso y la firma coincide con alguna de las de la matriz, podemos declarar una falla en el elemento con el cual coincida la firma de falla.

En la Tabla (4.1) se muestra un ejemplo de una matriz de firmas de fallas, con síntomas generados por fallas en sensores. En la columna 1 se muestra el número de síntoma correspondiente a cada residuo, en este caso tenemos 3 residuos. En la columna 2 se muestran los síntomas generados cuando ocurre una falla en el sensor 1, en la columna 3 se muestran los síntomas que se generan cuando ocurre una falla en el sensor 2 y en la columna 4 se muestran los síntomas generados cuando ocurre una falla en el sensor 3 (Puig *et al.*, 2004).

Tabla 4.1: *Matriz de firma de fallas.*

| Sensor Síntomas | Falla sensor 1 | Falla sensor 2 | Falla sensor 3 |
|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Sr_1 | 1 | 0 | 0 |
| Sr_2 | 0 | 1 | 0 |
| Sr_3 | 0 | 0 | 1 |

Las condiciones de aislamiento de fallas se comprueban de distintas formas, una vez obtenidos los síntomas, ya que mediante el conjunto de síntomas se determina la activación de las alarmas.

Existen otras diferentes técnicas para activar las alarmas de fallas.

- En función de parejas de residuos con distintas respuestas; lo cual es como un reconocimiento de patrones (Stork *et al.*, 2001).

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

- Síntomas multivaluados generados con el uso de métodos heurísticos o clásicos que tienen cierto patrón de comportamiento ante cada falla (Qin, 2009).
- Parámetros estadísticos comunes como pruebas de hipótesis o relación de probabilidad (Basseville *et al.*, 1993).

Banco de observadores

Al tener en cuenta que el propósito es detectar y aislar una falla, se han propuestos distintas configuraciones particulares de bancos de observadores.

- Banco de observadores dedicados (DOS)

Cuando se usa el esquema de banco de observadores dedicados para aislar p fallas en sensores, se diseñan p observadores, de tal manera que el observador i utilice todas las entradas y sólo una salida y_i como lo muestra la Figura (4.3). El observador así diseñado es sensible sólo a las fallas del sensor i (Verde 2013).

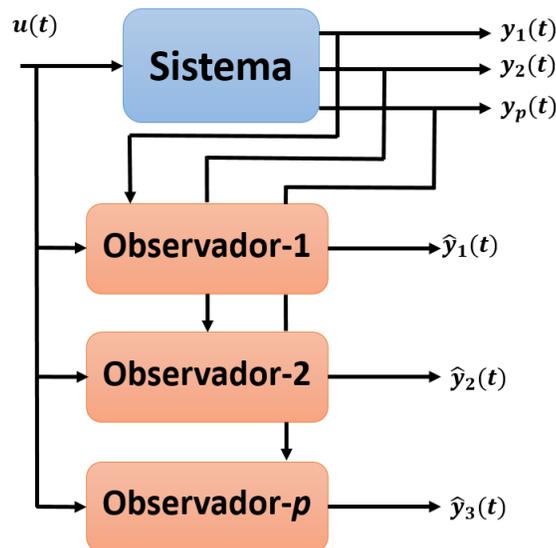


Figura 4.3: Esquema de p observadores dedicados para p fallas en sensores.

- Banco de observadores generalizados (GOS)

En el caso del esquema generalizado para las fallas de sensor se diseñan p observadores de manera que el observador i utilice todas las salidas, menos y_i , lo que lo hace sensible a todas las fallas de sensor menos al i , como se muestra en la Figura (4.4) (Verde 2013).

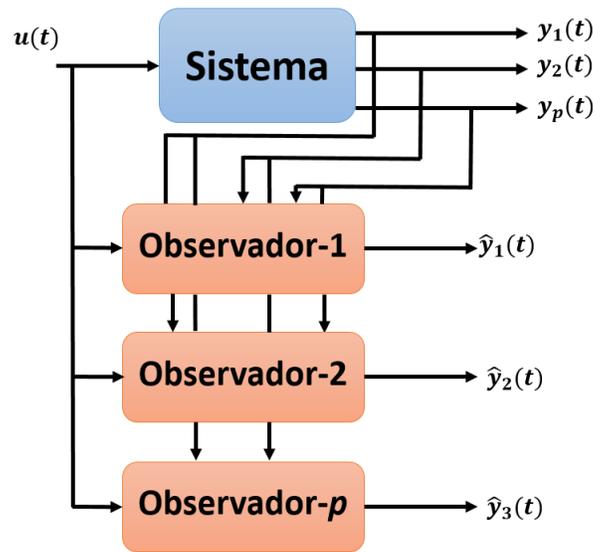


Figura 4.4: Esquema de p observadores generalizados para p fallas en sensores.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

4.2.1. Diseño de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno

Para la detección y localización de fallas en sensores se realiza la construcción de un banco de observadores. El banco se basa en el diseño de observadores Takagi-Sugeno para el generador de vapor, desarrollado en el capítulo 2.

En la Figura (4.5) se muestra el diagrama a bloques de la estructura del sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno y el cálculo del nivel en el domo, mediante el cual se generan 6 residuos para la detección y localización de las fallas en los sensores del generador de vapor de la central termoelectrica a diferentes cargas en la demanda de vapor. Los residuos se generan mediante la diferencia de las señales de salida del modelo no lineal con las señales estimadas por los observadores Takagi-Sugeno y la estimación del nivel.

A continuación se muestra uno a uno cada residuo que se genera.

- $R_1 = x_1 - \hat{x}_{11}$
- $R_2 = x_2 - \hat{x}_{21}$

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

- $R_3 = x_w - \hat{x}_{w1}$
- $R_4 = x_1 - \hat{x}_{12}$
- $R_5 = x_2 - \hat{x}_{22}$
- $R_6 = x_w - \hat{x}_{w2}$

El modelo no lineal del generador de vapor se muestra en la Ecuación (4.1).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ k_4 x_1^{9/8} \theta(u_2) - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} u_3 \quad (4.1a)$$

$$\dot{x}_3 = (-k_8 \theta(u_2) + k_9 x_1) + (k_7) u_3$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0,001538x_3)(0,8x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304x_1)} \quad (4.1b)$$

$$q_e = (0,854\theta(u_2) - 0,147)x_1 + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$x_w = 0,05(0,13073x_3 + 100\alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

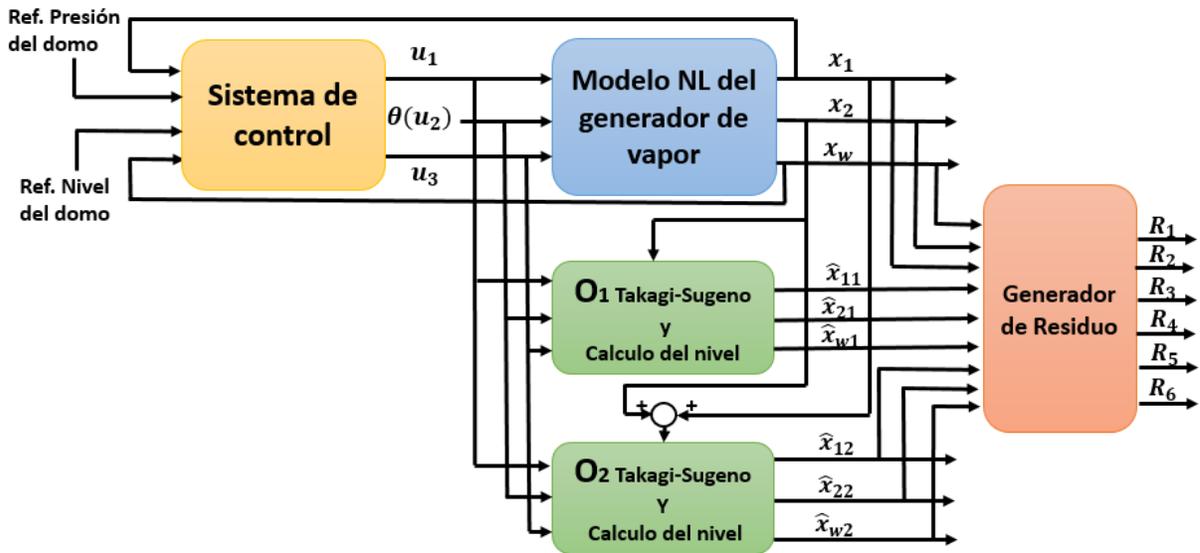


Figura 4.5: Diagrama a bloques del sistema FDI mediante observadores T-S.

Diseño del observador 1 con respecto a la salida P_D y estimación del nivel mediante señales estimadas.

Se diseña el observador 1 Takagi-Sugeno alimentado por todas las señales de entrada y por la señal P_O del sensor de salida, con las cuales se estimaran las señales de salida (P_D y P_O). El observador 1 esta compuesto por 4 modelos locales, los cuales requieren de una ganancia para la convergencia del error de estimación. Las ganancias se encuentran en la LMIs que se generaron en el análisis de estabilidad de Lyapunov para el error de convergencia del observador 1, que se desarrolló en el capítulo 2.

⊙ *Observador 1*

El observador 1 Takagi-Sugeno se muestra en la Ecuación (4.2).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (A_i \hat{x} + B_i u + K_i (y - \hat{y})) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (C_i \hat{x})\end{aligned}\tag{4.2}$$

Para el cálculo de las ganancias de corrección se resolvieron las LMIs, mediante el toolbox de Matlab. Se muestran las 5 LMIs que se obtuvieron del análisis de estabilidad de Lyapunov de los observadores, en la sección de diseño de observador 1 Takagi-Sugeno del capítulo 2, estas 5 LMIs se resolvieron para el cálculo de las ganancias.

- $P > 0$
- $(PA_1 - Q_1 C_{11})e + e^T (A_1^T P - C_{11}^T Q_1^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_2 - Q_2 C_{12})e + e^T (A_2^T P - C_{12}^T Q_2^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_3 - Q_3 C_{13})e + e^T (A_3^T P - C_{13}^T Q_3^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_4 - Q_4 C_{14})e + e^T (A_4^T P - C_{14}^T Q_4^T) + 2\zeta P < 0$

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Una vez obtenidas las matrices Q_1 a Q_4 y P de la solución de las LMIs, se obtiene el valor de las 4 ganancias, una para cada uno de los cuatro submodelos del observador 1 Takagi-Sugeno.

$$\star K_{11} = P^{-1}Q_1 = \begin{bmatrix} 50,7105 \\ 5,951 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{12} = P^{-1}Q_2 = \begin{bmatrix} 50,7105 \\ 5,951 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{13} = P^{-1}Q_3 = \begin{bmatrix} 50,7105 \\ 5,951 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{14} = P^{-1}Q_4 = \begin{bmatrix} 50,7105 \\ 5,951 \end{bmatrix}$$

⊙ *Estimación del nivel con señales del observador 1*

Se utilizan las señales estimadas del observador 1 Takagi-Sugeno para el cálculo del nivel en el domo del generador de vapor, para ello se utiliza la Ecuación (4.1b) y en función de las señales estimadas se reescribe como se muestra en la Ecuación (4.3). Esto se realiza debido a que el modelo no es completamente observable, pero el cálculo del nivel mediante las señales estimadas puede ser utilizado como un residuo para el sistema de detección de fallas.

$$\dot{\hat{x}}_{31} = (-k_8\theta(u_2) + k_9\hat{x}_{11}) + (k_7)u_3$$

$$\hat{\alpha}_{cs1} = \frac{(1 - 0,001538\hat{x}_{31})(0,8\hat{x}_{11} - 25,6)}{\hat{x}_{31}(1,0394 - 0,0012304\hat{x}_{11})} \quad (4.3)$$

$$\hat{q}_{e1} = (0,854\theta(u_2) - 0,147)\hat{x}_{11} + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$\hat{x}_{w1} = 0,05(0,13073\hat{x}_{31} + 100\alpha_{cs1} + \frac{q_{e1}}{9} - 67,975)$$

Diseño del observador 2 con respecto a la salida $P_D + P_O$ y estimación del nivel mediante señales estimadas.

Para la construcción de el observador 2 Takagi-Sugeno del banco de observadores mostrado en la Figura 4.5, se utiliza las sumatoria de las señales de medición del sensor de presión en el domo y el sensor de potencia generada. La sumatoria se utiliza debido a que mediante la señal de salida del sensor de presión en el domo no es posible estimar los estados, como se muestra en las pruebas de observabilidad con respecto a la salidas en la sección de diseño de observadores Takagi-Sugeno del capítulo 2.

⊙ *Observador 2*

Se construye un observador Takagi-Sugeno como se muestra en la Ecuación (4.4).

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (A_i \hat{x} + B_i u + K_i (y - \hat{y})) \\ y &= \sum_{i=1}^4 \omega_i(z) (C_i \hat{x})\end{aligned}\tag{4.4}$$

De la misma manera que en el observador 1, para el cálculo de las ganancias de corrección del opbservador 2 se resolvieron las LMIs, mediante el Toolbox de Matlab. Se muestras las 5 LMIs que se obtuvieron del análisis de estabilidad de Lyapunov de los observadores, en la sección de diseño de observador 2 Takagi-Sugeno del capítulo 2, estas 5 LMIs se resolvieron para el cálculo de las ganancias.

- $P > 0$
- $(PA_1 - Q_1 C_{21})e + e^T (A_1^T P - C_{21}^T Q_1^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_2 - Q_2 C_{22})e + e^T (A_2^T P - C_{22}^T Q_2^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_3 - Q_3 C_{23})e + e^T (A_3^T P - C_{23}^T Q_3^T) + 2\zeta P < 0$
- $(PA_4 - Q_4 C_{24})e + e^T (A_4^T P - C_{24}^T Q_4^T) + 2\zeta P < 0$

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Una vez obtenidas las matrices Q_1 a Q_4 y P de la solución de las LMIs, se obtiene el valor de las 4 ganancias, una para cada uno de los cuatro submodelos del observador 2 Takagi-Sugeno.

$$\star K_{21} = P^{-1}Q_1 = \begin{bmatrix} 23,5141 \\ -16,48 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{22} = P^{-1}Q_2 = \begin{bmatrix} 23,5141 \\ -16,48 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{23} = P^{-1}Q_3 = \begin{bmatrix} 23,5141 \\ -16,48 \end{bmatrix}$$

$$\star K_{24} = P^{-1}Q_4 = \begin{bmatrix} 23,5141 \\ -16,48 \end{bmatrix}$$

⊙ *Estimación del nivel con señales del observador 2*

De la misma manera que con el observador anterior se utilizan las señales estimadas del observador 2 Takagi-Sugeno para el cálculo del nivel en el domo del generador de vapor, para ello se utiliza la Ecuación (4.1b) y en función de las señales estimadas se reescribe como se muestra en la Ecuación (4.5).

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{32} &= (-k_8\theta(u_2) + k_9\hat{x}_{12}) + (k_7)u_3 \\ \hat{\alpha}_{cs2} &= \frac{(1 - 0,001538\hat{x}_{32})(0,8\hat{x}_{12} - 25,6)}{\hat{x}_{32}(1,0394 - 0,0012304\hat{x}_{12})} \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\hat{q}_{e2} = (0,854\theta(u_2) - 0,147)\hat{x}_{12} + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$\hat{x}_{w2} = 0,05(0,13073\hat{x}_{32} + 100\alpha_{cs2} + \frac{q_{e2}}{9} - 67,975)$$

4.2.2. Simulaciones y resultados de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno

Simulación 1: Prueba de convergencia de los observadores Takagi-Sugeno

EL objetivo de esta simulación es mostrar la convergencia de las señales de salida de los observadores Takagi-Sugeno con la señales de salida del modelo NL.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el metodo de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01 y con las condiciones iniciales diferentes a las del modelo para cada uno de los observadores. Para el modelo no lineal las condiciones iniciales son $x_1(0) = 127 \text{ kg/cm}^2$, $x_2(0) = 47.7 \text{ MW}$ y $x_w(0) = -0.0786 \text{ m}$, para el observador 1 Takagi-Sugeno son $\hat{x}_{11}(0) = 120 \text{ kg/cm}^2$, $\hat{x}_{21}(0) = 40 \text{ MW}$ y para la estimación 1 del nivel en el domo es $\hat{x}_{w1}(0) = -0.0186 \text{ m}$, para el observador 2 Takagi-Sugeno son $\hat{x}_{12}(0) = 145 \text{ kg/cm}^2$, $\hat{x}_{22}(0) = 55 \text{ MW}$ y para la estimación 2 del nivel en el domo es $\hat{x}_{w2}(0) = -0.0186 \text{ m}$. La duración de esta simulación es de $t = 250 \text{ s}$ para poder apreciar la convergencia de los observadores.

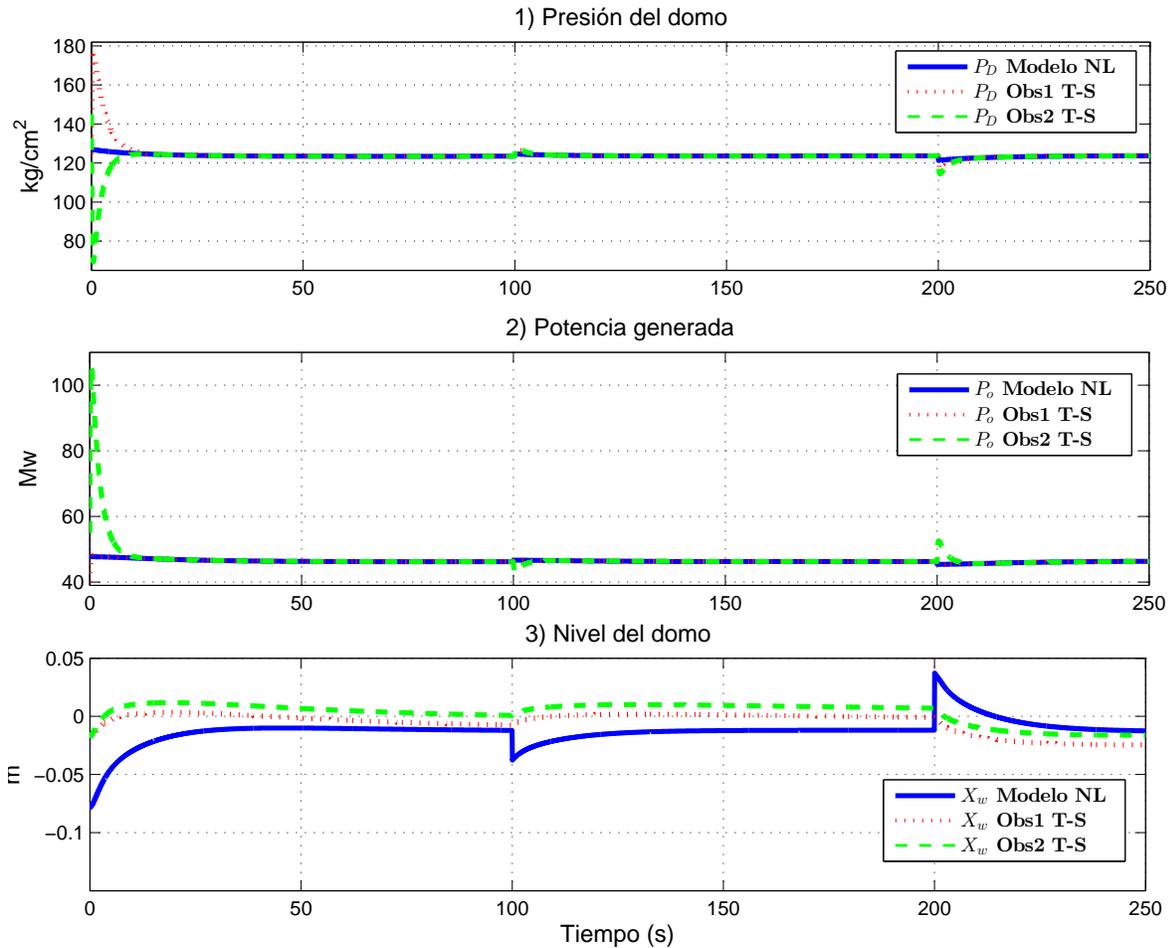


Figura 4.6: Convergencia de los observadores T-S.

En la Figura (4.6) se muestran las gráficas de convergencia de las señales estimadas de los observadores Takagi-Sugeno hacia las señales de salida del modelo no lineal. En color azul sólido se muestran las señales de salida del modelo no lineal, en color rojo punteado las señales de salida del observador 1 y en color verde moteado las señales de salida del

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

observador 2. En las gráficas 1 y 2 se muestra como las señal de los observadores convergen a la señal del modelo no lineal, para la simulación solo se muestran los primeros 250 segundos, para apreciar dicha convergencia. Podemos observar que en la gráfica 3 de la Figura (4.6) las señales estimadas del nivel en el domo logran una convergencia hacia la señal de nivel en el domo del modelo no lineal.

Analizando los resultados obtenidos en las gráficas 1 y 2 de la Figura (4.6), se puede determinar que los observadores convergen en un tiempo no mayor a los 50 s, después de ese tiempo la señales de los observadores logran estimar los valores de las señales del modelo no lineal. Las señales de estimación del nivel en el domo que se muestra en la gráfica 3 de la Figura (4.6) convergen a la señal del nivel en el domo del modelo no lineal en un tiempo no mayor a los 100 s, después de ese tiempo se logra la estimación del nivel en el domo del modelo no lineal.

Debido a la convergencia de los observadores Takagi-Sugeno mostrados en el diagrama a bloques de la Figura (4.5), se puede concluir que estos observadores diseñados se pueden utilizar para formar un banco de observadores del generador de vapor de la central termoeléctrica, junto con la estimación del nivel en el domo.

A partir de la simulación 2 hasta la simulación 5 se realizarán con una misma configuración. Se realizan cuatro cambios en la demanda de potencia eléctrica. Los cambios son representados por el parámetro $\theta(u_2)$ que indica la apertura de la válvula de control de vapor generado.

En las simulaciones 2, 3, 4 y 5 se hacen cuatro cambios en la demanda de potencia eléctrica. La simulación inicia con una demanda de potencia eléctrica del 50 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica de la planta, esto indica que el parámetro $\theta(u_2) = 0.5$, donde esto representa una apertura del 50 % de la válvula de control de vapor generado por la planta. El primer cambio se genera en $t \geq 7000$ s con $\theta(u_2) = 0.85$, esto indica una demanda del 85 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El segundo cambio se genera en $t \geq 12000$ s con $\theta(u_2) = 1$, con la demanda del 100 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El tercer cambio se produce en $t \geq 16000$ s con $\theta(u_2) = 0.75$, indicando una demanda del 75 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El cuarto y último cambio se generó en $t \geq 20000$ s y $\theta(u_2) = 0.95$, lo que indica un 95 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. Se agregó ruido de medición del 0.25 % del rango de medición del sensor, esto para cada una de las señales de salida del generador de vapor de la centra termoeléctrica.

En la gráfica de la Figura (4.7) se muestra en color azul sólido el comportamiento de la señal del parámetro $\theta(u_2)$, la cual indica los cambios de la demanda de potencia eléctrica generada por la planta. Se puede apreciar las diferentes aperturas de la válvula de control de vapor generado, el rango de apertura de la válvula es entre 0 y 1.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

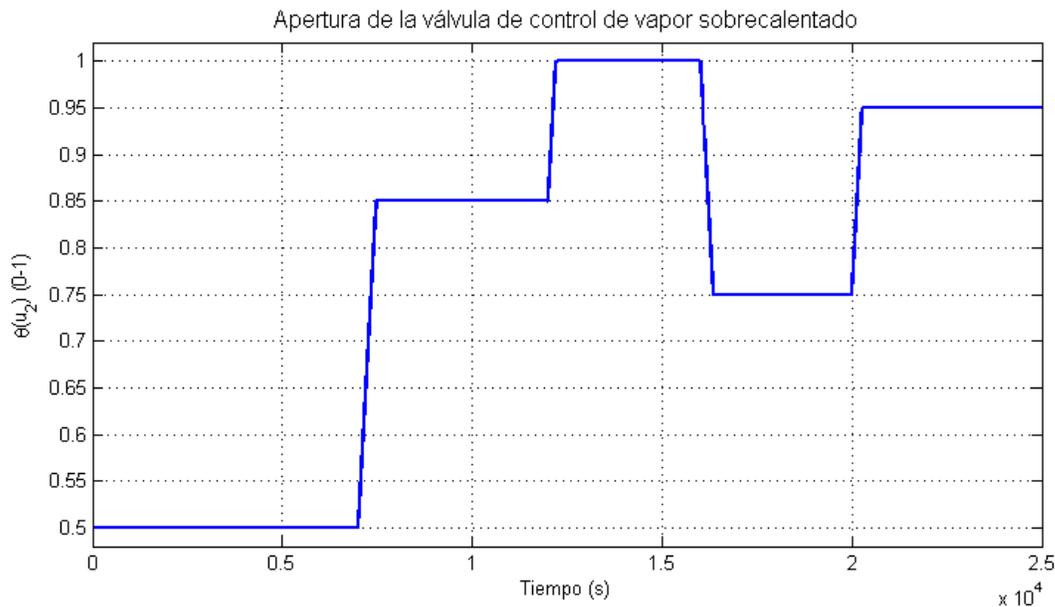


Figura 4.7: Apertura de la válvula de vapor sobrecalentado generado.

Simulación 2: Selección de umbrales para el sistema FDI mediante observadores Takagi-Sugeno con un funcionamiento nominal del generador de vapor.

Para la selección de umbrales se hicieron pruebas del funcionamiento del generador de vapor de la central termoelectrónica con cambios en la demanda de carga de potencia eléctrica generada, y un funcionamiento nominal (libre de falla).

Los umbrales son muy importantes en los sistemas de detección y localización de fallas, ya que son señales que indican la presencia de una falla y generan un síntoma mediante el cual se puede localizar el dispositivo que está fallando. También son importantes debido a que se pueden generar falsas alarmas en los procesos, debido a disturbios en el proceso. Por ello se definen umbrales que permitan detectar fallas y evitar falsas alarmas.

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores y los residuos ante los cambios de la demanda de potencia generada y sin ningún tipo de falla. Mediante esta simulación se pretende definir los umbrales para cada una de las señales de residuo.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores Takagi-Sugeno, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

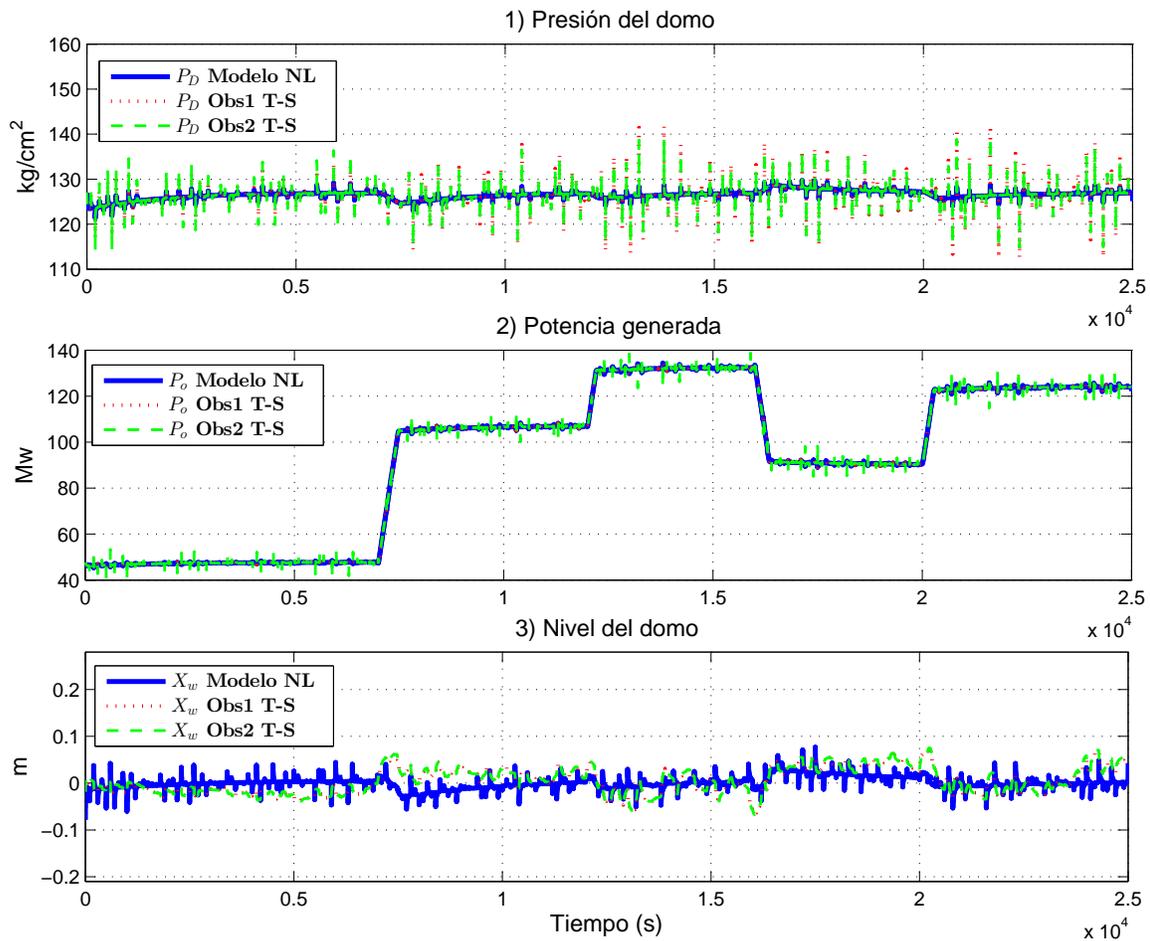


Figura 4.8: Señales de salidas con un funcionamiento nominal del sistema.

En la gráfica 1 de la Figura (4.8) se comparan las señales de presión en el domo. En color azul sólido se muestra la señal del modelo no lineal, la cual se mantiene alrededor de 127 kg/cm^2 , la señal en color rojo punteado pertenece al observador 1 y la señal en color verde moteado pertenece al observador 2. Las señales de los observadores se mantienen en el mismo rango que la señal del modelo no lineal y presentan un ruido mayor que la señal del modelo no lineal.

En la gráfica 2 de la Figura (4.8) se muestra como la línea roja punteada y la línea verde moteada logran converger a la línea azul sólida. Se puede apreciar como a pesar de los cambios en la línea azul sólida, las señales en color rojo y en color verde permanecen encima de ella y de la misma manera que en la gráfica 1 las señales en color rojo y en color verde presentan un ruido mayor a la señal de salida en color azul sólido.

En la gráfica 3 de la Figura (4.8) se muestran las señales de nivel en el domo, donde se aprecia cómo la señal en color azul que pertenece al modelo no lineal y las señales en color

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

rojo y color verde que pertenecen a los observadores T-S se mantienen alrededor de cero. Las señales de los observadores muestran una diferencia a la señal de salida del modelo no lineal.

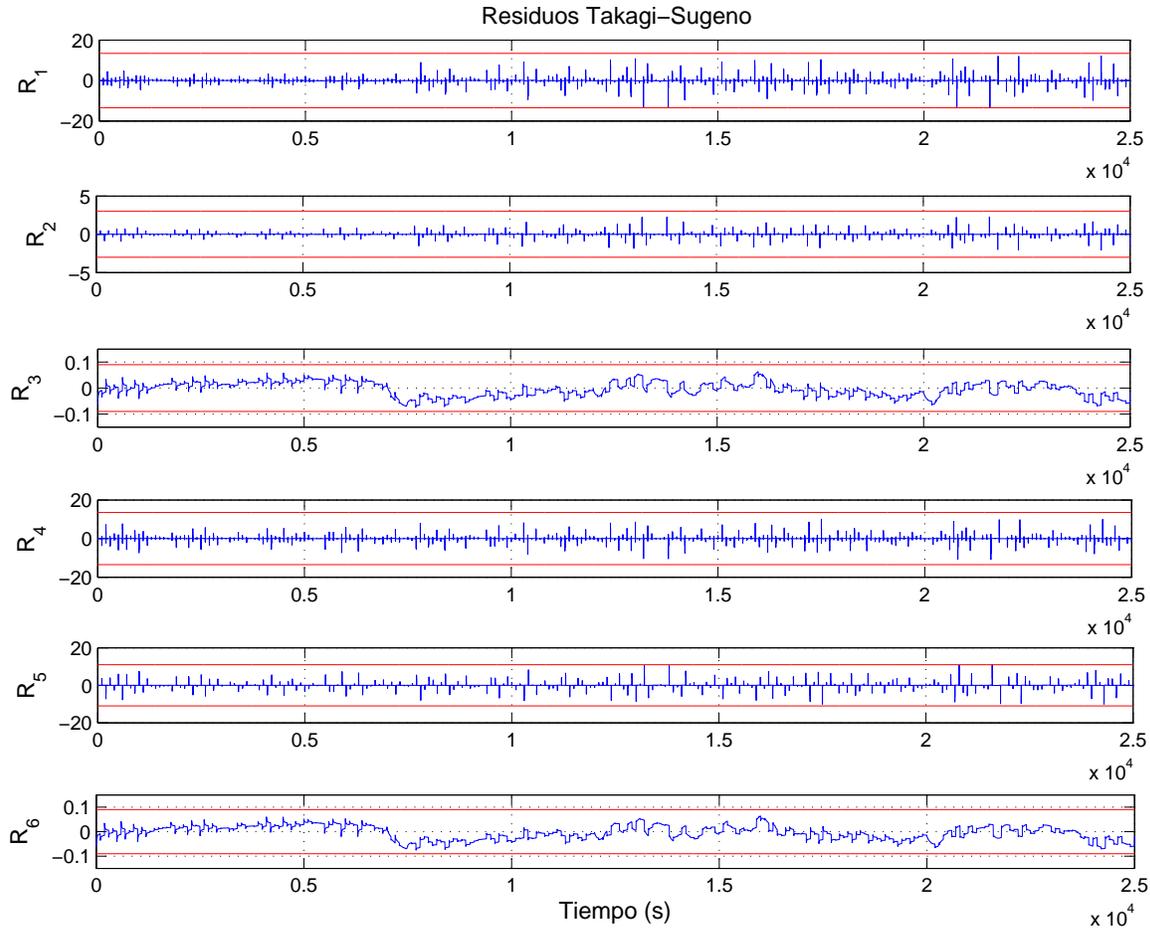


Figura 4.9: Residuos generados con un funcionamiento nominal del sistema.

En cada una de las gráficas de la Figura (4.9) se muestra cada uno de los residuos generados por el sistema de detección y localización de fallas, a los cuales se les asignaron umbrales fijos máximos y mínimos, los valores de los umbrales corresponden al valor máximo de cada residuo más el 15% del valor máximo, este 15% es para evitar falsas alarmas. Se puede observar como el ruido de medición afecta a las señales de los residuos, esto provoca que los umbrales sean más grandes.

Analizando los resultados obtenidos en las gráficas de las Figuras (4.8) y (4.9) podemos aseverar que los observadores T-S estiman adecuadamente. Los residuos deben permanecer cercano a cero, pero en las gráficas de la Figura (4.9) se aprecia como existen algunas variaciones en los residuos, estas variaciones se generan debido al ruido de medición.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Los umbrales definidos se muestran en la Tabla (4.2):

Tabla 4.2: *Umbrales para residuos T-S.*

| Residuo \ Umbral | Máximo | Mínimo |
|------------------|--------|--------|
| R_1 | 13.5 | -13.5 |
| R_2 | 3 | -3 |
| R_3 | 0.09 | -0.09 |
| R_4 | 13.5 | -13.5 |
| R_5 | 11 | -11 |
| R_6 | 0.09 | -0.09 |

Podemos concluir que los observadores están estimando adecuadamente debido a que no se está induciendo ningún tipo de falla en algún sensor. Los residuos no sobrepasan los umbrales definidos. Esto se debe al comportamiento nominal del sistema. Se espera que cuando ocurra una falla los observadores generen los residuos que corresponden.

Los síntomas generados por cada uno de los residuos pueden caer en tres casos posibles, para esto se declara un 0 cuando un residuo permanece dentro de los umbrales, se declara un 1 cuando un residuo supera el umbral superior y se declara un -1 cuando un residuo supera el umbral inferior.

$$Sr_i = \begin{cases} 1, & r_i > \mu_{max}, \quad \forall t \geq 0 \\ 0, & \mu_{max} \geq r_i \geq \mu_{min}, \quad \forall t \geq 0 \\ -1, & r_i < \mu_{min}, \quad \forall t \geq 0 \end{cases}$$

Simulación 3: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de presión en el domo.

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores Takagi-Sugeno y el comportamiento de los residuos ante una falla en el sensor de presión en el domo.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores Takagi-Sugeno, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla del 20% en el sensor de presión en el domo, la cual se generó en $t \geq 9500 \text{ s}$, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta que termina de la simulación, físicamente puede representar la pérdida de cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

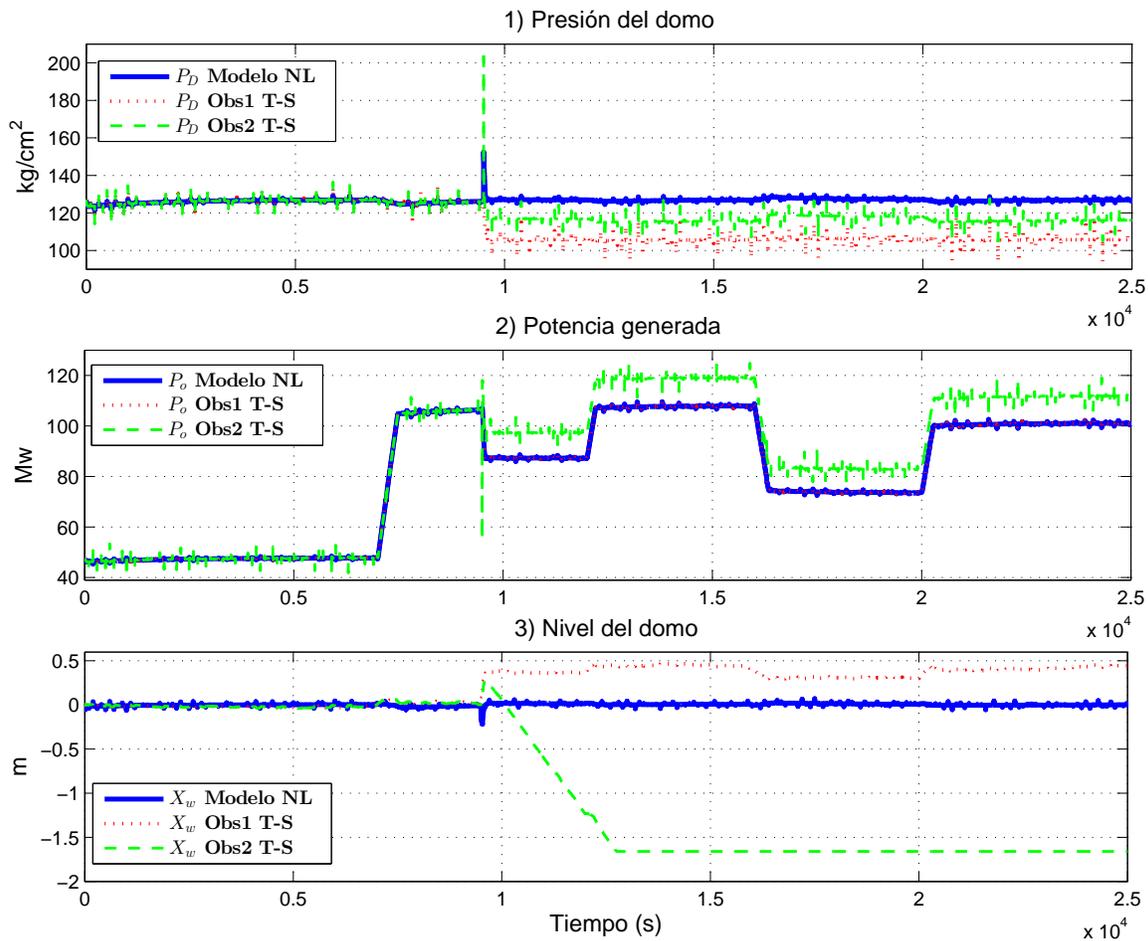


Figura 4.10: Señales de salida con falla en el sensor de presión.

En la gráfica 1 de la Figura (4.10) se comparan las señales de presión en el domo, se puede apreciar como la señal de salida de presión en el domo del modelo no lineal, que se encuentra en color azul sólido se ve afectada en $t \geq 9500$ s pero esta retoma el valor de 127 kg/cm^2 en 60 s y se mantiene debido a la acción del controlador. La señal de presión en el domo del observador 1, que se encuentra en color rojo punteado sufre un decremento y se mantiene alrededor de 105 kg/cm^2 . La señal de presión en el domo del observador 2, que se aprecia en color verde moteada sufre un sobretiro que llega al valor de 204 kg/cm^2 , después de llegar a este valor sufre un decremento y se mantiene alrededor de 117 kg/cm^2 .

En la gráfica 2 de la Figura (4.10) se puede apreciar como en $t \geq 9500$ s la señal de salida de la potencia eléctrica generada del modelo no lineal, que se encuentra en color azul sólido sufre un decremento y se mantiene alrededor de 90 MW . La señal de salida de potencia generada del observador 1, que se encuentra en color rojo punteado presenta un decremento y se mantiene alrededor de 90 MW , el cual es el mismo comportamiento que presenta la señal de salida del modelo no lineal. La señal de salida de potencia generada

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

del observador 2, que se encuentra en color verde moteada presenta sobretiros crecientes y decrecientes, después los sobretiros la señal se mantiene alrededor de 98 MW . Todo esto ocurre hasta antes del siguiente cambio de demanda de potencia eléctrica generada.

En la gráfica 3 de la Figura (4.10) se muestran las señales de nivel en el domo. Se puede apreciar la señal de nivel en el domo del modelo no lineal en color azul sólido, que sufre un cambio en $t \geq 9500 \text{ s}$ y después se sigue manteniendo alrededor de cero. La señal de nivel en el domo del observador 1 en color rojo punteado presenta un cambio creciente en $t \geq 9500 \text{ s}$ y se mantiene alrededor de 0.45 m . La señal de nivel en el domo del observador 2, que se encuentra en color verde moteada, después de $t \geq 9500 \text{ s}$ presenta un cambio creciente hasta llegar a 0.28 m y después comienza a decrecer hasta llegar a -1.66 m .

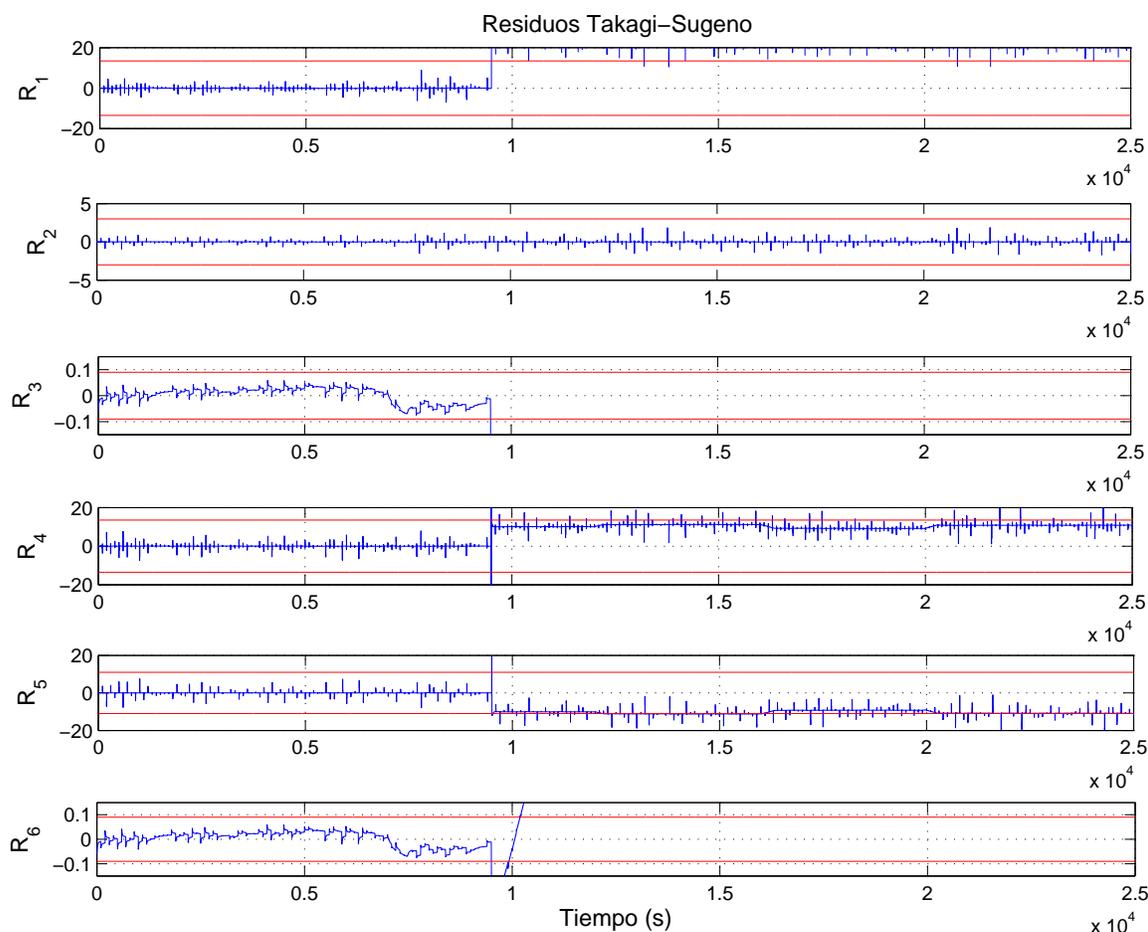


Figura 4.11: Residuos generados con falla en el sensor de presión.

En la gráfica de R_1 de la Figura (4.11) se muestra como la señal del residuo 1 en color azul sólido, en $t = 9500 \text{ s}$ genera un síntoma, debido a que la señal de residuo sobrepasa la señal del umbral superior, que se encuentra en color rojo sólido. En la gráfica de R_2 se aprecia que la señal del residuo 2 no sobrepasa ninguno de los 2 umbrales y se mantiene

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

alrededor de cero. En la gráfica de R_3 la señal de residuo 3 en color azul sólido, sobrepasa la señal de umbral inferior. Se puede apreciar en la gráfica de R_4 como la señal del residuo 4 en $t = 9500$ s sobrepasa el umbral superior y después en $t = 9500.5$ s sobrepasa el umbral inferior. En la gráfica de R_5 se muestra la señal del residuo 5, en $t = 9500$ s la señal del residuo 5 sobrepasa el umbral superior y después en $t = 9500$ s la señal del residuo 5 decrece y se mantiene alrededor de 11 que es el valor del umbral inferior. En la gráfica de R_6 se muestra la señal del residuo 6 en color azul sólido. Se puede apreciar que la señal en color azul sólido sobrepasa el umbral inferior en $t = 9500$ s.

Analizando los resultados mostrados en las Figuras (4.10) y (4.11), podemos apreciar que las señales de salida del observador 2 T-S son sensibles ante la falla en el sensor de presión en el domo que ocurre en $t = 9500$ s. Basado en el análisis del comportamiento de las señales es posible aseverar que el comportamiento de las señales de salida del observador 1 T-S son el adecuado.

Podemos concluir que mediante los síntomas generados por la comparación de las señales de residuos con sus respectivas señales de umbrales, es posible detectar el momento de aparición de la falla en el sensor de presión en el domo y también es posible generar una firma de falla para su localización. En la Tabla (4.3) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de presión en el domo.

Tabla 4.3: Firma de falla en sensor de presión en el domo.

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 1 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 |

Simulación 4: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de potencia generada

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores Takagi-Sugeno y el comportamiento de los residuos ante una falla en el sensor de potencia generada.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores Takagi-Sugeno, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla del 20% en el sensor de potencia eléctrica generada, la cual se generó en $t \geq 9500$ s, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta el final de la simulación, físicamente puede representar del pérdida del cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

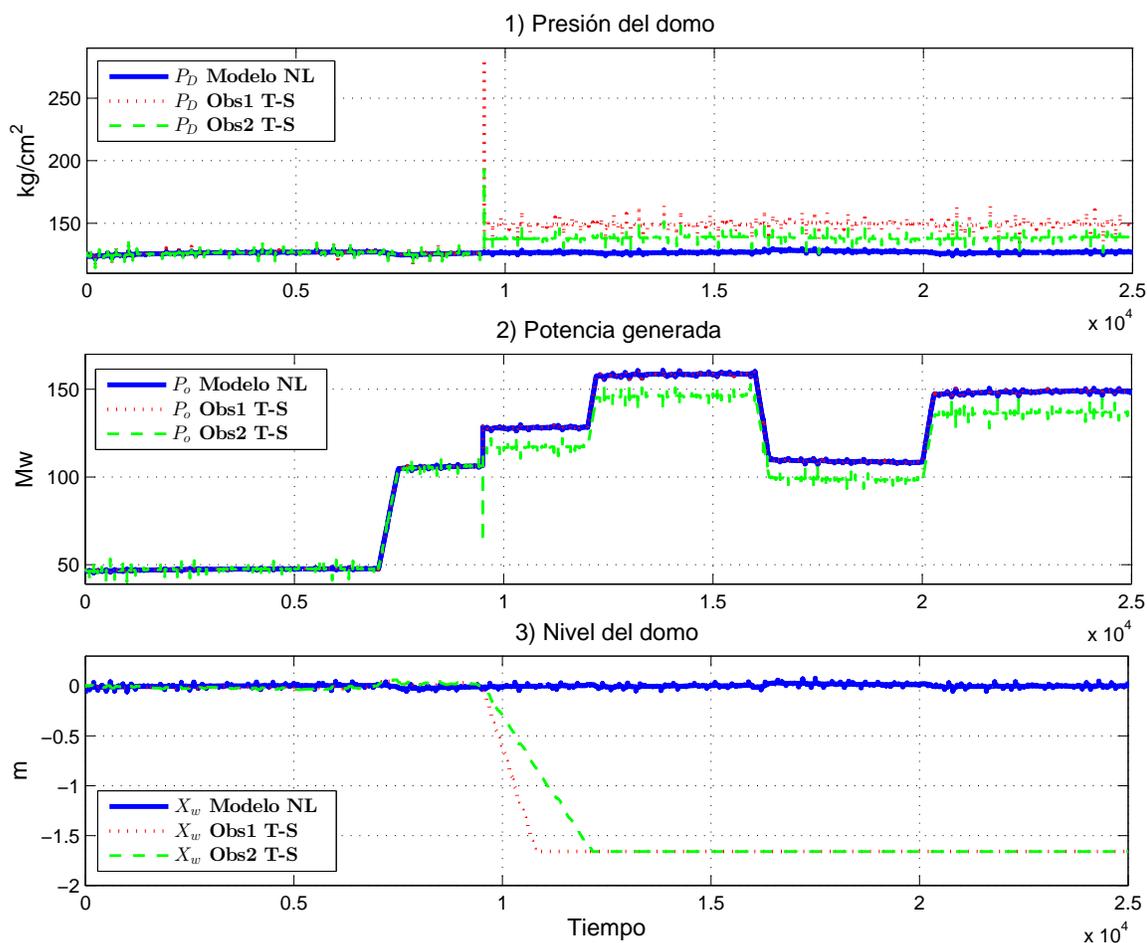


Figura 4.12: Señales de salida con falla en el sensor de potencia.

En las gráficas de la Figura (4.12) se muestra la comparación de las señales de salida del modelo no lineal y de los observadores T-S, cuando ocurre una falla en el sensor de potencia eléctrica generada. En la gráfica 1 se aprecia como la señal de salida del modelo no lineal, que se encuentra en color azul sólido se mantiene alrededor de 127 kg/cm^2 . La señal de salida del observador 1 que se encuentra en color rojo punteado, presenta un sobre tiro que alcanza el valor de 281 kg/cm^2 en $t = 9500.4 \text{ s}$ y en $t = 9500.5 \text{ s}$ sufre un decremento y se mantiene alrededor de 150 kg/cm^2 en $t \geq 9500 \text{ s}$. La señal de salida de presión en el domo del observador 2, que se encuentra en color verde moteado presenta un sobretiro que alcanza los 192.8 kg/cm^2 en $t = 9500.4 \text{ s}$, en donde inicia un decremento hasta llegar a 138 kg/cm^2 en $t \geq 9510 \text{ s}$ donde se mantiene hasta el fin de la simulación.

En la gráfica 2 de la Figura (4.12) se aprecia como en $t = 9500 \text{ s}$, la señal de salida de potencia eléctrica generada que se encuentra en color azul sólido, presenta un incremento y se mantiene alrededor de 125 MW . La señal de salida del observador 1 se encuentra en color rojo punteado, presenta el mismo comportamiento que la señal del modelo no lineal,

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

es decir, la señal de salida del observador 1 sufre un incremento en $t = 9500$ s hasta llegar al valor de 125 MW y se mantiene alrededor de ese valor hasta el fin de la simulación. La señal de salida de potencia eléctrica generada del observador 2 que se encuentra en color verde moteado, sufre un sobretiro decreciente que alcanza el valor 62.65 MW en $t = 9500.35$ s, después del sobretiro la señal toma un valor alrededor de 110 MW. Las 3 señales de la gráfica 2 de la Figura (4.12) sufren estos comportamientos antes del siguiente cambio en la demanda de potencia eléctrica generada.

En la gráfica 3 de la Figura (4.12) se muestra el comportamiento de las señales de nivel en el domo del modelo no lineal y los observadores T-S. La señal de salida de nivel en el domo del modelo no lineal se mantiene con un comportamiento cercano a cero, el cual es debido a la acción del controlador. La señal de salida de nivel en el domo del observador 1 sufre un a desviación decreciente en $t = 9500$ s, hasta llegar a -1.66 m en $t = 10808$ s. En cambio la señal de salida de nivel en el domo del observador 2 sufre una desviación decreciente en $t = 9500$ s hasta llegar a -1.66 m en $t = 12160$ s.

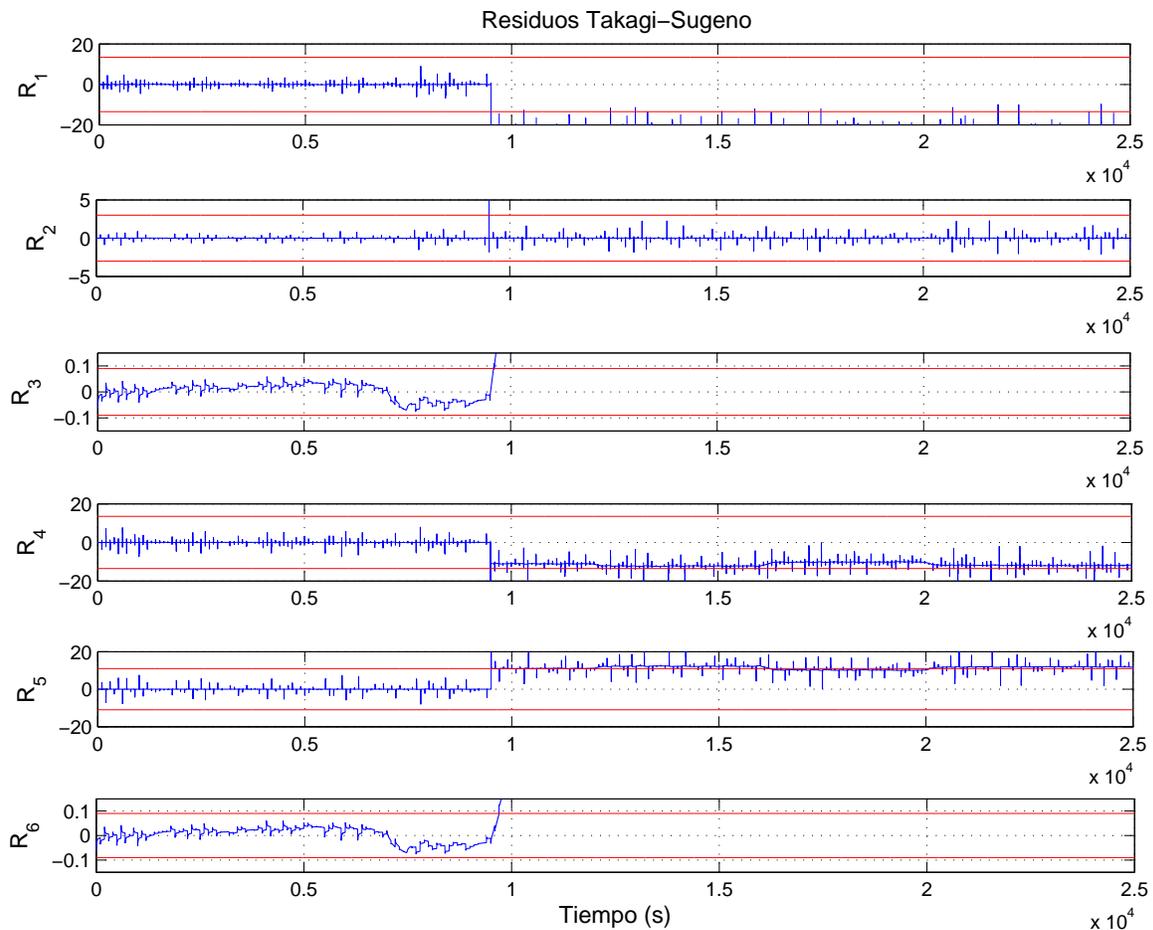


Figura 4.13: Residuos generados con falla en el sensor de potencia.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Tomando en cuenta los valores de los umbrales definidos en la Tabla (4.2) de la simulación 2, se describen las gráficas de la Figura (4.13). En la gráfica de R_1 de la Figura 4.13 se muestra como la señal del residuo 1 en color azul sólido sobrepasa el umbral inferior y esto genera un síntoma en $t = 9500$ s. La señal del residuo 2 se muestra en la gráfica de R_2 , se puede apreciar como la señal del residuo 2 sobrepasa el umbral superior en $t = 9500$ s, en $t = 9500.5$ s la señal del residuo 2 retoma el valor cercano a cero y se mantiene entre los umbrales hasta el fin de la simulación. En la gráfica de R_3 se muestra como la señal del residuo 3 en color azul sólido sobrepasa el umbral superior en $t = 9585$ s. La señal del residuo 4 se muestra en la gráfica de R_4 , podemos apreciar como en $t = 9500$ s sobrepasa el umbral inferior. En la gráfica de R_5 se muestra como la señal del residuo 5 sobrepasa el umbral superior en $t = 9500$ s y después se mantiene alrededor del valor del umbral superior. En la gráfica de R_6 se aprecia como la señal del residuo 6 que ese encuentra en color azul sólido, supera el valor del umbral superior en $t = 9700$ s.

Analizando los resultados obtenidos en las Figura (4.12) y (4.13), se aprecia como las señales de salida de los observadores T-S es afectada debido a la falla en el sensor de potencia eléctrica generada. El comportamiento de las señales del modelo no lineal es el adecuado, ya que la señal del sensor de potencia eléctrica generada no es tomada para el sistema de control y no se ven afectadas las señales de presión en el domo y nivel en el domo.

Basados en los resultados de la simulación 4 es posible definir una firma de falla, cuando ocurra una falla en el sensor de potencia eléctrica generada. Con respecto al comportamiento de los observadores T-S es posible detectar el instante de aparición de la falla en el sensor de potencia eléctrica generada.

En la Tabla (4.4) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de potencia eléctrica generada.

Tabla 4.4: Firma de falla en sensor de potencia eléctrica generada.

| Síntomas \ Sensor | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | -1 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 |

Simulación 5: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de nivel

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores Takagi-Sugeno y de los residuos ante una falla en el sensor de nivel, esto para poder detectar una falla en el sensor de nivel en el domo y poder generar una firma de falla para la localización.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores Takagi-Sugeno, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla en la medición del sensor de nivel de 20 cm , la cual se generó en $t \geq 9500 \text{ s}$, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta el final de la simulación, físicamente puede representar del pérdida del cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor.

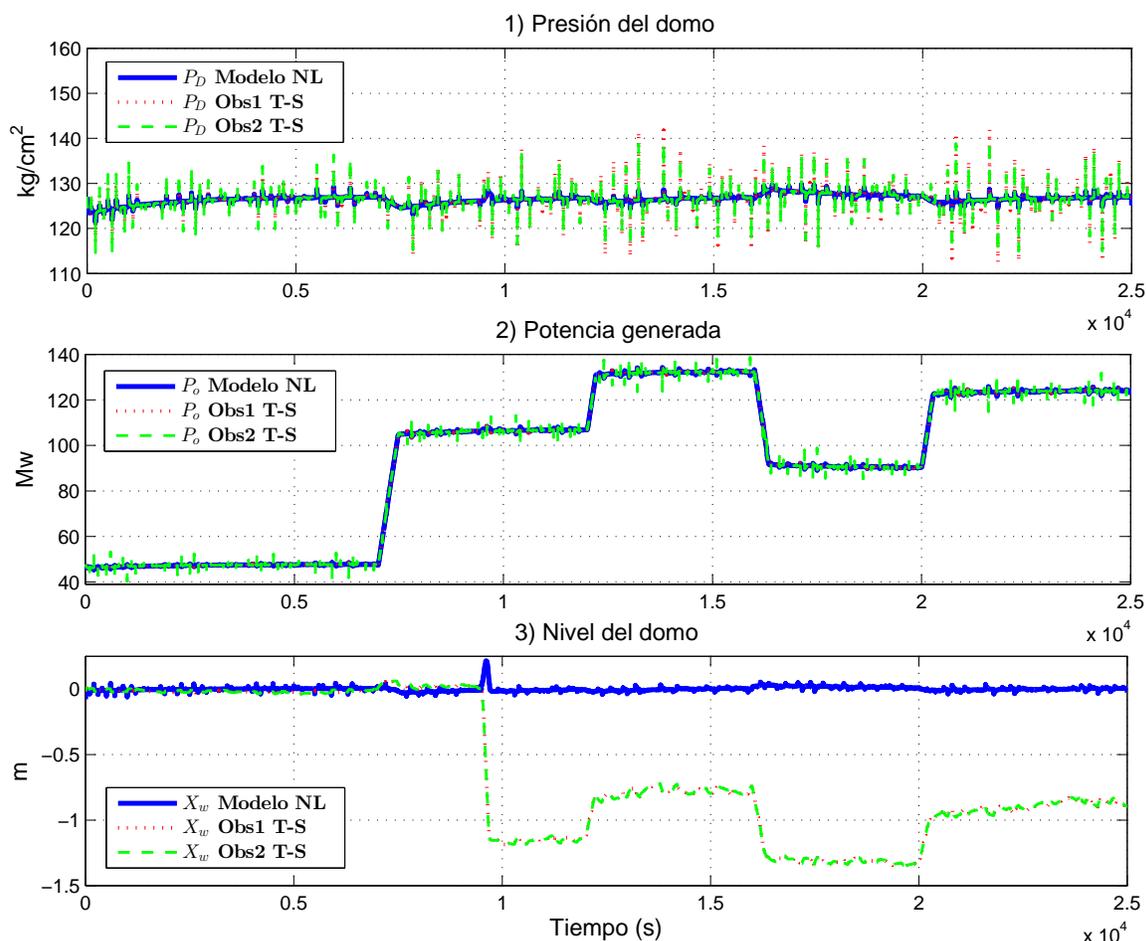


Figura 4.14: Señales de salida con falla en el sensor de nivel.

En la gráfica 1 de la Figura (4.14) se muestra la comparación de las señales de presión en el domo. La señal de presión en el domo del modelo no lineal se encuentra en color azul sólido, se mantiene alrededor de 127 kg/cm^2 . La señal en color rojo punteado y la señal en color verde moteado son la salida del observador 1 y la salida del observador 2 respectivamente. Las cuales se mantienen alrededor de 127 kg/cm^2 de la misma manera que la señal de salida del modelo no lineal.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

En la gráfica 2 de la Figura (4.14) se muestran las señales de salida de potencia eléctrica generada. Se logra apreciar como la señal de salida del observador 1 en color rojo punteado y la señal de salida del observador 2 en color verde moteado, se comportan de la misma manera que la señal de salida del modelo no lineal en color azul sólido, a pesar de los cambios en la demanda de potencia eléctrica generada.

En la gráfica 3 de la Figura (4.14) se muestra el comportamiento de las señales de nivel en el domo. Se aprecia como la señal del modelo no lineal sufre un cambio en $t = 9500 \text{ s}$ por la falla en el sensor de nivel en el domo, debido a la acción del controlador de nivel de agua en el domo la señal retoma el valor cercano a cero en $t = 9700 \text{ s}$. La señal del observador 1 en color rojo punteado y la señal del observador 2 en color verde moteado se ven afectadas por la falla a partir de $t = 9500 \text{ s}$.

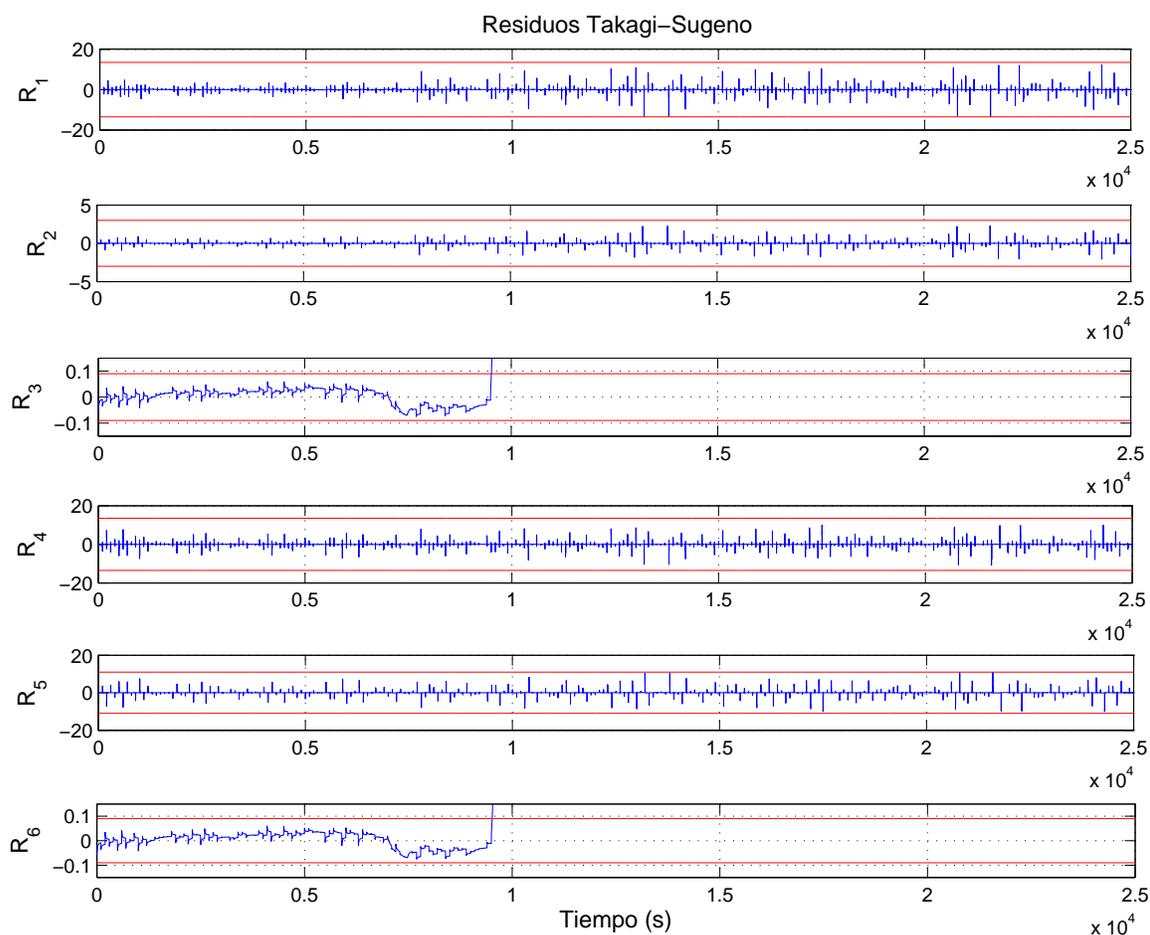


Figura 4.15: Residuos generados con falla en el sensor de nivel.

En las gráficas R_1 , R_2 , R_4 y R_5 de la Figura (4.15) se muestra como las señales en color azul sólido, que pertenecen a los residuos 1, 2, 4 y 5 que no superan el umbral máximo y

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

el umbral mínimo. Sin embargo la señal del residuo 3 y la señal del residuo 6 superan el umbral superior en $t = 9500$ s.

Analizando los resultados obtenidos en las Figuras (4.14) y (4.15), la señales de los observadores T-S no se ven afectadas, sin embargo las señales de estimación del nivel en el domo se ven afectadas, y mediante estas diferencias es posible detectar una falla.

Se puede concluir que es posible detectar una falla en el sensor de nivel mediante la estimación del nivel en el domo y es posible generar una firma de falla para la localización.

En la Tabla (4.5) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de nivel de agua en el domo.

Tabla 4.5: *Firma de falla en sensor de nivel de agua en el domo.*

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Construcción de la matriz de firma de fallas

A partir de los síntomas generados por la comparación de cada una de las señales de residuo con respecto a los umbrales definidos, es posible generar una firma de fallas para la localización del dispositivo que este fallando. En la Tabla (4.6) se muestra la matriz de firma de fallas para cada una de las posibles fallas en los sensores de medición del generador de vapor de la central termoeléctrica, donde las columnas indican la firma de falla generada para cada sensor y las filas indican a que residuo pertenece cada síntoma generado.

Tabla 4.6: *Matriz de firma de fallas FDI T-S.*

| Síntomas \ Sensor | Falla P_D | Falla P_O | Falla x_w |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| S_{r1} | 1 | -1 | 0 |
| S_{r2} | 0 | 1 | 0 |
| S_{r3} | -1 | 1 | 1 |
| S_{r4} | 1 | -1 | 0 |
| S_{r5} | 1 | 1 | 0 |
| S_{r6} | -1 | 1 | 1 |

Podemos observar que las firmas de fallas no son iguales y con esto podemos detectar y localizar cada una de las fallas en cada uno de los sensores del sistema.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Por ejemplo, supongamos que el generador de vapor de la central termoeléctrica está funcionando de manera nominal, esto quiere decir que las señales de residuo permanecen sin sobrepasar alguno de los dos umbrales. Sin embargo repentinamente se enciende una alarma, que indicando que una falla está ocurriendo.

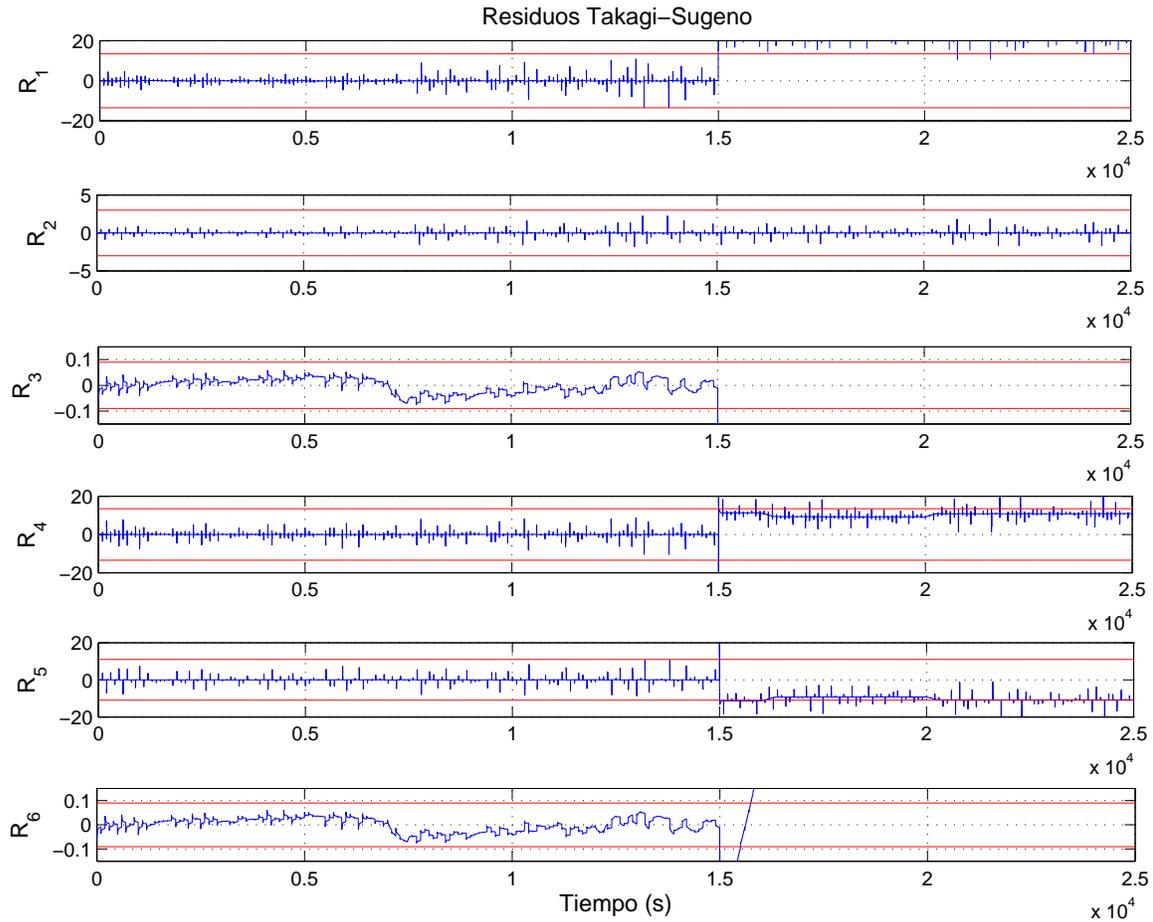


Figura 4.16: Residuos generados.

En la Figura (4.16) se muestra cada una de las gráficas el comportamiento de las señales de los residuos generados por el sistema de detección y localización de fallas. Los síntomas generados por los residuos se muestran en la Tabla (4.7).

Analizando los resultados obtenidos en la Figura (4.16) podemos apreciar que existe la presencia de una falla en $t = 15000$ s, y mediante los síntomas generados que se muestran en la Tabla (4.7) se puede aclarar que la falla ocurre en el sensor de presión en el domo.

Tabla 4.7: *Firma de falla.*

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 1 | 0 | -1 | 1 | 1 | -1 |

Podemos concluir que mediante el sistema de detección y localización de falla en sensores basado en observadores Takagi-Sugeno, es posible detectar y localizar fallas en los sensores del generador de vapor de la central termoeléctrica.

4.2.3. Diseño del sistema de detección y localización de fallas mediante observadores de alta ganancia

Se realiza el diseño de un sistema de detección y localización de fallas en sensores basado en observadores de alta ganancia, con el propósito de comparar los resultados que se obtengan con el sistema FDI basado en observadores T-S.

En la Figura (4.17) se muestra el diagrama a bloques de la estructura del sistema de detección y localización de fallas en sensores del generador de vapor de la central termoeléctrica mediante observadores de alta ganancia y el cálculo del nivel en el domo mediante las señales estimadas. El sistema FDI basado en observadores de alta ganancia genera 6 residuos para la detección y localización de la falla en alguno de los sensores. Los residuos se generan mediante la diferencia de las señales de salida del modelo no lineal y las señales estimadas de los observadores Takagi-Sugeno, en conjunto con la estimación del nivel en el domo.

A continuación se muestra uno a uno cada residuo que se genera.

- $R_1 = x_1 - \hat{x}_{11}$
- $R_2 = x_2 - \hat{x}_{21}$
- $R_3 = x_w - \hat{x}_{w1}$
- $R_4 = x_1 - \hat{x}_{12}$
- $R_5 = x_2 - \hat{x}_{22}$
- $R_6 = x_w - \hat{x}_{w2}$

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

El modelo no lineal del generador de vapor se muestra en la Ecuación (4.1).

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_1 x_1^{9/8} \theta(u_2) \\ k_4 x_1^{9/8} \theta(u_2) - k_5 x_1^{9/8} - k_6 x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} k_2 \\ 0 \end{pmatrix} u_1 + \begin{pmatrix} -k_3 \\ 0 \end{pmatrix} u_3 \quad (4.6a)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= (-k_8 \theta(u_2) + k_9 x_1) + (k_7) u_3 \\ \alpha_{cs} &= \frac{(1 - 0,001538 x_3)(0,8 x_1 - 25,6)}{x_3(1,0394 - 0,0012304 x_1)} \end{aligned} \quad (4.6b)$$

$$q_e = (0,854 \theta(u_2) - 0,147) x_1 + 45,59 u_1 - 2,514 u_3 - 2,096$$

$$x_w = 0,05(0,13073 x_3 + 100 \alpha_{cs} + \frac{q_e}{9} - 67,975)$$

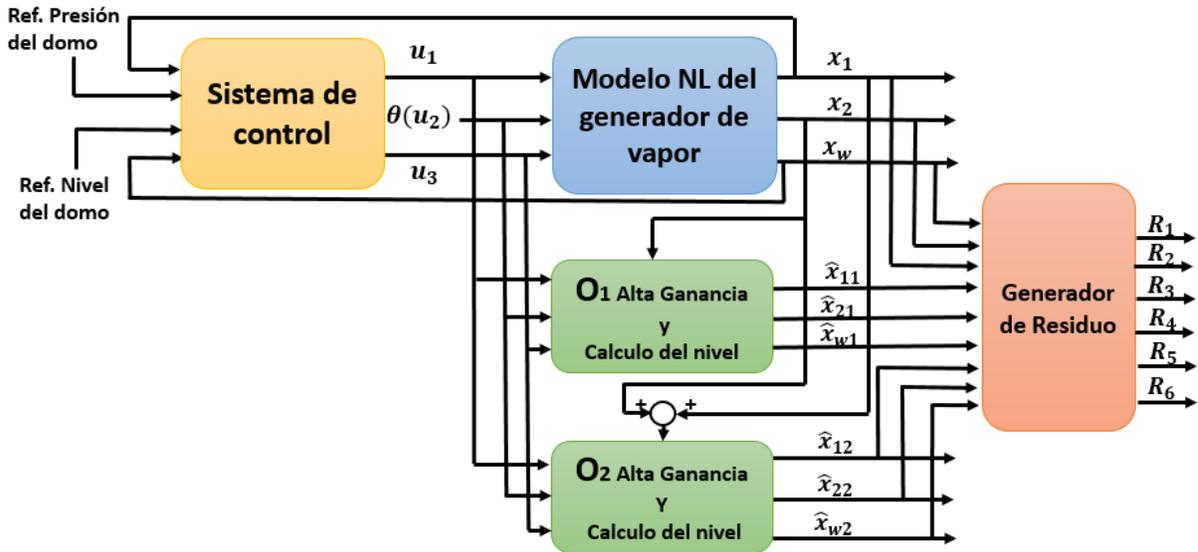


Figura 4.17: Diagrama a bloques del sistema FDI mediante observadores de alta ganancia.

Diseño del observador 1 de alta ganancia con respecto a la salida x_1 y estimación del nivel mediante señales estimadas.

⊙ *Observador 1*

El observador 1 queda de la siguiente manera.

$$\mathcal{O}_1 : \begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + g(\hat{x})u - \left(\frac{\partial \Phi(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \right)^{-1} S_\alpha^{-1} C^T (C\hat{x} - y) \\ \hat{y} = h_1(\hat{x}) \end{cases} \quad (4.7)$$

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

Para el diseño del observador 1 de alta ganancia se utilizaron las siguientes matrices, las cuales se calcularon con respecto al sistema dado por la Ecuación (4.6a).

- $\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)^{-1} = \frac{1}{\det\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)} \begin{bmatrix} -k_6 & -1 \\ \frac{9}{8}k_4\hat{x}_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5\hat{x}_1^{1/8} & 0 \end{bmatrix}$
- $\det\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right) = -\left(\frac{9}{8}k_4\hat{x}_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5\hat{x}_1^{1/8}\right)$
- $(S_\alpha)^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha^2 & \alpha^3 \\ \alpha^3 & 2\alpha \end{bmatrix}$
- $C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

⊙ Estimación del nivel con señales del observador 1

Se utilizan las señales estimadas del observador 1 de alta ganancia para el cálculo del nivel en el domo del generador de vapor, para ello se utiliza la Ecuación (4.1b) y en función de las señales estimadas se reescribe como se muestra en la Ecuación (4.8).

$$\dot{\hat{x}}_{31} = (-k_8\theta(u_2) + k_9\hat{x}_{11}) + (k_7)u_3$$

$$\hat{\alpha}_{cs1} = \frac{(1 - 0,001538\hat{x}_{31})(0,8\hat{x}_{11} - 25,6)}{\hat{x}_{31}(1,0394 - 0,0012304\hat{x}_{11})} \quad (4.8)$$

$$\hat{q}_{e1} = (0,854\theta(u_2) - 0,147)\hat{x}_{11} + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$\hat{x}_{w1} = 0,05(0,13073\hat{x}_{31} + 100\alpha_{cs1} + \frac{q_{e1}}{9} - 67,975)$$

Diseño del observador 2 de alta ganancia con respecto a la salida $x_1 + x_2$.

⊙ Observador 2

El observador 2 queda de la siguiente manera.

$$\mathcal{O}_2 : \begin{cases} \dot{\hat{x}} = f(\hat{x}) + g(\hat{x})u - \left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)^{-1} S_\alpha^{-1} C^T (C\hat{x} - y) \\ \hat{y} = h_2(\hat{x}) \end{cases} \quad (4.9)$$

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Para la construcción del observador 2 de alta ganancia se utilizaron las siguientes matrices, las cuales se calcularon con respecto al sistema dado por la Ecuación (4.6a).

- $\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)^{-1} = \frac{1}{\det\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right)} \begin{bmatrix} -k_6 & -1 \\ -\left(\left(-\frac{9}{8}k_1 + \frac{9}{8}k_4\right)x_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x_1^{1/8}\right) & 1 \end{bmatrix}$
- $\det\left(\frac{\partial\Phi(\hat{x})}{\partial\hat{x}}\right) = -k_6 - \left(\left(-\frac{9}{8}k_1 + \frac{9}{8}k_4\right)x_1^{1/8}\theta(u_2) - \frac{9}{8}k_5x_1^{1/8}\right)$
- $(S_\alpha)^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha^2 & \alpha^3 \\ \alpha^3 & 2\alpha \end{bmatrix}$
- $C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$

⊙ *Estimación del nivel con señales del observador 2*

De la misma manera que con el observador anterior se utilizan las señales estimadas del observador 2 de alta ganancia para el cálculo del nivel en el domo del generador de vapor, para ello se utiliza la Ecuación (4.1b) y en función de las señales estimadas se reescribe como se muestra en la Ecuación (4.10).

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_{32} &= (-k_8\theta(u_2) + k_9\hat{x}_{12}) + (k_7)u_3 \\ \hat{\alpha}_{cs2} &= \frac{(1 - 0,001538\hat{x}_{32})(0,8\hat{x}_{12} - 25,6)}{\hat{x}_{32}(1,0394 - 0,0012304\hat{x}_{12})} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\hat{q}_{e2} = (0,854\theta(u_2) - 0,147)\hat{x}_{12} + 45,59u_1 - 2,514u_3 - 2,096$$

$$\hat{x}_{w2} = 0,05(0,13073\hat{x}_{32} + 100\alpha_{cs2} + \frac{q_{e2}}{9} - 67,975)$$

4.2.4. Simulaciones y resultados de un sistema de detección y localización de fallas mediante observadores de alta ganancia

Simulación 6: Prueba de convergencia de los observadores de alta ganancia.

El objetivo de esta simulación es mostrar la convergencia de las señales de salida de los observadores de alta ganancia con la señales de salida del modelo NL.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

De la misma manera que la simulación 1 para la convergencia de los observadores Takagi-Sugeno, esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01 y con las condiciones iniciales diferentes a las del modelo para cada uno de los observadores. Para el modelo no lineal las condiciones iniciales son $x_1(0) = 127 \text{ kg/cm}^2$, $x_2(0) = 47.7 \text{ MW}$ y $x_w(0) = -0.0786 \text{ m}$, para el observador 1 de alta ganancia son $\hat{x}_{11}(0) = 120 \text{ kg/cm}^2$, $\hat{x}_{21}(0) = 40 \text{ MW}$ y para la estimación 1 del nivel en el domo es $\hat{x}_{w1}(0) = -0.1178 \text{ m}$, para el observador 2 de alta ganancia son $\hat{x}_{12}(0) = 145 \text{ kg/cm}^2$, $\hat{x}_{22}(0) = 55 \text{ MW}$ y para la estimación 2 del nivel en el domo es $\hat{x}_{w2}(0) = 0.0246 \text{ m}$. La duración de esta simulación es de $t = 250 \text{ s}$.

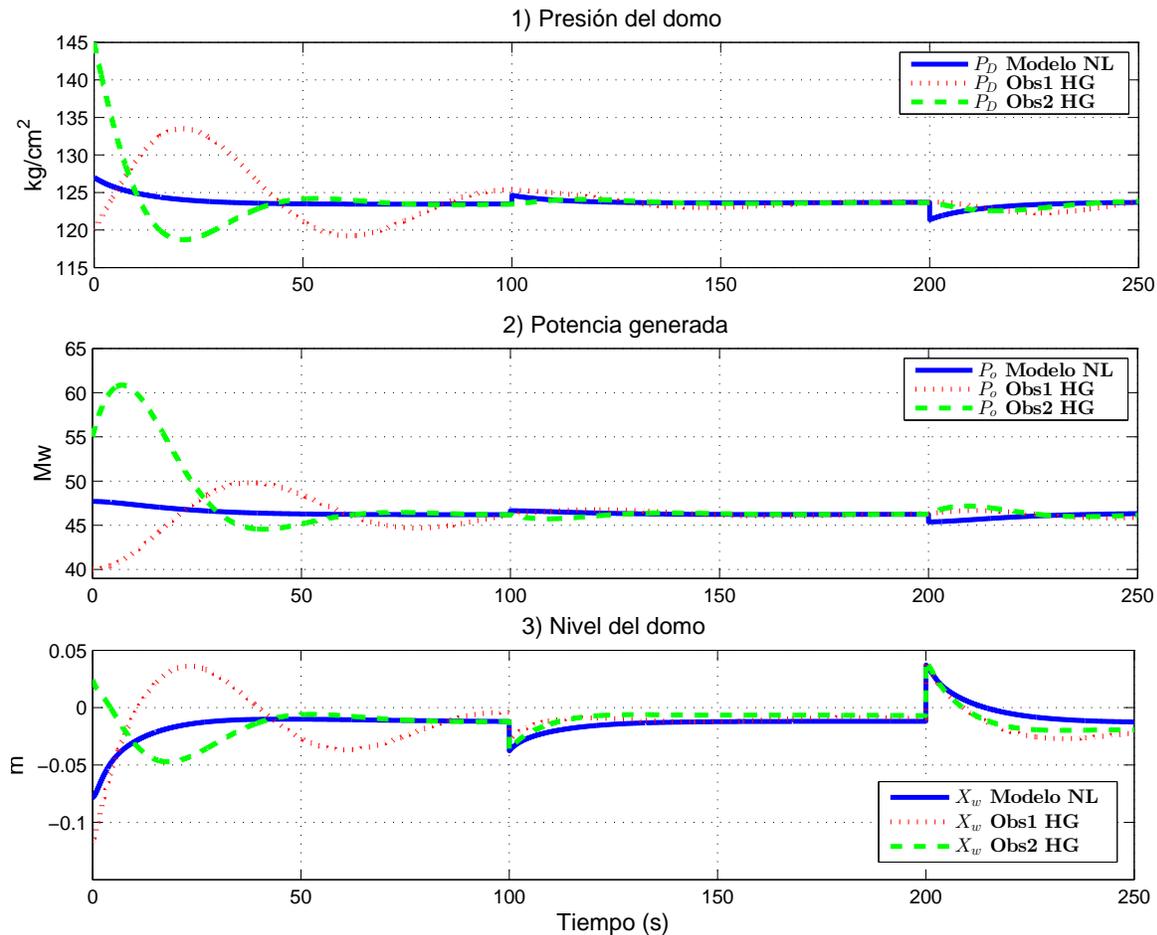


Figura 4.18: *Convergencia de los observadores HG.*

En la Figura (4.18) se muestran las gráficas de convergencia de las señales estimadas de los observadores de alta ganancia hacia las señales de salida del modelo no lineal. En color azul sólido se muestran las señales de salida del modelo no lineal, en color rojo punteado las señales de salida del observador 1 y en color verde moteado las señales de salida del observador 2. En las gráficas 1 y 2 se muestra como las señales de los observadores convergen a la señal del modelo no lineal, para la simulación sólo se muestran los primeros 250

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

segundos, para apreciar dicha convergencia. Podemos apreciar que en la gráfica 3 de la Figura (4.18) las señales estimadas del nivel en el domo logran una convergencia hacia la señal de nivel en el domo del modelo no lineal.

Analizando los resultados obtenidos en las gráficas 1 y 2 de la Figura (4.18), se puede determinar que ambos observadores convergen en un tiempo no mayor a los 100 s, después de ese tiempo la señales de los observadores logran estimar los valores de las señales del modelo no lineal. Las señales de estimación del nivel en el domo que se muestra en la gráfica 3 de la Figura (4.18), se aprecia como convergen a la señal del nivel en el domo del modelo no lineal en un tiempo no mayor a los 100 s, después de ese tiempo se logra la estimación del nivel en el domo del modelo no lineal.

Basados en la convergencia de los observadores de alta ganancia, que se muestran en el diagrama a bloques de la Figura (4.17), se puede concluir que estos observadores diseñados se pueden utilizar para formar un banco de observadores del generador de vapor de la central termoeléctrica, en conjunto con la estimación del nivel en el domo.

A partir de la simulación 7 hasta la simulación 10 se realizarán con una misma configuración. Se realizan cuatro cambios en la demanda de potencia eléctrica. Los cambios son representados por el parámetro $\theta(u_2)$ que indica la apertura de la válvula de control de vapor generado.

De la misma manera que el sistema FDI Takagi-Sugeno, en las simulaciones 7, 8, 9 y 10 se hacen cuatro cambios en la demanda de potencia eléctrica. La simulación inicia con una demanda de potencia eléctrica del 50 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica de la planta, esto indica que el parámetro $\theta(u_2) = 0.5$, donde esto representa una apertura del 50 % de la válvula de control de vapor generado por la planta. El primer cambio se genera en $t \geq 7000$ s con $\theta(u_2) = 0.85$, esto indica una demanda del 85 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El segundo cambio se genera en $t \geq 12000$ s con $\theta(u_2) = 1$, con la demanda del 100 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El tercer cambio se produce en $t \geq 16000$ s con $\theta(u_2) = 0.75$, indicando una demanda del 75 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. El cuarto y último cambio se generó en $t \geq 20000$ s y $\theta(u_2) = 0.95$, lo que indica un 95 % de la capacidad de generación de potencia eléctrica. Se agregó ruido de medición del 0.25 % del rango de medición del sensor, esto para cada una de las señales de salida del generador de vapor de la centra termoeléctrica.

En la gráfica de la Figura (4.19) se muestra en color azul sólido el comportamiento de la señal del parámetro $\theta(u_2)$, la cual indica los cambios de la demanda de potencia eléctrica generada por la planta. Se puede apreciar las diferentes aperturas de la válvula de control de vapor generado, el rango de apertura de la válvula es de entre 0 y 1.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

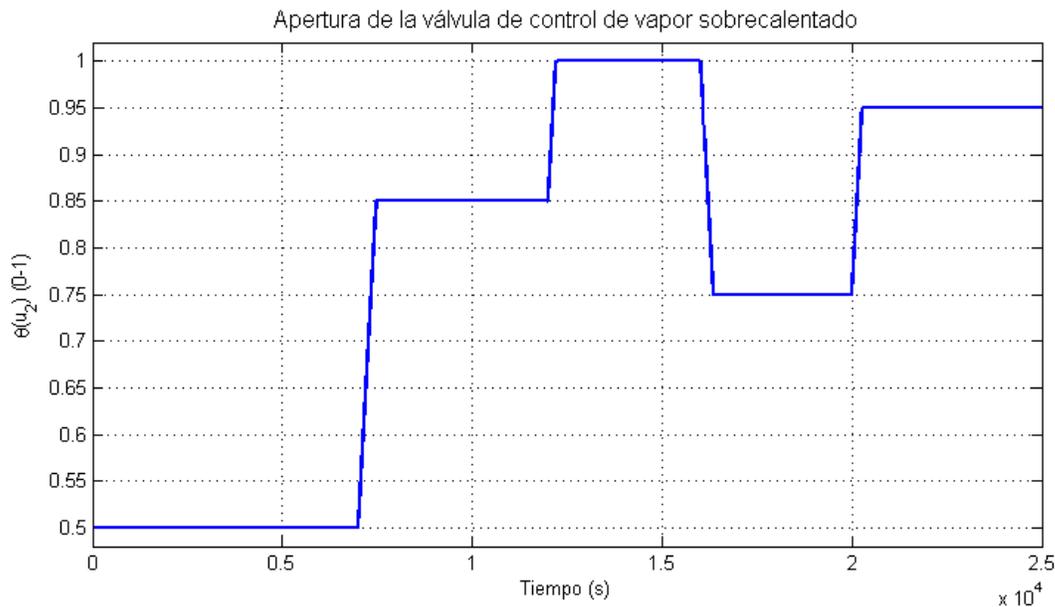


Figura 4.19: Apertura de la válvula de vapor sobrecalentado generado.

Simulación 7: del FDI mediante observadores de alta ganancia con un funcionamiento nominal del sistema para la selección de umbrales.

Para la selección de umbrales se hicieron pruebas del funcionamiento del generador de vapor de la central termoelectrica con cambios en la demanda de carga de potencia eléctrica generada, y un funcionamiento nominal (libre de falla).

Los umbrales son muy importantes en los sistemas de detección y localización de fallas, ya que son señales que indican la presencia de una falla y generan un síntoma mediante el cual se puede localizar el dispositivo que esta fallando. También son importantes debido a que se pueden generar falsas alarmas en los procesos, debido a disturbios en el proceso. Por ello se definen umbrales que permitan detectar fallas y evitar falsas alarmas.

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores de alta ganancia y los residuos ante los cambios de la demanda de potencia generada y sin ningún tipo de falla. Mediante esta simulación se pretende definir los umbrales para cada una de las señales de residuo.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores de alta ganancia, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

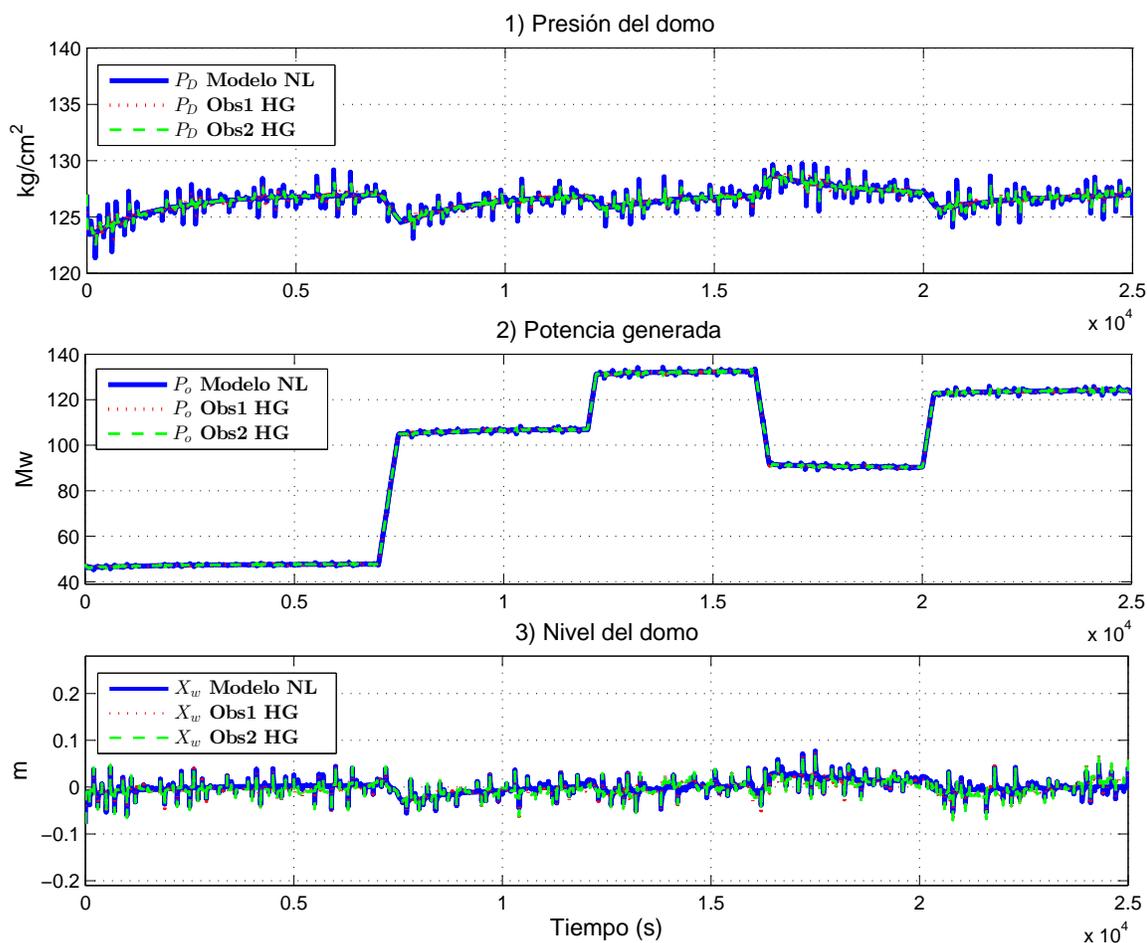


Figura 4.20: Señales de salidas con un funcionamiento nominal del sistema.

En la gráfica 1 de la Figura (4.20) se comparan las señales de presión en el domo. En color azul sólido se muestra la señal del modelo no lineal, la cual se mantiene alrededor de 127 kg/cm^2 , la señal en color rojo punteado pertenece al observador 1 y la señal en color verde moteado pertenece al observador 2. Las señales de los observadores se mantienen en el mismo rango que la señal del modelo no lineal y presentan menor ruido que la señal del modelo no lineal.

En la gráfica 2 de la Figura (4.20) se muestra como la línea roja punteada y la línea verde moteada logran converger a la línea azul sólida. Se puede apreciar como a pesar de los cambios en la línea azul sólida, las señales en color rojo y en color verde permanecen encima a ella y de la misma manera que en la gráfica 1 las señales en color rojo y en color verde presentan menor ruido que la señal de salida en color azul sólido.

En la gráfica 3 de la Figura (4.20) se muestran las señales de nivel en el domo, donde se aprecia cómo la señal en color azul que pertenece al modelo no lineal y las señales en color

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

rojo punteado y color verde moteado pertenecen a la estimación de el nivel en el domo mediante las señales estimadas de los observadores de alta ganancia y se puede apreciar como las señales se mantienen alrededor de cero. Las señales de estimación del nivel se encuentran encimadas a la señal del modelo no lineal.

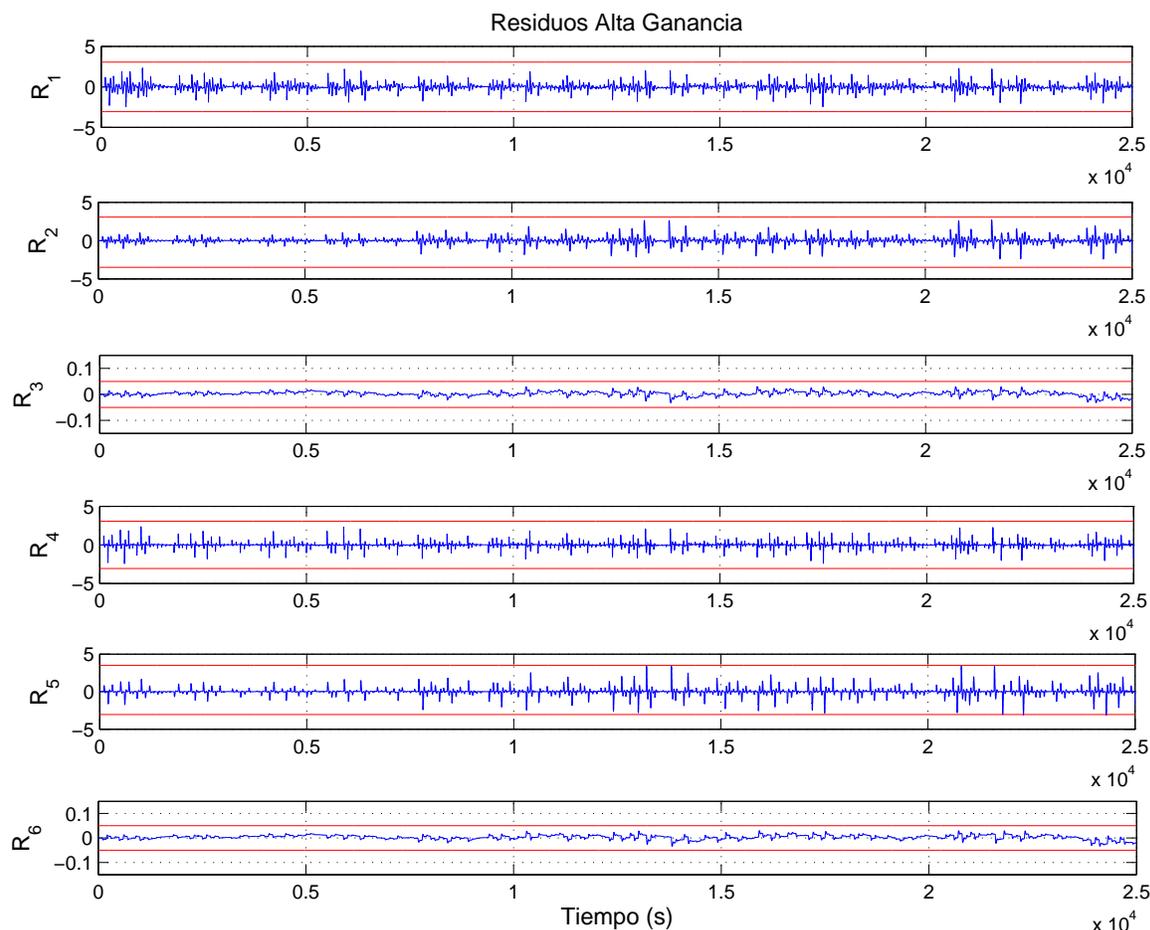


Figura 4.21: *Residuos generados con un funcionamiento nominal del sistema.*

En cada una de las gráficas de la Figura (4.21) se muestra cada uno de los residuos generados por el sistema de detección y localización de fallas, a los cuales se les asignaron umbrales fijos máximos y mínimos, los valores de los umbrales corresponden al valor máximo de cada residuo mas el 15% del valor máximo, este 15% es para evitar falsas alarmas. Se puede apreciar como el ruido de medición afecta a las señales de los residuos.

Analizando los resultados obtenidos en las Figuras (4.20) y (4.21) podemos declarar que los observadores de alta ganancia están estimando adecuadamente. En las gráficas se aprecia como los residuos no sobrepasan los umbrales definidos y esto se debe al comportamiento nominal del sistema. Los residuos presentan ciertas variaciones que se deben al ruido de medición de los sensores. Los umbrales definidos se muestran en la Tabla (4.8).

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

Tabla 4.8: *Umbrales para residuos HG.*

| Residuo | Umbral | |
|---------|--------|--------|
| | Máximo | Mínimo |
| R_1 | 3.06 | -3.06 |
| R_2 | 3.5 | -3.5 |
| R_3 | 0.05 | -0.05 |
| R_4 | 3.06 | -3.06 |
| R_5 | 3.5 | -3.5 |
| R_6 | 0.05 | -0.05 |

Podemos concluir que los observadores están estimando adecuadamente debido a que no se está induciendo ningún tipo de falla en algún sensor. Los residuos no sobrepasan los umbrales definidos. Esto se debe al comportamiento nominal del sistema. Se espera que cuando ocurra una falla los observadores generen los residuos que corresponden.

Los síntomas generados por cada uno de los residuos pueden caer en tres casos posibles, para esto se declara un 0 cuando un residuo permanece dentro de los umbrales, se declara un 1 cuando un residuo supera el umbral superior y se declara un -1 cuando un residuo supera el umbral inferior.

$$Sr_i = \begin{cases} 1, & r_i > \mu_{max}, \quad \forall t \geq 0 \\ 0, & \mu_{max} \geq r_i \geq \mu_{min}, \quad \forall t \geq 0 \\ -1, & r_i < \mu_{min}, \quad \forall t \geq 0 \end{cases}$$

Simulación 8: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de presión en el domo.

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores de alta ganancia y el comportamiento de los residuos ante una falla en el sensor de presión.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores de alta ganancia, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla del 20% en el sensor de presión en el domo, la cual se generó en $t \geq 9500 \text{ s}$, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta que termina de la simulación, físicamente puede representar del pérdida del cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor. En esta simula-

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

ción se produce una falla del 20% en el sensor de presión en el domo, la cual se generó en $t \geq 9500$ s, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta que termina de la simulación.

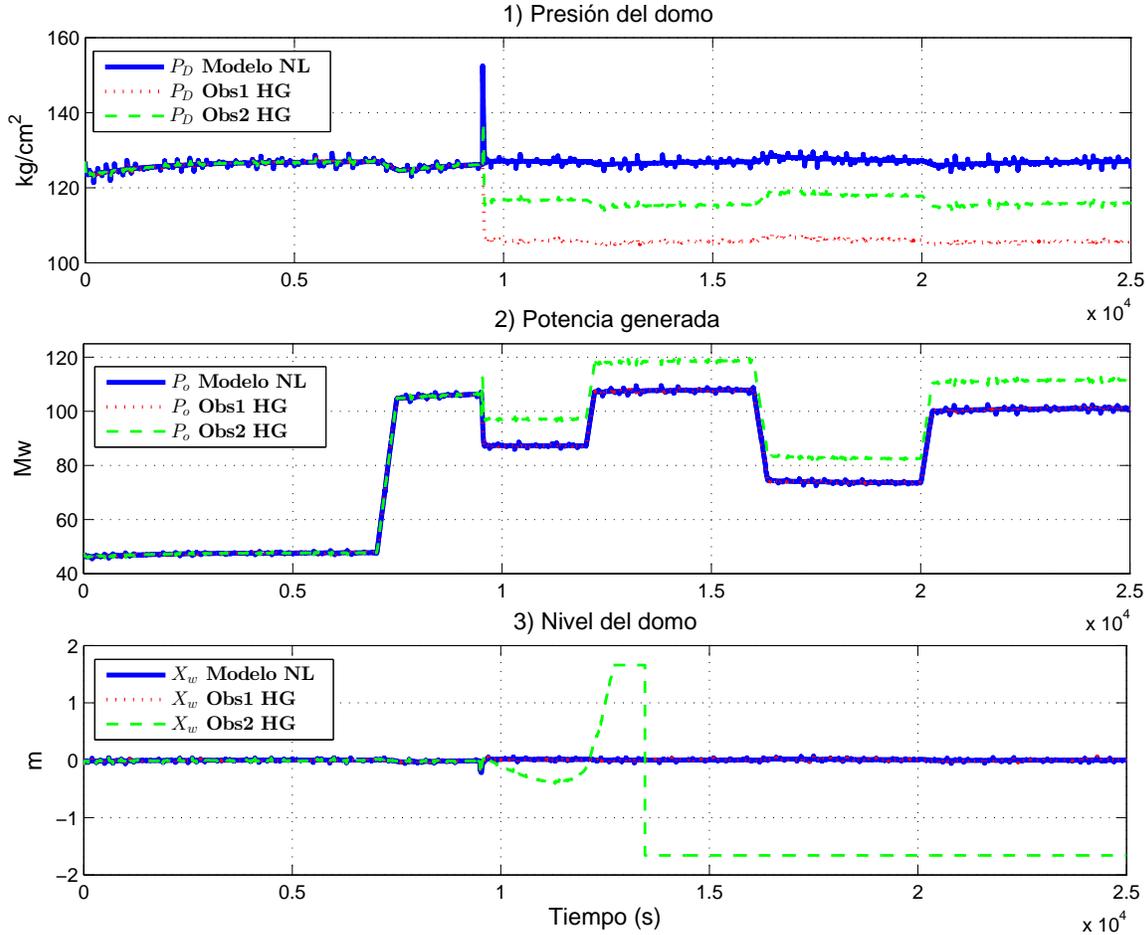


Figura 4.22: Señales de salidas con falla en el sensor de presión.

En la gráfica 1 de la Figura (4.22) se puede apreciar como la señal de salida de presión en el domo del modelo no lineal, que se encuentra en color azul sólido se ve afectada en $t = 9500$ s pero esta retoma el valor de 127 kg/cm^2 en 60 s y se mantiene debido a la acción del controlador. La señal de salida de presión en el domo del observador 1, que se encuentra en color rojo punteado sufre un decremento y se mantiene alrededor de 105 kg/cm^2 . La señal de salida de presión en el domo del observador 2, que se encuentra en color verde moteado sufre un sobretiro que alcanza el valor de 138 kg/cm^2 , después de llegar a ese valor sufre un decremento y se mantiene alrededor de 117 kg/cm^2 .

En la gráfica 2 de la Figura (4.22) se puede apreciar como en $t = 9500$ s la señal de salida de la potencia eléctrica generada del modelo no lineal que se encuentra en color azul sólido y la señal de salida de potencia eléctrica generada del observador 1 que se encuen-

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

tra en color rojo punteado, tienen el mismo comportamiento pues sufre un decremento y se mantiene alrededor de 90 MW . La señal de salida de potencia eléctrica generada del observador 2, que se encuentra en color verde moteada presenta un sobretiro que alcanza el valor de 115 MW en $t = 9500 \text{ s}$ y después del sobretiro la señal decrece y se mantiene alrededor de 98 MW , todo esto ocurre hasta antes del siguiente cambio de demanda de potencia eléctrica generada.

En la gráfica 3 de la Figura (4.22) se puede apreciar las señales de nivel en el domo del modelo no lineal en color azul sólido y del observador 1 en color rojo punteado sufren un cambio en $t = 9500 \text{ s}$ y después se sigue manteniendo alrededor de cero. La señal de salida de nivel en el domo del observador 2 en color verde moteado en $t = 9500 \text{ s}$ sufre una desviación la cual indica la pérdida de estimación de la señal del modelo no lineal.

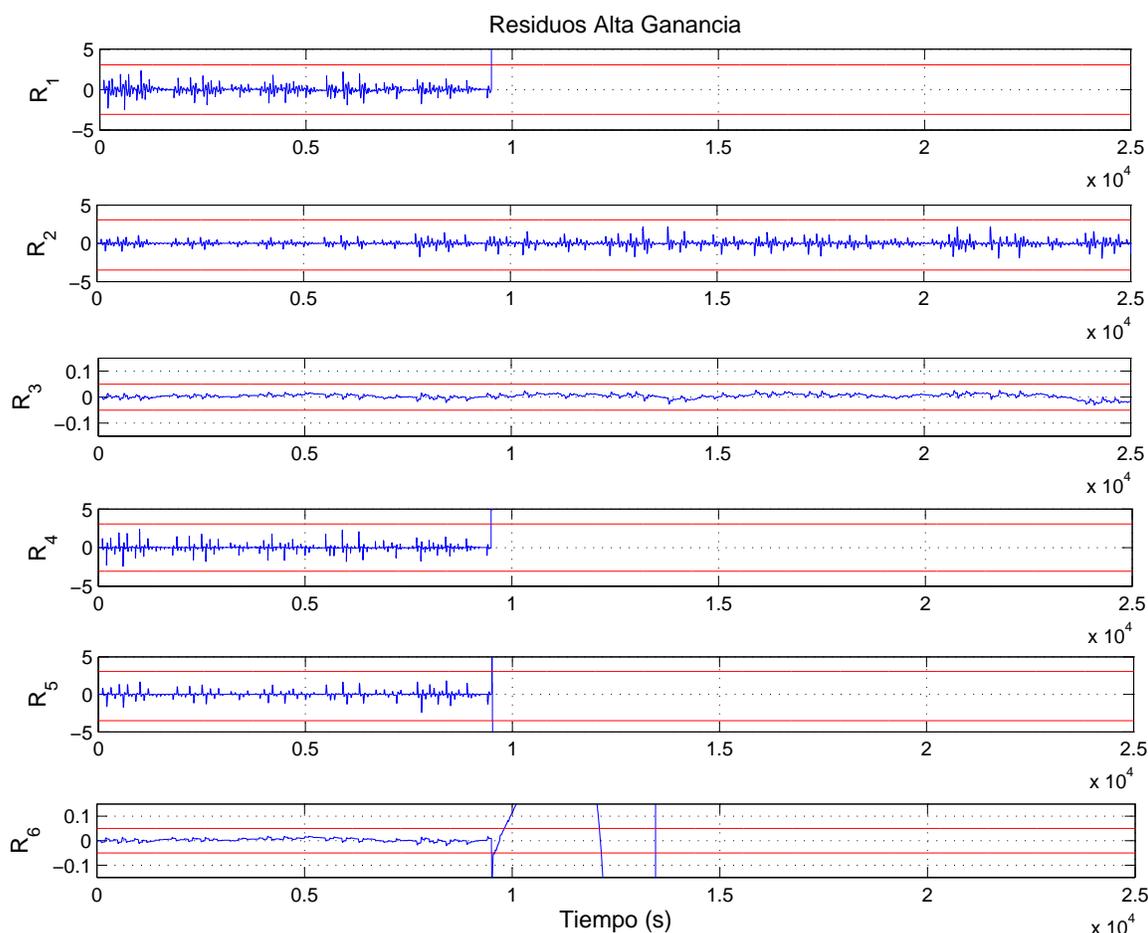


Figura 4.23: Residuos generados con falla en el sensor de presión.

En la gráfica de R_1 de la Figura (4.23) se muestra como la señal del residuo 1 en color azul sólido, en $t = 9500 \text{ s}$ genera un síntoma, debido a que la señal de residuo sobrepasa la

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

señal del umbral superior, que se encuentra en color rojo sólido. En las gráficas de R_2 y de R_3 se aprecian que las señales del residuo 2 y del residuo 3 respectivamente, ambas señales no sobrepasa ninguno de los 2 umbrales y se mantiene alrededor de cero. Se puede apreciar en la gráfica de R_4 como la señal del residuo 4 en $t = 9500$ s sobrepasa el umbral superior. En la gráfica de R_5 se muestra la señal del residuo 5, en $t = 9500$ s la señal del residuo 5 sobrepasa el umbral superior y después en $t = 9500.5$ s la señal del residuo 5 decrece y sobrepasa el umbral inferior. En la gráfica de R_6 se muestra la señal del residuo 6 en color azul sólido, se puede apreciar que la señal en color azul sólido sobrepasa el umbral inferior en $t = 9500$ s.

Analizando los resultados mostrados en las Figuras (4.22) y (4.23), podemos apreciar que las señales de salida del observador 2 de alta ganancia son sensibles ante la falla en el sensor de presión en el domo que ocurre en $t = 9500$ s. Basado en el análisis del comportamiento de las señales es posibles aseverar que el comportamiento de las señales de salida del observador 1 de alta ganancia son el adecuado.

Podemos concluir que mediante los síntomas generados por la comparación de las señales de residuos con sus respectivas señales de umbrales, es posibles detectar el momento de aparición de la falla en el sensor de presión en el domo y también es posible generar una firma de falla para su localización. En la Tabla (4.9) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de presión en el domo.

Tabla 4.9: *Firma de falla en sensor de presión en el domo.*

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | -1 |

Simulación 9: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de potencia generada

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores de alta ganancia y el comportamiento de los residuos ante una falla en el sensor de potencia eléctrica generada.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores Takagi-Sugeno, con 127 kg/cm^2 en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla del 20% en el sensor de potencia eléctrica generada, la cual se generó en $t \geq 9500$ s, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y se mantiene hasta el final de la simulación, físicamente puede representar la pérdida de cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

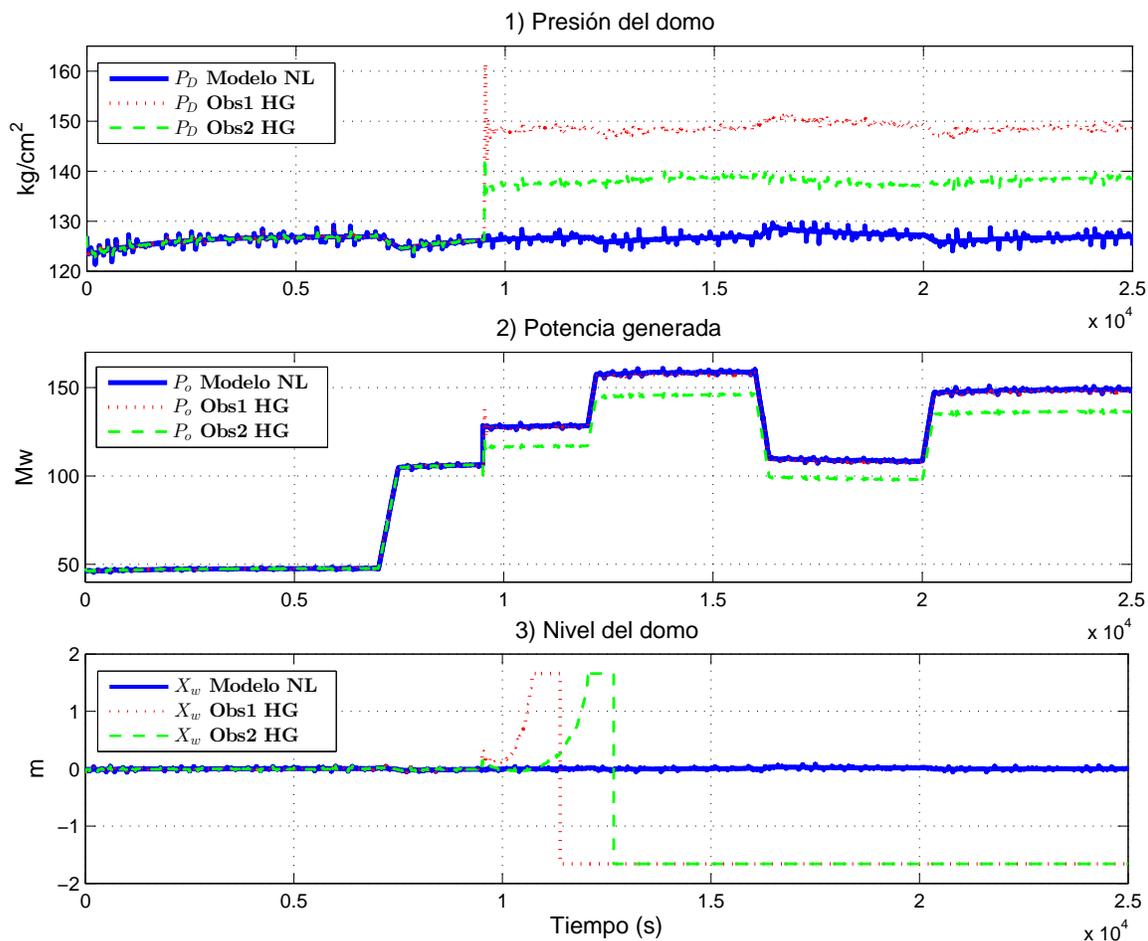


Figura 4.24: Señales de salida con falla en el sensor de potencia.

En las gráficas de la Figura (4.24) se muestran las señales de salida de presión en el domo. En la gráfica 1 se aprecia como la señal de salida del modelo no lineal, que se encuentra en color azul sólido se mantiene alrededor de $127 kg/cm^2$. La señal de salida del observador 1 que se encuentra en color rojo punteado, presenta un sobre tiro que alcanza el valor de $162 kg/cm^2$ en $t = 9500.4 s$ y en $t = 9500.5 s$ sufre un decremento y se mantiene alrededor de $150 kg/cm^2$ en $t \geq 9500 s$. La señal de salida de presión en el domo del observador 2, que se encuentra en color verde moteado presenta un sobretiro que alcanza los $142 kg/cm^2$ en $t = 9500.4 s$, en donde inicia un decremento hasta llegar a $138 kg/cm^2$ en $t \geq 9500.5 s$ donde se mantiene hasta el fin de la simulación.

En la gráfica 2 de la Figura (4.24) se aprecia como en $t = 9500 s$, la señal de salida de potencia eléctrica generada del modelo no lineal que se encuentra en color azul sólido y la señal de salida del observador 1 se encuentra en color rojo punteado, presentan el mismo comportamiento, es decir ambas señales de salida sufren un incremento en $t = 9500 s$ hasta llegar al valor de $125 MW$ y se mantiene alrededor de ese valor hasta el próximo cambio

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

en la demanda de potencia eléctrica. La señal de salida de potencia eléctrica generada del observador 2 que se encuentra en color verde moteado, sufre un sobretiro decreciente que alcanza el valor 120 MW en $t = 9500.35 \text{ s}$, después del sobretiro la señal toma un valor alrededor de 110 MW .

En la gráfica 3 de la Figura (4.24) se muestra la señal de salida de nivel en el domo del modelo no lineal se mantiene con un comportamiento cercano a cero, el cual es debido a la acción del controlador. La señal de salida de nivel en el domo del observador 1 sufre una desviación en $t = 9500 \text{ s}$, hasta llegar a -1.66 m en $t = 11386 \text{ s}$. En cambio la señal de salida de nivel en el domo del observador 2 sufre una desviación decreciente en $t = 9500 \text{ s}$ hasta llegar a -1.66 m en $t = 12667 \text{ s}$.

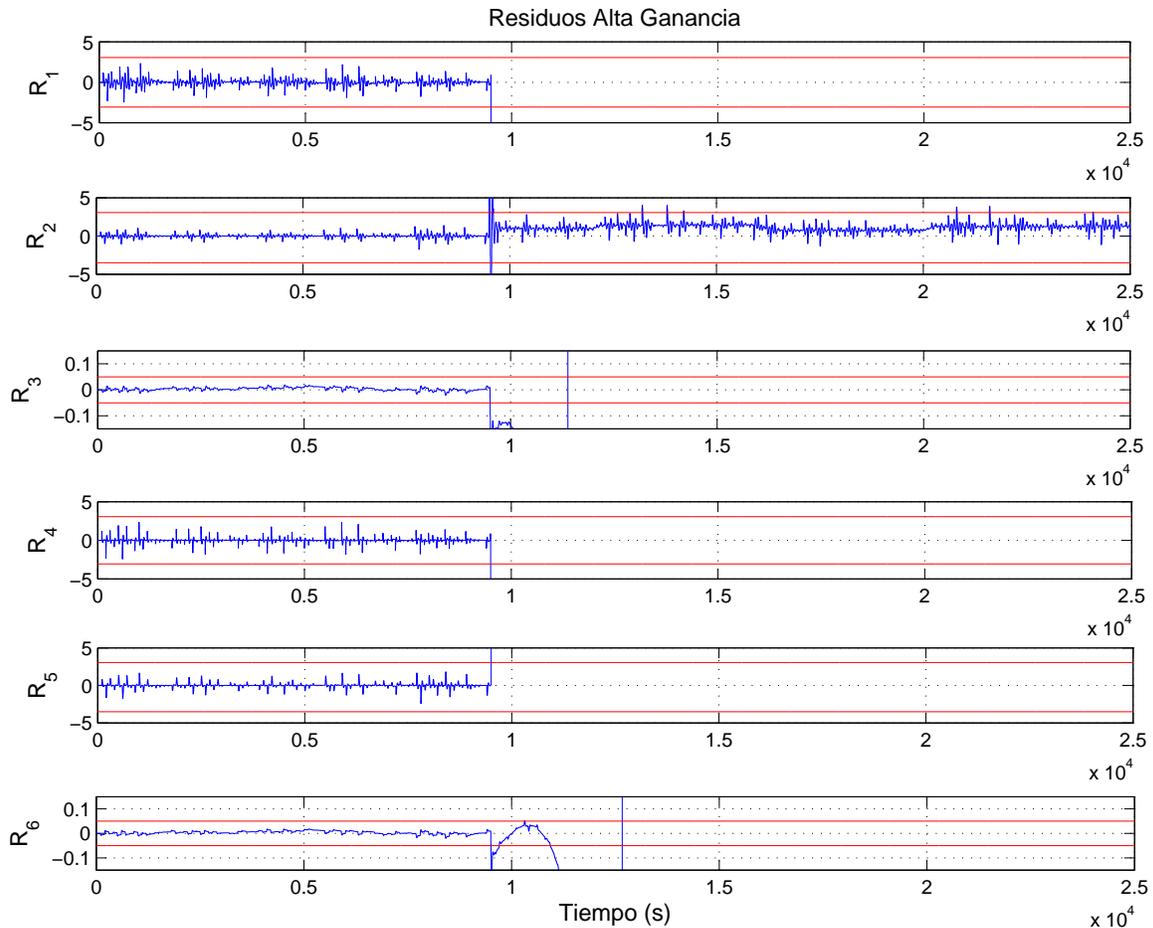


Figura 4.25: Residuos generados con falla en sensor de potencia.

En la gráfica de R_1 de la Figura (4.25) se muestra como la señal del residuo 1 en color azul sólido sobrepasa el umbral inferior en $t = 9500 \text{ s}$. La señal del residuo 2 se muestra en la gráfica de R_2 , se puede apreciar como la señal del residuo 2 sobrepasa el umbral

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

superior en $t = 9500$ s, en $t = 9500.5$ s sobre pasa el umbral inferior y en $t = 9501$ s la señal del residuo 2 retoma el valor cercano a cero y se mantiene entre los umbrales hasta el fin de la simulación. En la gráfica de R_3 se muestra como la señal del residuo 3 en color azul sólido sobrepasa el umbral inferior en $t = 9500$ s y de la misma manera la señal del residuo 4 se muestra en la gráfica de R_4 , en $t = 9500$ s sobrepasa el umbral inferior. En la gráfica de R_5 se muestra como la señal del residuo 5 sobrepasa el umbral superior en $t = 9500$ s. En la grafica de R_6 se aprecia como la señal del residuo 6 que ese encuentra en color azul sólido, supera el valor del umbral inferior en $t = 9500$ s.

Analizando los resultados obtenidos en las Figura (4.24) y (4.25), se aprecia como las señales de salida de los observadores de alta ganancia son afectadas debido a la falla en el sensor de potencia eléctrica generada. El comportamiento de las señales del modelo no lineal es el adecuado, ya que la señal del sensor de potencia eléctrica generada no es tomada para el sistema de control y no se ven afectadas las señales de presión en el domo y nivel en el domo.

Basados en los resultados de esta simulación es posible definir una firma de falla, cuando ocurra una falla en el sensor de potencia eléctrica generada. Con respecto al comportamiento de los observadores de alta ganancia es posible detectar el instante de aparición de la falla en el sensor de potencia eléctrica generada.

En la Tabla (4.10) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de potencia eléctrica generada.

Tabla 4.10: *Firma de falla en sensor de potencia eléctrica generada.*

| Síntomas Sensor | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |

Simulación 10: Funcionamiento del sistema FDI con falla en el sensor de nivel

El objetivo de esta simulación es observar el comportamiento de los observadores de alta ganancia y de los residuos ante una falla en el sensor de nivel, esto para poder detectar una falla en el sensor de nivel en el domo y poder generar una firma de falla para la localización.

Esta simulación se realizó en un ambiente de Simulink, mediante el método de integración de Euler, con un paso de integración de 0.01, con condiciones iniciales iguales para el modelo no lineal y cada uno de los observadores de alta ganancia, con 127 kg/cm² en la presión en el domo, 47.7 MW de potencia eléctrica generada y -0.0786 m en el nivel en el domo. En esta simulación se produce una falla en la medición del sensor de nivel de 20 cm, la cual se generó en $t \geq 9500$ s, la falla generada es una falla aditiva, abrupta y

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

se mantiene hasta el final de la simulación, físicamente puede representar la pérdida del cero del sensor o daños en algún componente electrónico del sensor.

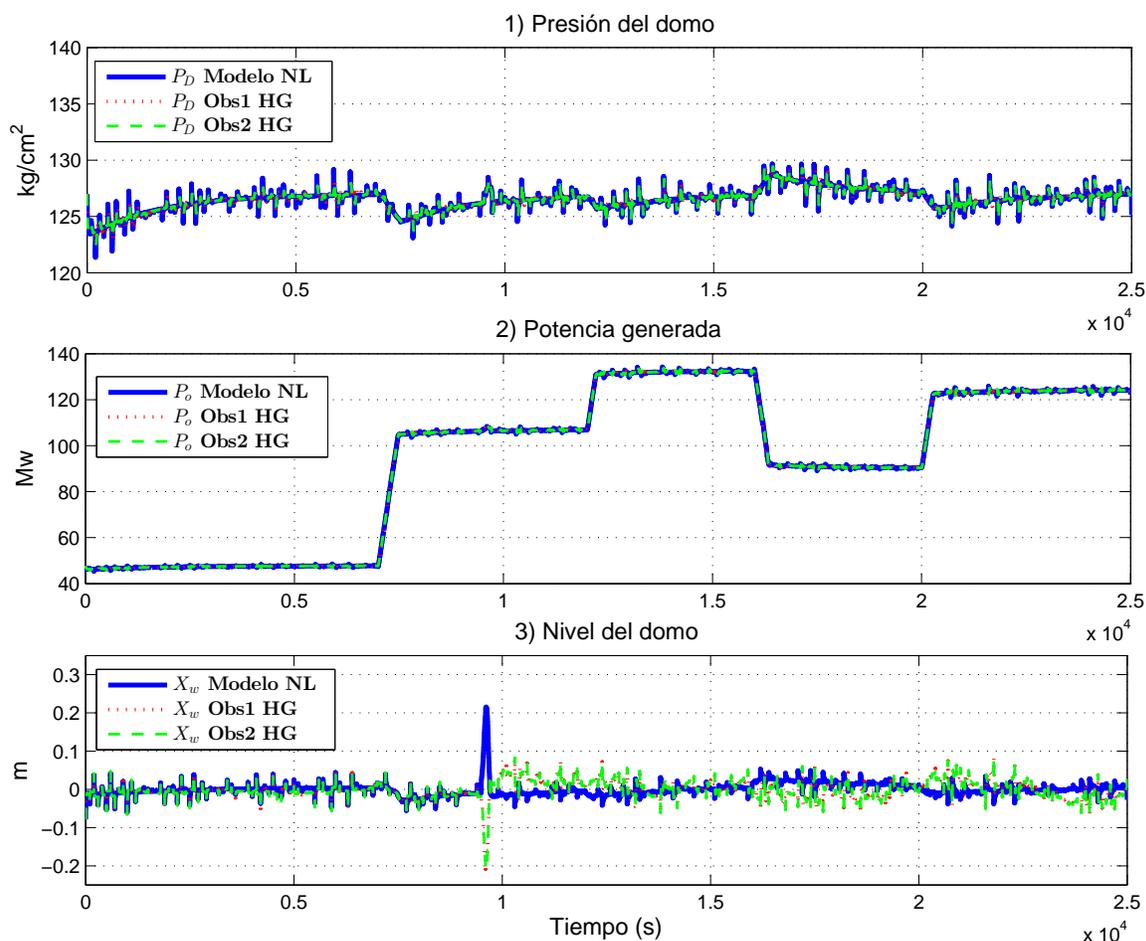


Figura 4.26: Señales de salida con falla en el sensor de nivel.

En la gráfica 1 de la Figura (4.26) se muestra la comparación de las señales de presión en el domo. La señal de presión en el domo del modelo no lineal se encuentra en color azul sólido, se mantiene alrededor de $127 kg/cm^2$. La señal en color rojo punteado y la señal en color verde moteado son la salida del observador 1 y la salida del observador 2 respectivamente. Las cuales se mantienen alrededor de $127 kg/cm^2$ de la misma manera que la señal de salida del modelo no lineal.

En la gráfica 2 de la Figura (4.26) se muestran las señales de salida de potencia eléctrica generada. Se logra apreciar como la señal de salida del observador 1 en color rojo punteado y la señal de salida del observador 2 en color verde moteado, se comportan de la misma manera que la señal de salida del modelo no lineal en color azul sólido, a pesar de los cambios en la demanda de potencia eléctrica generada.

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

En la gráfica 3 de la Figura (4.26) se muestra el comportamiento de las señales de nivel en el domo. Se aprecia como la señal del modelo no lineal sufre un incremento en $t = 9500$ s por la falla en el sensor de nivel en el domo, debido a la acción del controlador de nivel de agua en el domo la señal retoma el valor cercano a cero en $t = 9700$ s. La señal del observador 1 en color rojo punteado y la señal del observador 2 en color verde moteado se ven afectadas por la falla en $t = 9500$ s, se genera un decremento en la señal pero en $t = 9700$ s retoman el valor cercano a cero.

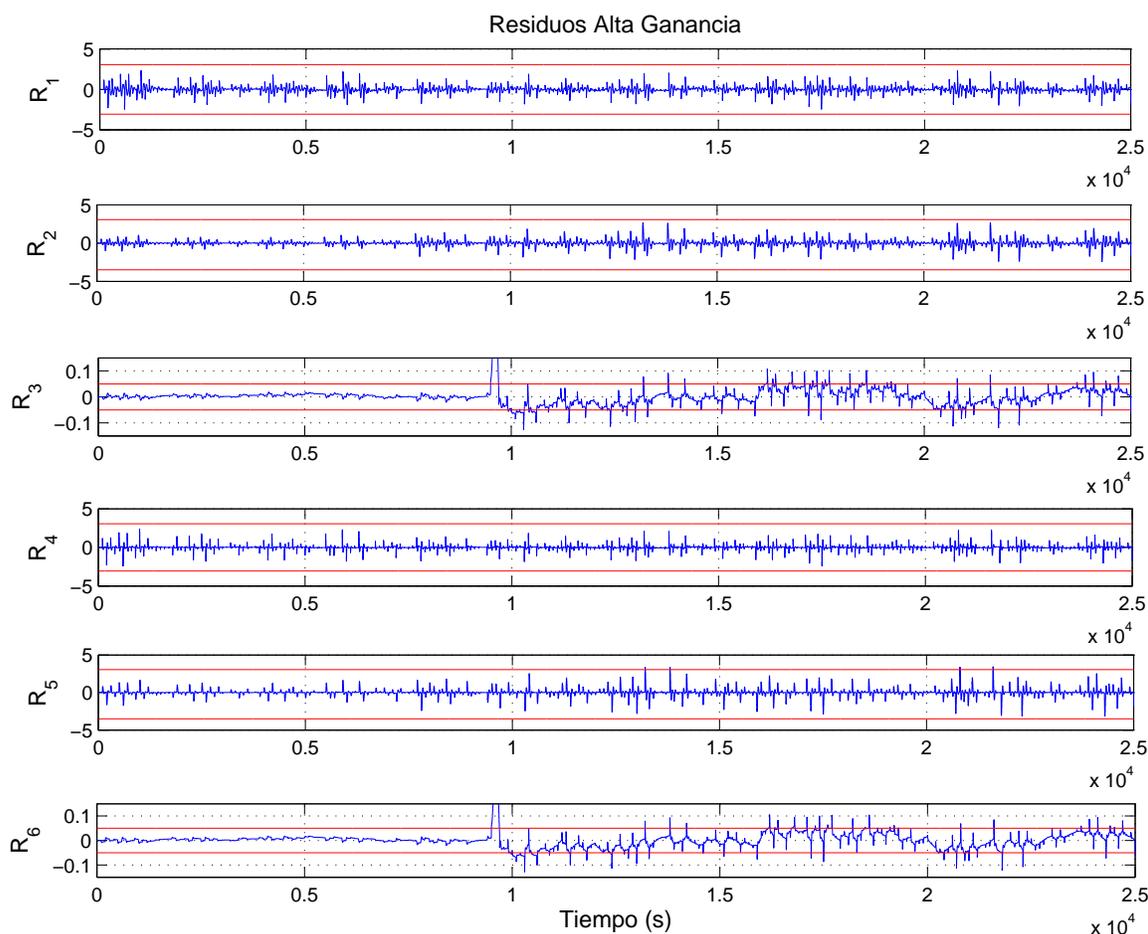


Figura 4.27: Residuos generados con falla en el sensor de nivel.

En las gráficas R_1 , R_2 , R_4 y R_5 de la Figura (4.27) se muestra como las señales en color azul sólido, que pertenecen a los residuos 1, 2, 4 y 5 que no superan el umbral máximo y el umbral mínimo. Sin embargo la señal del residuo 3 y la señal del residuo 6 superan el umbral superior en $t = 9500$ s, pero en $t = 9700$ s esta retoma el valor cercano a cero, sin embargo no logra mantenerse dentro de los umbrales.

4.2. Diseño de un sistema FDI para el generador de vapor

Analizando los resultados obtenidos en las Figuras (4.26) y (4.27), la señales de los observadores de alta ganancia no se ven afectadas, sin embargo las señales de estimación del nivel en el domo se ven afectadas, y mediante estas diferencias es posible detectar una falla.

Se puede concluir que es posible detectar una falla en el sensor de nivel mediante la estimación del nivel en el domo y es posible generar una firma de falla para la localización.

En la Tabla (4.11) se muestra la firma de falla generada por los síntomas, cuando ocurre una falla en el sensor de nivel de agua en el domo.

Tabla 4.11: *Firma de falla en sensor de nivel de agua en el domo.*

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |

Construcción de la matriz de firma de fallas

A partir de los síntomas generados por la comparación de cada una de las señales de residuo con respecto a los umbrales definidos, es posible generar una firma de fallas para la localización del dispositivo que este fallando. En la Tabla (4.12) se muestra la matriz de firma de fallas para cada una de las posibles fallas en los sensores de medición del generador de vapor de la central termoeléctrica, donde las columnas indican la firma de falla generada para cada sensor y las filas indican a que residuo pertenece cada síntoma generado.

Tabla 4.12: *Matriz de firma de fallas FDI HG.*

| Síntomas \ Sensor | Falla P_D | Falla P_O | Falla x_w |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| S_{r1} | 1 | -1 | 0 |
| S_{r2} | 0 | 1 | 0 |
| S_{r3} | 0 | -1 | 1 |
| S_{r4} | 1 | -1 | 0 |
| S_{r5} | 1 | 1 | 0 |
| S_{r6} | -1 | -1 | 1 |

Podemos observar que las firmas de fallas no son iguales y con esto podemos detectar y localizar cada una de las fallas en cada uno de los sensores del sistema.

Por ejemplo, supongamos que el generador de vapor de la central termoeléctrica está funcionando de manera nominal, esto quiere decir que las señales de residuo permanecen sin

4. Sistema de detección y localización de fallas para el generador de vapor

sobrepasar alguno de los dos umbrales. Sin embargo repentinamente se enciende una alarma, la alarma indica que está ocurriendo una falla.

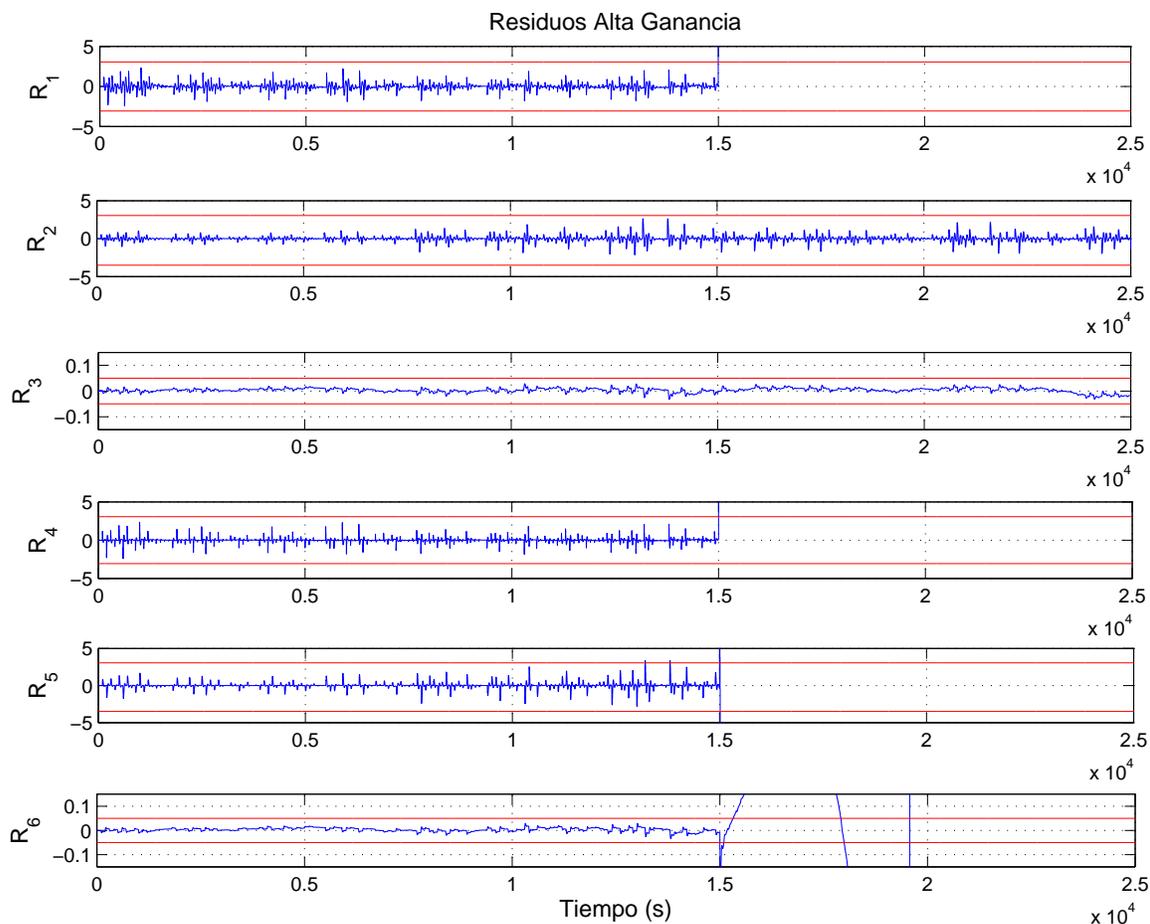


Figura 4.28: Residuos generados.

En la Figura (4.28) se muestra cada una de las gráficas el comportamiento de las señales de los residuos generados por el sistema de detección y localización de fallas. Los síntomas generados por los residuos se muestran en la Tabla (4.13).

Tabla 4.13: Firma de falla.

| Sensor \ Síntomas | S_{r1} | S_{r2} | S_{r3} | S_{r4} | S_{r5} | S_{r6} |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Falla en P_D | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | -1 |

Analizando los resultados obtenidos en la Figura (4.28) podemos apreciar que existe la presencia de una falla en $t = 15000$ s, y mediante los síntomas generados que se muestran

en la Tabla (4.13) se puede aclarar que la falla ocurre en el sensor de presión en el domo.

Podemos concluir que mediante el sistema de detección y localización de falla en sensores basado en observadores de alta ganancia, es posible detectar y localizar fallas en los sensores del generador de vapor de la central termoeléctrica.

4.3. Conclusiones del capítulo 4

Fue posible realizar el diseño de un sistema de detección y localización de fallas en sensores mediante un banco de observadores Takagi-Sugeno utilizando la señal de medición del sensor de presión en el domo y la señal de medición del sensor de potencia generada.

Para lograr la generación de un residuo y poder hacer la detección de falla en el sensor de nivel, se realizó una estimación del nivel mediante las señales estimadas por cada observador Takagi-Sugeno.

Fue posible generar un matriz de firmas de fallas a partir de los síntomas generados por cada uno de los residuos evaluados y para cada una de las fallas en los sensores disponible. Mediante la matriz de firmas de fallas es posible localizar el sensor que está fallando, esto es posible debido a que las firmas para cada falla resultan ser diferentes.

También se realizó el diseño de un sistema de detección y localización de fallas en sensores mediante un banco de observadores de alta ganancia utilizando la señal de medición del sensor de presión en el domo y la señal de medición del sensor de potencia generada.

Se tomaron las señales estimadas por cada observador de alta ganancia y se realizó la estimación del nivel, para lograr la generación de un residuo y poder hacer la detección de falla en el sensor de nivel, de la misma manera que en el sistema de detección y localización de fallas mediante observadores Takagi-Sugeno.

A partir de los síntomas generados por cada uno de los residuos evaluados que se generaron por el banco de observadores de alta ganancia, se logró la construcción de una matriz de firma de fallas. Mediante la matriz de firmas de fallas es posible localizar el sensor en donde se encuentra la falla, esto es posible debido a que las firmas de fallas para cada uno de los sensores es distinta.

| Características de los observadores | |
|---|--|
| <i>Observadores Takagi-Sugeno</i> | <i>Observadores de alta ganancia</i> |
| El tiempo de convergencia de las señales de los observadores es menor a 50 s, como se muestra en la simulación 1. | El tiempo de convergencia de las señales de los observadores es menor a 100 s, como se muestra en la simulación 6. |
| Las señales de los observadores presentan una amplificación al ruido de medición de las señales de los sensores. Este es amplificado aproximadamente 8 veces. | Las señales de salida de los observadores presenta una reducción del ruido de medición de los sensores de un 50% de su valor. |
| Las señales de salida de los observadores presentan sobretiros muy grandes de hasta 2 veces el tamaño de la falla en el instante de aparición. | Las señales de los observadores no presentan sobre tiros mayores a las fallas en el instante de aparición de la misma. |
| Debido a la sensibilidad del ruido que presentan. Esto provoca tener umbrales grandes debido a que los residuos se ven afectados por el ruido. | Debido a la reducción del ruido de medición que presentan las señales de salida presenta ante el ruido de medición. Se tienen umbrales pequeños, esto porque los residuos no se ven tan afectados por el ruido en condiciones nominales. |

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Originalidad

A partir de la revisión del estado del arte, el diseño de un sistema de detección y localización de fallas en sensores para el generador de vapor de una central termoeléctrica. Mediante una representación Takagi-Sugeno que es construido mediante el método de “Enfoque en el sector no lineal” basado en el modelo no lineal de Åström.

5.2. Actividades realizadas

Se estudió el funcionamiento de centrales termoeléctricas y sus sistemas de control para comprender el modelo de Åström. Se propuso el diseño de un sistema de control para las variables de presión en el domo y nivel en el domo, debido a la importancia de las variables en la seguridad del generador de vapor de una central termoeléctrica.

Debido a que el modelo de Åström no cumplía con la propiedad de observabilidad, se realizó una adaptación del mismo. Se propuso un modelo reducido, este se utiliza para la construcción de una representación Takagi-Sugeno y para el diseño de observadores Takagi-Sugeno y de alta ganancia. Se muestra una modificación a partir del desacoplo de una Ecuación dinámica, debido a que no afecta en el cálculo de las demás Ecuaciones, sin embargo no deja de ser parte del modelo. A partir de la modificación realizada se construyó una representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal de Åström, esta representación Takagi-Sugeno esta compuesta por 4 submodelo o modelos locales, los cuales representa de manera exacta el comportamiento dinámico del modelo no lineal.

Basado en la representación Takagi-Sugeno se diseñaron 2 observadores Takagi-Sugeno, el primer observador Takagi-Sugeno se diseñó utilizando todas las entradas al modelo no lineal y solo la señal de salida de potencia eléctrica generada. El segundo observador Takagi-Sugeno, se diseñó utilizando todas las señales de entrada del modelo no lineal y

utilizando la sumatoria de las señales de salida de potencia eléctrica generada y la señal de presión en el domo. Se diseñó un sistema de detección y localización de fallas en sensores, mediante el banco de observadores Takagi-Sugeno como generadores de residuo estructurado, se definieron umbrales fijos, con los que se logró la generación de síntomas para la localización de fallas.

En base a la adaptación del modelo de Åström, se diseñaron 2 observadores de alta ganancia, el primer observador de alta ganancia se diseñó utilizando todas las entradas al modelo no lineal y solo la señal de salida de potencia eléctrica generada. El segundo observador de alta ganancia, se diseñó utilizando todas las señales de entrada del modelo no lineal y utilizando la sumatoria de las señales de salida de potencia eléctrica generada y la señal de presión en el domo. Se diseñó un sistema de detección y localización de fallas en sensores, mediante el banco de observadores de alta ganancia como generadores de residuo estructurado, se definieron umbrales fijos, con los que se logró la generación de síntomas para la localización de fallas.

5.3. Demostración de la hipótesis

De acuerdo a la hipótesis planteada se logra aseverar que es posible detectar y localizar fallas en los sensores de las variables críticas del generador de vapor de una central termoeléctrica. Se logró el diseño de un banco de observadores Takagi-Sugeno como generador de residuos, basado en la representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal. También se diseñó un banco de observadores de alta ganancia como generadores de residuo, basado en el modelo no lineal.

Problemas como la no observabilidad se solucionaron mediante adecuaciones al modelo de Åström, cabe mencionar que no se realizó ningún cambio en los parámetros del modelo, simplemente se manipulo la entrada u_2 y la tercera Ecuación dinámica que se encuentra desacoplada, para cumplir con la propiedad de observabilidad.

No poder construir un observador mediante la señal de salida de presión en el domo, fue uno de los problemas encontrados debido a que no era posible generar el banco de observadores, este problema se solucionó diseñando un observador mediante la sumatoria de las señales del sensor de presión en el domo y la señal del sensor de potencia generada.

A partir de los resultados obtenidos es posible ver como los observadores Takagi-Sugeno tiene una mayor rapidez de convergencia que los observadores de alta ganancia. Sin embargo ambos presentan una estimación adecuada de las señales de salida del modelo no lineal de Åström.

5. Conclusiones

Los observadores de alta ganancia presenta una disminución del ruido de medición de los sensores, en caso contrario los observadores Takagi-Sugeno amplifican el ruido de medición. La reducción del ruido de medición de los observadores de alta ganancia permite seleccionar umbrales pequeños en comparación con los umbrales seleccionados para el sistema de detección y localización de fallas basado en observadores Takagi-Sugeno.

En el caso de la estimación del nivel en el domo, que se realizó a partir de las señales estimadas por los observadores, se logra obtener una firma de falla, la cual permite identificar que el sensor del nivel en el domo esta fallando. Esto se pudo lograr con ambos observadores.

Podemos concluir que mediante el sistema Takagi-Sugeno construido es posible detectar y localizar fallas en sensores del generador de vapor de una central termoeléctrica, debido a que los observadores Takagi-Sugeno se diseñaron a partir del modelo Takagi-Sugeno construido.

5.4. Trabajos futuros

A partir de este trabajo realizado, se pueden generar otros trabajos como:

- ✓ Utilizar el esquema de detección y localización de fallas en sensores y realizar pruebas en un modelo no lineal de mayor orden.
- ✓ Realizar estudios de diseño en detección de fallas en actuadores en el generador de vapor de la central termoeléctrica.
- ✓ Realizar el análisis y estudio para la construcción de un generador de residuo mediante algún otro método debido a que no se realizó mediante observadores, ya que el sistema no era observable.

Bibliografía

- Astorga-Zaragoza, C.-M., Theilliol, D., Ponsart, J., y Rodrigues, M. (2009). Sensor fault diagnosis for a class of LPV descriptor systems. En *7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis, Zielona Gora, Poland*.
- Åström, K. J. y Eklund, K. (1972). A simplified non-linear model of a drum boiler-turbine unit. *International Journal of Control*, 16(1):145–169.
- Åström, K. J. y Eklund, K. (1975). A simple non-linear drum boiler model. *International Journal of Control*, 22(5):739–740.
- Barbosa, P. R., Tiago, G. M., Bueno, E. I., y Martinez, I. (2011). Fault detection of sensors in nuclear reactors using self-organizing maps. *International Nuclear Atlantic Conference, INAC*.
- Basseville, Michèle and Nikiforov, Igor V and others (1993). *Detection of abrupt changes: theory and application*, volumen 104. Prentice Hall Englewood Cliffs.
- Bell, R. y Åström, K. J. (1987). *Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: data logs and parameter estimation for a 160 MW unit*. Lund Institute of Technology, Department of Automatic Control.
- Bouattour, M., Chadli, M., El Hajjaji, A., y Chaabane, M. (2009). H_∞ sensor faults estimation for T-S models using descriptor techniques: application to fault diagnosis. En *Fuzzy Systems, 2009. FUZZ-IEEE 2009. IEEE International Conference on*, pp. 251–255. IEEE.
- Briat, C. (2008). *Commande et observation robustes des Systemes LPV Retardés*. Tesis doctoral, Grenoble, INPG.
- David, G. (1971). An introduction to observers. *IEEE Transactions on automatic control*, 16(6):596–602.
- Dimeo, R. y Lee, K. Y. (1995). Boiler-turbine control system design using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(4):752–759.
- Duan, G.-R. y Yu, H.-H. (2013). *LMIs in Control Systems: Analysis, Design and Applications*. CRC Press.

- Dukelow, S. (1991). The control of boilers 2nd ed. *The United States: The Instrumentation, Systems, and Automation Society*.
- Escobar, R., Astorga-Zaragoza, C., Téllez-Anguiano, A., Juárez-Romero, D., Hernández, J., y Guerrero-Ramírez, G. (2011). Sensor fault detection and isolation via high-gain observers: Application to a double-pipe heat exchanger. *ISA transactions*, 50(3):480–486.
- Gauthier, J.P., H. y. O. S. (1992). A simple observer for nonlinear systems applications to bioreactors. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 37(6):875–880.
- Habbi, H., Zelmat, M., y Bouamama, B. O. (2003). A dynamic fuzzy model for a drum–boiler–turbine system. *Automatica*, 39(7):1213–1219.
- Hammouri, H., Targui, B., y Armanet, F. (2002). High gain observer based on a triangular structure. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 12(6):497–518.
- He, T.-X., Lou, X.-F., y Li, P. (2009). Study on boiler-turbine coordinated system of power unit using observer backstepping approach. *Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on*, 4:1996–2001.
- Hermann, R. y Krener, A. J. (1977). Nonlinear controllability and observability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22(5):728–740.
- Isermann, R. (1997). Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods an introduction. *Control engineering practice*, 5(5):639–652.
- Isermann, R. (2005). Model-based fault-detection and diagnosis–status and applications. *Annual Reviews in control*, 29(1):71–85.
- Isermann, R. (2011). Perspectives of automatic control. *Control Engineering Practice*, 19(12):1399–1407.
- Isidori, A. (1995). *Nonlinear Control Systems*. Springer Science & Business Media.
- Jiang, B., Gao, Z., Shi, P., y Xu, Y. (2010). Adaptive fault-tolerant tracking control of near-space vehicle using Takagi–Sugeno fuzzy models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(5):1000–1007.
- Jizhen, L., Yanqiao, C., Deliang, Z., y Guangjun, Y. (2002). Identification of a boiler-turbine system using TS fuzzy model. *TENCON'02. Proceedings. 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering*, 3:1278–1281.
- Johansen, T. A., Shorten, R., y Murray-Smith, R. (2000). On the interpretation and identification of dynamic Takagi-Sugeno fuzzy models. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 8(3):297–313.

- Khalil, H. K. y Grizzle, J. (1996). *Nonlinear Systems*, volumen 3. Prentice Hall New Jersey.
- Khani, F. y Yazdizadeh, A. (2009). Boiler-turbine unit controller design based on the extended state observer. En *Control and Automation, 2009. ICCA 2009. IEEE International Conference on*, pp. 2066–2071. IEEE.
- Lafay, J.-F. (2009). *Commande et Observation Robustes des Systemes LPV Retardés*. Tesis doctoral, Universita degli Studi di Siena.
- Lendek, Z., Guerra, T. M., Babuska, R., y De Schutter, B. (2010). *Stability analysis and nonlinear observer design using Takagi-Sugeno fuzzy models*, volumen 262. Springer.
- Li, Y., Shen, J., Lee, K. Y., y Liu, X. (2012). Offset-free fuzzy model predictive control of a boiler–turbine system based on genetic algorithm. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 26:77–95.
- Lin, C., Wang, G., Lee, T. H., y He, Y. (2007). *LMI approach to analysis and control of Takagi-Sugeno fuzzy systems with time delay*, volumen 351. Springer.
- López-Estrada, F.-R., Ponsart, J.-C., Astorga-Zaragoza, C.-M., Camas-Anzueto, J.-L., y Theilliol, D. (2015). Robust sensor fault estimation for descriptor-LPV systems with unmeasurable gain scheduling functions: Application to an anaerobic bioreactor. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 25(2):233–244.
- Luan, X.-C., Li, S.-Y., Wu, J.-J., Zhao, B.-J., y Yuan, L.-Y. (2006). Takagi-Sugeno fuzzy coordinated control system based on fuzzy state observer for power unit. *Proceedings-Chinese Society of Electrical Engineering*, 26(4):76.
- Moradi, H. y Bakhtiari-Nejad, F. (2011). Improving boiler unit performance using an optimum robust minimum-order observer. *Energy Conversion and Management*, 52(3):1728–1740.
- Morton, A. y Price, P. (1977). The controllability of steam output, pressure and water level in drum boilers. *Steam at work: industrial and marine steam plant*, pp. 75–84.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación.
- Ohtake, H., Tanaka, K., y Wang, H. O. (2003). Fuzzy modeling via sector nonlinearity concept. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 10(4):333–341.
- Puig, V., Quevedo, J., Escobet, T., Morcego, B., y Ocampo, C. (2004). Control tolerante a fallos (parte I): fundamentos y diagnóstico de fallos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 1(1):15–31.
- Qin, S. J. (2009). Data-driven fault detection and diagnosis for complex industrial processes. En *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, pp. 1115–1125.

- SAMA (1981). Standard PMC 22.1-1981 Functional Diagramming of Instrument and Control Systems. *Scientific Apparatus Makers Association*.
- Stork, D. G., Duda, R. O., Hart, P. E., y Stork, D. (2001). Pattern classification. *IO/II7*.
- Takagi, T. y Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, (1):116–132.
- Tornambe, A. (1989). Use of asymptotic observers having-high-gains in the state and parameter estimation. En *Decision and Control, 1989., Proceedings of the 28th IEEE Conference on*, pp. 1791–1794. IEEE.
- Verde, C., Gentil, S., y Morales-Menéndez, R. (2013). *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos*. Trillas.
- Wu, X., Shen, J., Li, Y., y Lee, K. Y. (2014). Hierarchical optimization of boiler–turbine unit using fuzzy stable model predictive control. *Control Engineering Practice*, 30:112–123.
- Yu, T., Chan, K., Tong, J., Zhou, B., y Li, D. (2010). Coordinated robust nonlinear boiler-turbine-generator control systems via approximate dynamic feedback linearization. *Journal of Process Control*, 20(4):365–374.
- Zheng, Y., Fang, H., y Wang, H. O. (2006). Takagi-Sugeno fuzzy-model-based fault detection for networked control systems with Markov delays. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 36(4):924–929.