



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Control Tolerante a Fallas en Actuadores basado en el Modelo
Reducido de una Central Termoeléctrica

presentada por

Ing. Jorge Yusef Colín Castillo

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

Director de tesis

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo

Codirector de tesis

Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza

Cuernavaca, Morelos, México. Julio de 2020.



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Mor., 15/jul/2020
No. de Oficio: DIE/442/20
Asunto: Aceptación de documentos de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Ing. Jorge Yusef Colín Castillo**, con número de control **M18CE085** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado "**Control tolerante a fallas en actuadores basado en el modelo reducido de 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

Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9968714

CODIRECTOR DE TESIS

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

REVISOR 1

Dr. Enrique Quintero Mármol Márquez
Doctor en Ciencias en Ingeniería Química
Cédula profesional 10259407

REVISOR 2

Dra. Doctora en Ciencias en Ingeniería Química
Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7980045

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

MPS/lrr.



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **21/julio/2020**

OFICIO No. SAC/ 233/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

JORGE YUSEF COLÍN CASTILLO
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 "Control tolerante a fallas en actuadores basado en el modelo reducido de 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

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CVGR/CHG

Dedicatoria

*Dedicado a mis padres y a mi hermana,
quienes han sido mis pilares para seguir
adelante.*

Agradecimientos

A mis padres (Jorge Colín, Adriana Castillo) y a mi hermana (Casandra Colín), por ser el motor principal de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, gracias por las oportunidades que me han brindado para poder llegar hasta este nivel.

A mi novia Ximena por toda la ayuda que me ha brindado, estuviste a mi lado inclusive en los momentos y situaciones más difíciles, siempre ayudándome. Este proyecto no fue fácil, sin embargo, fuiste muy motivadora, me decías que lo lograría perfectamente.

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

A mis asesores, Dra. Gloria Lilia Osorio Gordillo y el Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza por todo ese apoyo académico brindado en todas esas asesorías, gracias por la amistad y el apoyo que siempre me brindaron.

Al Dr. Guadalupe Madrigal Espinosa por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de tesis y por su confianza depositada en mi persona.

A los integrantes del comité revisor: Dr. Enrique Quintero-Mármol Márquez y a la Dra. Ma. Guadalupe López López, cuyos comentarios y observaciones fueron muy valiosos para el desarrollo del presente trabajo.

A la Licenciada Lorena Ruiz, por todo el apoyo brindado en los trámites realizados durante mi estancia en CENIDET y especialmente por su amistad.

A todos los doctores que me impartieron clases, ya que de ellos obtuve los conocimientos necesarios para realizar este tema de tesis.

A mis compañeros del CENIDET: Samuel, Alexis, Donaciano, Jesus, Jashiel, Diego y muchos más compañeros por su apoyo, gracias por hacer amena la estancia durante este periodo.

Agradezco a la comunidad del CENIDET por la amabilidad y atención brindada durante la estancia de maestría.

Resumen

En este trabajo de investigación se presenta el diseño y la simulación de un control tolerante a fallas (FTC) para un modelo reducido de una central termoeléctrica (CTE) con capacidad de generación de 300 MW de potencia eléctrica.

Para el funcionamiento del FTC se diseñó una ley de control la cual permite acomodar la falla automáticamente en los actuadores, mientras se mantienen las propiedades de rendimiento y estabilidad deseadas.

Para diseñar el esquema FTC se utilizó un modelo no lineal reducido de una CTE que presenta de forma general el comportamiento dinámico de la presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina, presión del domo, flujo de vapor en la mezcla agua-vapor y la potencia eléctrica generada, para un rango de cargas (altas, medias y bajas). El modelo no lineal reducido es utilizado con el propósito de diseños de sistemas de control y diagnóstico de fallas.

Una representación Takagi-Sugeno (T-S) del modelo no lineal reducido, se empleó para el diseño del esquema FTC con base en un observador proporcional integral (PIO) el cual brinda la estimación de estados y fallas. La ventaja de utilizar la representación T-S es la posibilidad de utilizar la teoría de sistemas lineales para el diseño de los observadores, considerando que el modelo no lineal reducido trabaja en diferentes puntos de operación.

Las condiciones de estabilidad del esquema FTC se dan utilizando una función cuadrática de Lyapunov en la forma de desigualdades matriciales lineales (LMI), que se pueden resolver utilizando herramientas previamente reportadas en la literatura.

Finalmente, el esquema FTC se evaluó en la plataforma de Matlab versión (R2017b), en la cual se elaboraron diferentes escenarios de fallas.

Abstract

This research work presents the design and evaluation of a fault tolerant control (FTC) for a simplified model of a thermoelectric power station (CTE) with the capacity to generate 300 MW of electrical power.

For the operation of the FTC it is necessary to design a control law which allows us to automatically accommodate the failure in the actuators, while maintaining the desired performance and stability properties.

In order to design the FTC scheme, a simplified non-linear model of a CTE was adapted, which represents the dynamic behavior of the superheated steam pressure entering the turbine, dome pressure, steam flow in the water-steam mixture and the electrical power generated, for a range of loads (high, medium and low). The simplified nonlinear model is used for the purpose of fault diagnosis and control system designs.

A T-S representation, from the simplified nonlinear model, was used for the design of the FTC scheme based on an integral proportional observer (PIO) which provides the estimation of states and failures. The advantage of using the T-S representation is the possibility of widely using the theory of linear systems for the design of the observers, considering that the simplified nonlinear model works at different points of operation.

The stability conditions are given using the Lyapunov quadratic function in the form of linear matrix inequalities (LMI), which can be solved using previously reported tools.

Finally, the FTC scheme was evaluated on the Matlab platform, in which different evaluation scenarios were developed.

Índice general

Índice general	VII
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XIII
Nomenclatura	XIV
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Estudio del estado del arte	4
1.4.1 Estado del arte de sistemas de detección y localización de fallas (FDI)	4
1.4.2 Estado del arte de sistemas de control tolerante a fallas (FTC)	5
1.5 Alcances	6
1.6 Aportaciones	7
1.7 Originalidad	7
1.8 Organización del documento	7
1.9 Conclusiones del capítulo	8
2 Marco Teórico	9
2.1 Funcionamiento general de una central termoeléctrica	9
2.2 Proceso de generación de vapor	10

2.2.1	Sistemas de control	12
2.2.2	Modelo matemático reducido de una CTE aplicado a esquemas de control . .	13
2.2.3	Antecedentes del modelo matemático reducido de una CTE	16
2.3	Conceptos básicos sobre fallas.	19
2.3.1	Sistema de detección y localización de fallas	20
2.3.2	Sistema control tolerante a fallas	21
2.4	Sistemas difusos Takagi-Sugeno	23
2.4.1	Sector lineal	23
2.4.2	Sector no lineal	24
2.4.3	Propiedades de los sistemas T-S	24
2.5	Observadores	25
2.5.1	Tipos de observadores	26
2.6	Conclusiones del capítulo	27
3	Caso de estudio	28
3.1	Modelo no lineal reducido de la central termoeléctrica	28
3.2	Modelo Takagi-Sugeno	35
3.2.1	Obtención del modelo T-S	35
3.2.2	Validación del modelo T-S	40
3.3	Monitoreo de variables	43
3.3.1	Observador PO	43
3.3.2	Resultados del PO	48
3.4	Conclusiones del capítulo	51
4	Diseño del esquema control tolerante a fallas	52
4.1	Diseño del FTC	52
4.1.1	Análisis de la dinámica de estimación	55
4.1.2	Análisis de estabilidad y convergencia	57
4.2	Evaluación del esquema control tolerante a fallas	61
4.2.1	Primer escenario falla: Falla abrupta en u_1	62
4.2.2	Segundo escenario de falla: Falla abrupta en u_2	66
4.2.3	Tercer escenario de falla: Falla incipiente en u_1	69

4.2.4	Cuarto escenario de falla: Falla incipiente en u_2	73
4.2.5	Quinto escenario de falla: Fallas simultaneas tipo abruptas en u_1 y u_2	76
4.3	Conclusiones del capítulo	81
5	Conclusiones generales	82
5.1	Trabajos futuros	83
	Anexos	84
A	Ajustes de parámetros de simulación Matlab solver.	84
A.1	Métodos de Paso Variable (Variable-step Solvers)	84
A.2	Configuración solver del programa	86
B	Prueba con perturbación.	88
B.1	Perturbación en la variable de salida f_{vM}	88
	Bibliografía	94

Índice de figuras

2.1	Diagrama esquemático de una central termoelectrica.	12
2.2	Diagrama del esquema de control maestro de combustible.	12
2.3	Diagrama del modelo reducido con efecto de presión de generación de vapor.	14
2.4	Dinámica de la potencia de la turbina incluyendo los efectos de la presión en la caldera.	14
2.5	Modelo de bajo orden para una caldera de tambor de vapor.	15
2.6	Modelo matemático de una planta unitaria.	15
2.7	Diagrama conceptual de una Central Termoelectrica.	17
2.8	Secciones del sistema donde se presentan fallas.	19
2.9	Clasificación de los esquemas FTC.	21
2.10	Esquema control tolerante a fallas pasivo (PFTC).	22
2.11	Esquema control tolerante a fallas activo (AFTC).	23
2.12	Diagrama esquemático de un observador.	25
3.1	Diagrama a bloques del modelo no lineal reducido.	32
3.2	Apertura de la válvula de vapor principal.	32
3.3	Flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	33
3.4	Presión del domo.	33
3.5	Presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina.	34
3.6	Potencia eléctrica.	34
3.7	Apertura de la válvula de combustible.	35
3.8	Dinámica de la no linealidad z_1	36
3.9	Dinámica de la no linealidad z_2	36
3.10	Representación de un sistema en el que se consideran dos parámetros variables.	37

3.11	Dinámica de las funciones de pertenencia.	38
3.12	f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	41
3.13	P_D Presión del domo.	41
3.14	P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	42
3.15	P_o potencia eléctrica.	42
3.16	Comparación de la variable f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	49
3.17	Comparación de la variable P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	49
3.18	Comparación de la variable P_o potencia eléctrica.	50
3.19	Estimación de la variable P_D presión del domo.	50
4.1	Diagrama de bloques de un esquema FTC basado en observador	53
4.2	Diagrama esquemático de un FTC basado en observador	55
4.3	Diagrama de bloques de un FTC basado en observador	61
4.4	Escenario 1: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	63
4.5	Escenario 1: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	63
4.6	Escenario 1: P_o potencia eléctrica.	64
4.7	Escenario 1: P_D presión del domo	64
4.8	Escenario 1: Magnitud de la falla en el actuador y su estimación	65
4.9	Escenario 1: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.	65
4.10	Escenario 2: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	66
4.11	Escenario 2: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	67
4.12	Escenario 2: P_o potencia eléctrica.	67
4.13	Escenario 2: P_D presión del domo	68
4.14	Escenario 2: Falla en el actuador y su estimación	68
4.15	Escenario 2: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.	69
4.16	Escenario 3: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	70
4.17	Escenario 3: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	70
4.18	Escenario 3: P_o potencia eléctrica.	71
4.19	Escenario 3: P_D presión del domo	71
4.20	Escenario 3: Falla en el actuador y su estimación	72

4.21	Escenario 3: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.	72
4.22	Escenario 4: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	73
4.23	Escenario 4: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	74
4.24	Escenario 4: P_o potencia eléctrica.	74
4.25	Escenario 4: P_D presión en el domo	75
4.26	Escenario 4: Falla en el actuador y su estimación	75
4.27	Escenario 4: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.	76
4.28	Escenario 5: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	77
4.29	Escenario 5: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.	77
4.30	Escenario 5: P_o potencia eléctrica.	78
4.31	Escenario 5: P_D presión en el domo	78
4.32	Escenario 5: Falla en el actuador u_1 y su estimación.	79
4.33	Escenario 5: Falla en el actuador u_2 y su estimación.	79
4.34	Escenario 5: Entrada u_1 del modelo de referencia y la ley FTC otorgada.	80
4.35	Escenario 5: Entrada u_2 del modelo de referencia y la ley FTC otorgada.	80
A.2.1	86
A.2.2	87
B.1.1	Esquema FTC ante perturbaciones	88
B.1.2	Perturbación	89
B.1.3	Anexo: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.	89
B.1.4	Anexo: P_T Presión de vapor en la entrada de la turbina.	90
B.1.5	Anexo: P_o potencia eléctrica.	90
B.1.6	Anexo: P_D presión en el domo.	91
B.1.7	Anexo: Falla en el actuador u_1 y su estimación.	91
B.1.8	Anexo: Falla en el actuador u_2 y su estimación.	92
B.1.9	Anexo: Entrada u_1 del modelo de referencia y ley FTC	92
B.1.10	Anexo: Entrada u_2 del modelo de referencia y ley FTC	93

Índice de tablas

Tabla 3.1	Puntos de operación en lazo cerrado.	29
Tabla 3.2	Ganancias del controlador PI.	29
Tabla 3.3	Nomenclatura del modelo.	30
Tabla 3.4	Valores máximos y mínimos	36
Tabla 4.1	Escenarios de fallas en actuadores u_1 y u_2	62

Nomenclatura y acrónimos

Conjuntos

\mathbb{R} Conjunto de todos los números reales.

Matrices y Vectores

$A > 0$ Matriz definida positiva.
 $A < 0$ Matriz definida negativa.
 I Matriz identidad de dimensiones apropiadas.
 0 Matriz con elementos cero de dimensiones apropiadas.
 I_n Matriz identidad de dimensión $n \times n$.
 A^{-1} Inversa de una matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\det(A) \neq 0$.
 A^T Traspuesta de una matriz A .
 $\lambda(A)$ Conjunto de todos los eigenvalores de la matriz A .
 $\text{rango}(A)$ Rango de la matriz $A \in \mathbb{R}^{n \times m}$.

Acrónimos

CTE	Central Termoeléctrica.
FDI	Detección y Localización de Fallas.
FTC	Control Tolerante a Fallas.
AFTC	Control Tolerante a Fallas Activo.
PFTC	Control Tolerante a Fallas Pasivo.
T-S	Takagi-Sugeno.
LMI	Desigualdad Matricial Lineal.
PI	Proporcional Integral.
PIO	Observador Proporcional Integral.
IFAC	Federación Internacional de Control Automático.
UIO	Observador Politópico de Entradas Desconocidas.
PO	Observador Proporcional.
LPV	Lineal de parámetros variables.
PPIO	Observador Proporcional Integral Politópico.

Capítulo 1

Introducción

Dentro de la industria de la generación de energía eléctrica, las centrales termoeléctricas (CTE) representan un porcentaje considerable del parque energético. Estas centrales son procesos con dinámicas no lineales cuya operación debe realizarse de forma segura y estable. Una central termoeléctrica es un sistema empleado para la generación de energía eléctrica mediante la liberación de energía térmica producida por la quema de combustibles fósiles.

El funcionamiento consiste en tres fases: la quema de combustible, el accionamiento de turbinas y el accionamiento del generador eléctrico. La CTE está compuesta por una infraestructura que abarca el depósito de combustible, las calderas, el mecanismo de refrigeración, las turbinas, generadores y sistemas de transmisión eléctrica.

Para garantizar la seguridad del proceso es necesario implementar sistemas de protección, con la finalidad de realizar paros de emergencia en el sistema, con el propósito de reducir problemas en la infraestructura y evitar accidentes que afecten al recurso humano. Es por ello, que las CTE requieren de una mayor supervisión para detectar y localizar fallas, dada la gran cantidad de equipos y componentes que contienen. El objetivo de detectar y localizar fallas de manera oportuna es tomar acciones preventivas que permitan conservar una operación segura y confiable, reduciendo las pérdidas económicas por paros de emergencia y mantener un buen desempeño en el proceso.

Con el aumento de la complejidad en las CTE, las fallas en los componentes se presentan de manera frecuente mostrando un comportamiento exponencial, lo que causa el deterioro del sistema

y la inestabilidad. De acuerdo con lo anterior, es conveniente diseñar métodos de control capaces de garantizar un rendimiento nominal cuando se presenta una falla. A estos controladores se les conoce como control tolerante a fallas (FTC), los cuales están diseñados para continuar su funcionamiento cuando algún componente del sistema falla, esto significa que el sistema, dada una falla de componentes no se detiene. Es por ello que, uno de los esquemas FTC más utilizados dentro de la industria son los FTC activos, los cuales generan una ley de control que compense ciertas fallas y así mantener las propiedades deseables de rendimiento y estabilidad.

En este trabajo de tesis se presenta el diseño de un sistema FTC para los actuadores de flujo de combustible y de vapor de una CTE. Para este propósito, se emplea un modelo reducido de una CTE no lineal de 300 MW de la unidad de turbina de caldera de tambor propuesto por Madrigal-Espinosa et~al. (2017) el cual se representa una estructura Takagi-Sugeno (T-S) utilizando el enfoque de sector no lineal (Zsofia~Lendek, 2010). Los resultados obtenidos muestran que el esquema FTC puede ser implementado a una CTE de manera confiable.

1.1. Planteamiento del problema

En general, los procesos industriales de dinámica compleja están sujetos a cambios ambientales, condiciones de mal funcionamiento y perturbaciones desconocidas, por lo tanto, requieren de una mayor supervisión para la detección y localización de fallas (FDI), dada la gran cantidad de equipos y componentes que contienen (Mogens~Blanke., 2006). El objetivo del esquema FDI es tomar acciones preventivas que permitan conservar una operación segura y confiable, reduciendo las pérdidas económicas por paros de emergencia y mantener un buen desempeño de los sistemas de control.

Dentro de la industria de energía eléctrica, las CTE representan un porcentaje considerable dentro del grupo de generación de energía. Las centrales, son procesos con dinámicas no lineales cuya operación debe realizarse de forma segura y confiable. Las fallas presentadas en componentes y equipos dentro de estos procesos pueden causar eventos catastróficos por las altas presiones y temperaturas que se manejan. Dicho esto, es conveniente diseñar métodos de control capaces de garantizar un rendimiento nominal cuando se presenta una falla. A estos controladores se les conoce como control tolerante a fallas (Mahmoud, 2003).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar una ley de control que compense fallas en actuadores de la válvula de combustible y de la válvula de vapor principal de una central termoeléctrica controlando la variable de presión en la entrada de la turbina (P_T) por medio del la válvula de flujo de combustible.

1.2.2. Objetivos específicos

- Obtener una representación Takagi-Sugeno del modelo de una central termoeléctrica.
- Diseñar un observador capaz de estimar fallas en los actuadores de la válvula de combustible y de la válvula de vapor principal, así mismo estimar variables de estado utilizando el enfoque T-S.
- Diseñar una ley de control que permita mantener estable al sistema aún en presencia de fallas en los actuadores de la válvula de combustible y de la válvula de vapor principal.
- Plantear escenarios de prueba del esquema de FTC en actuadores de la válvula de combustible y de la válvula de vapor principal.

1.3. Justificación

La importancia del diagnóstico oportuno de fallas en las unidades termoeléctricas es una valiosa herramienta en la operación, en el entendido de que toda falla lleva un costo asociado que se incrementa a medida que la falla evoluciona y no es atendida. En sentido opuesto, una falla detectada y atendida con oportunidad, tendrá un costo mínimo.

Dentro de la CTE las fallas presentadas en equipos y componentes 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, lo que conlleva pérdidas económicas, los costos por el paro total de la planta se encuentran 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. Dicho lo anterior, es necesario implementar equipos de control, los cuales tendrán el objetivo de hacer

que el sistema sea tolerante a fallas. Los sistemas FTC tienen la capacidad de reaccionar ante la existencia de fallas, ajustando sus valores con los de la planta defectuosa.

1.4. Estudio del estado del arte

1.4.1. Estado del arte de sistemas de detección y localización de fallas (FDI)

Cuando no se tiene la información de todas las variables de estado, un observador resulta una herramienta útil ya que estima las variables no medibles. En Busawon and Kabore (2001) realizan el diseño de un observador proporcional integral (PIO) para sistemas lineales, el cual permite reducir el ruido en la medición. Los autores demuestran que un observador proporcional integral puede lograr una convergencia cuando hay ruido de sensor en el sistema, pero cuando se presenta error de modelado y ruido de sensor es factible la elaboración de un observador proporcional integral el cual permite erradicar las incertidumbres de modelado mientras se mantiene una convergencia satisfactoria.

Por otro lado, se encuentra Hamdi et~al. (2009) quienes presentan el diseño de un observador politópico con entradas desconocidas (UIO), dicho observador es aplicado en sistemas descriptivos con parámetros variantes. El observador UIO es capaz de estimar los estados del sistema a pesar de entradas desconocidas. El enfoque se aplica en la detección, aislamiento y estimación de fallas en actuadores. En Rios-Bolivar and Rivas (2014) consideran los sistemas lineales de parámetros variantes (LPV) para la elaboración de un observador proporcional integral robusto, el método se basa en considerar una dinámica extendida del PIO, para transformar las matrices dinámicas a ganancias de retroalimentación estática de la salida.

Años más adelante se encuentra Wu et~al. (2016) donde plantea la solución a la problemática de detección de fallas en sensores utilizando el enfoque Takagi-Sugeno con variables premisas no medibles. La solución que ellos plantean es el diseño un observador para la detección de fallas donde las variables premisas no medibles son estimadas simultáneamente. Los residuos generados por el observador se consideran robustos a perturbaciones y sensibles a fallas. Madrigal-Espinosa et~al. (2017) realizó el diseño y la evaluación de un sistema de diagnóstico de fallas para el generador de

vapor de una central termoeléctrica. El sistema realiza la función de detección y localización de fallas en sensores mediante un banco de observadores tipo Luenberger. El sistema de diagnóstico es aplicado en el sistema de control de caldera en seguimiento y al sistema de control maestro de combustible en la caldera.

Por otro lado, se encuentra Youssef et al. (2017) donde presentan la implementación de un método para la detección de fallas en actuadores en el cual se diseña un PIO basado en modelos Takagi-Sugeno con variables premisas no medibles. Para lograr las condiciones de diseño para la estimación simultánea de estados y fallas utilizan la teoría de Lyapunov lo cual permite obtener las ganancias del observador. Por su parte, en Rabaoui et al. (2017) presentan la problemática de la detección y estimación de fallas en los sistemas LPV descritos por la representación politópica. Proponen un PIO politópico el cual está diseñado para detectar fallas mediante la generación de residuos y estimar los estados del sistema y las fallas aplicadas en el sistema. En Xie et al. (2017) plantean el diseño de un observador robusto para la estimación de fallas para sistemas difusos en tiempo discreto por medio de funciones de Lyapunov que dependen de parámetros polinomiales.

1.4.2. Estado del arte de sistemas de control tolerante a fallas (FTC)

Los sistemas tecnológicos modernos se basan en sofisticados sistemas de control para satisfacer los estándares de rendimiento. La confiabilidad y el rendimiento de dichos sistemas se puede mantener asegurando que no ocurran fallas en los componentes del sistema. Por lo tanto, es necesario diseñar sistemas de control que permitan tolerar fallas en los sistemas para mejorar la confiabilidad y rendimiento. Así lo demuestra Jiang and Yu (2012) quienes estudian las diferencias, ventajas y limitaciones del control tolerante a fallas activo y pasivo. Por otro lado, Amin and Hasan (2019) presentan una recopilación de los avances y aplicaciones de los sistemas de control tolerante a fallas, ellos se encargan de clasificar algunas técnicas de diseño de los enfoques activos y pasivos.

Con base en la literatura, podemos mencionar que los esquemas FTC son ampliamente utilizados, tal y como lo muestran Bacon et al. (2001) quienes presentan el diseño de una ley de control reconfigurable para aeronaves, las cuales han presentado fallas en los actuadores. El enfoque FTC utiliza la retroalimentación de la aceleración para extraer información relativa a cualquier cambio aerodinámico. Posteriormente Ichalal et al. (2010) presentan una estrategia de control tolerante

a fallas utilizando un PIO para compensar fallas en actuadores de un sistema no lineal el cual es representado por modelos difusos T-S. En Wang and Wang (2011) realiza el diseño de dos enfoques de control tolerante a fallas aplicado a vehículos eléctricos de cuatro ruedas con conducción independiente. El esquema de control tolerante a fallas pasivo (PFTC) está diseñado para garantizar la estabilidad del sistema del vehículo y para rastrear el movimiento deseado del vehículo cuando ocurre una falla en el motor, mientras que el esquema de control tolerante a fallas activo (AFTC) se emplea para aislar y evaluar explícitamente la falla presentada en las ruedas del vehículo.

Más tarde Hamed-Badihi (2014) presenta un esquema FTC aplicado a turbinas eólicas modernas. El esquema AFTC explota la información de fallas de un esquema de FDI basado en modelos desarrollados mediante métodos difusos. Para la evaluación del esquema propuesto, se seleccionan un punto de referencia de turbinas eólicas en alta mar en presencia de turbulencias eólicas, ruidos de medición y diferentes escenarios de fallas realistas. En Kazemi et al. (2016) presentan un esquema FTC para minimizar los efectos nocivos que producen las fallas en el actuador de una central termoeléctrica.

Posteriormente se encuentra Pérez-Estrada (2019) quien diseña una estrategia de control tolerante a fallas para sistemas LPV politópicos, el cual mantiene al sistema en un rendimiento deseado aún con presencia de fallas en actuadores. Por otra parte, Youssfi et al. (2019) presenta una estrategia de control tolerante a fallas aplicado a la dinámica lateral de un vehículo el cual se encuentra descrito por sistemas difusos T-S. El esquema FTC presentado permite preservar la estabilidad del vehículo incluso en presencia de estas fallas en actuadores.

1.5. Alcances

- Obtener un modelo T-S de la central termoeléctrica, el cual me permite utilizar técnicas de diseño de sistemas lineales.
- Realizar el diseño de un observador proporcional integral utilizando el enfoque T-S, el cual me permita estimar estados y fallas simultáneamente.
- Realizar el diseño de una ley de control que permita mantener al sistema estable aún con presencia de fallas.

1.6. Aportaciones

- La obtención de un modelo difuso T-S del modelo reducido de una CTE mediante la técnica del sector no lineal.
- Diseño de un observador proporcional integral por medio del enfoque Takagi-Sugeno, que estima simultáneamente estados y fallas del sistema. El observador PIO se basa en la estructura de un observador tipo Luenberger con términos aditivos.
- Diseño de una ley de control FTC que considere la señal del controlador maestro de combustible y las fallas estimadas provenientes del observador.
- Diseño del esquema FTC el cual utiliza un modelo de referencia controlado y libre de fallas, las variables de salida del modelo de referencia se comparan con las variables estimadas del observador. El enfoque FTC permite que las variables de salida no reflejen el efecto de las fallas.

1.7. Originalidad

En este trabajo se presenta un esquema de control tolerante a fallas el cual permite que el sistema mantenga un buen desempeño ante presencia de fallas. El diseño del FTC se basó en una representación Takagi-Sugeno del modelo no lineal reducido de una central termoeléctrica.

La ley de control del esquema FTC se diseñó con base en un observador proporcional integral por medio del enfoque T-S. Para realizar el acomodo de fallas en los actuadores, la ley de control FTC considera la comparación de las variables del modelo de referencia con las del observador, así como la resta de estimación de fallas.

1.8. Organización del documento

En el **Capítulo 2** se presentan los conceptos teóricos los cuales sirven de apoyo para el desarrollo del trabajo de tesis. Donde se describe el desarrollo matemático de un modelo reducido aplicado a esquemas de control de una CTE, que émula el comportamiento de las variables críticas del sistema. Se describen los sistemas Takagi-Sugeno los cuales se obtienen a partir de un sistema

no lineal. Asimismo, se da la descripción de los conceptos fundamentales sobre fallas, controles tolerantes a fallas y observadores.

En el **Capítulo 3** se presenta el modelo no lineal reducido de una CTE aplicado a esquemas de control y la parametrización del mismo en diferentes puntos de demanda de carga eléctrica. Asimismo, se muestra la representación T-S, así como los resultados de la evaluación del modelo T-S contra el modelo no lineal reducido de una CTE. También se muestra el desarrollo de un observador politópico para el monitoreo de las variables de estado del modelo reducido.

En el **Capítulo 4** se realiza el diseño y análisis del esquema control tolerante a fallas con base en un observador proporcional para la estimación simultánea de estados y fallas en actuador del sistema.

En el **Capítulo 5** se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de desempeño del esquema FTC. Para las pruebas de evaluación se consideran diferentes escenarios; con fallas tipo abruptas o fallas tipo incipientes.

En el **Capítulo 5** se presentan las conclusiones del trabajo de tesis y los trabajos futuros que se pueden realizar a partir de esta investigación.

1.9. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se describen de manera detallada los objetivos, planteamiento del problema, alcances y aportaciones del tema de tesis. En el estado del arte se presentan algunos de los trabajos más importantes reportados en la literatura.

Capítulo 2

Marco Teórico

El presente capítulo está dedicado a la descripción de diferentes conceptos y definiciones para una mejor comprensión sobre el tema de tesis.

En la sección 2.1 se describe el funcionamiento general de una central termoeléctrica y la cronología del modelo no lineal reducido de una central termoeléctrica.

En la sección 2.2 se describen algunos conceptos de fallas y cómo atacarlos. En la sección 2.3 se aborda la representación de los sistemas Takagi-Sugeno y algunas propiedades de los mismos.

En la sección 2.4 se presentan definiciones de observadores, así como algunos tipos de observadores reportados en la literatura.

2.1. Funcionamiento general de una central termoeléctrica

En la actualidad las CTE han tenido una gran participación en el proceso de la generación de energía eléctrica. La capacidad que tienen las CTE de controlar sus cargas aporta una fuerte contribución a la estabilidad de la red eléctrica y así mismo suministrar la electricidad que se le demande sin interrumpir el suministro de corriente (Madrigal-Espinosa et al., 2017).

Una CTE se encuentra formada por varios elementos que posibilitan la transformación de los combustibles fósiles en energía eléctrica, dentro de estos elementos se encuentran las calderas, los serpentines, las turbinas de vapor y el generador.

- Caldera: Espacio donde el agua se transforma en vapor mediante a la quema de combustible. En este proceso la energía química se transforma en térmica.
- Serpentes: Conjunto de tubos por donde circula el agua que se transforma en vapor. En ellos se produce el intercambio de calor entre los gases de la combustión y el agua.
- Turbina de vapor: Máquina que recolecta el vapor de agua, el cual consigue mover el eje que atraviesa a la turbina. La turbina cuenta con un complejo sistema de presión el cual permite aprovechar al máximo el vapor de agua.
- Generador: Máquina encargada de recolectar la energía mecánica generada en el eje de la turbina, la cual es transformada en energía eléctrica mediante el proceso de inducción electromagnética.

2.2. Proceso de generación de vapor

En una unidad generación de energía eléctrica es necesario mantener siempre el balance energético; es decir, la relación entre la energía de entrada al proceso (energía térmica contenida en el combustible) debe ser igual a la energía de salida del mismo. En el proceso de generación de vapor de una CTE se realizan utilizando tres clases de circuitos principales, los cuales son:

1. Circuito de combustión:

El hogar o caldera donde se quema la mezcla aire-combustible se encuentra constituido por un recinto cerrado con paredes de mampostería, en las cuales se encuentran los canales de circulación del aire necesario para la combustión. Después de calentar la caldera donde, tiene lugar la vaporización del agua, los gases residuales de la combustión o humos pasan a un conducto para ser eliminados al exterior. Como estos gases aún están calientes, puede aprovecharse la energía térmica en ellos contenida para el circuito primario de uno o varios recalentadores de vapor. A partir de este punto, los gases pasan por la chimenea de tiro forzado, para ser llevados al exterior.

2. Circuito de agua-vapor:

La vaporización del agua se realiza en la caldera, la cual es un depósito de agua que se calienta hasta convertir el agua en vapor. El vapor que se encuentra a la salida de la caldera contiene

partículas líquidas de agua, por tal motivo es necesario recalentar el vapor haciéndolo pasar por varios circuitos de recalentadores primarios.

Posteriormente, el vapor a presión y a alta temperatura que sale del recalentador, es llevado a la turbina donde se expansiona produciendo energía mecánica. En las turbinas se realizan extracciones de vapor, conduciéndolo de nuevo hacia los recalentadores secundarios de la caldera, donde el vapor sufre nuevos recalentamientos para ser posteriormente introducido en los siguientes cuerpos de las turbinas o en otras turbinas independientes.

El vapor que se encuentra a la salida de turbina se hace pasar por un condensador que no es más que un dispositivo de refrigeración donde el vapor se condensa y se transforma nuevamente en agua; la condensación se realiza introduciendo agua fría a presión en el condensador, a la que se obliga a circular por unos serpentines de refrigeración.

El agua resultante de la condensación, y procedente de la turbina se impulsa hacia la caldera por medio de bombas de alimentación. Para aumentar el rendimiento térmico del conjunto, es conveniente que el agua de alimentación entre en la caldera ya caliente, por lo que se hace pasar previamente por los circuitos secundarios de los precalentadores.

3. Circuito de energía eléctrica:

La energía eléctrica es producida en los generadores eléctricos, accionados por las turbinas de vapor. Desde los generadores la corriente eléctrica se lleva a transformadores apropiados, donde se eleva la tensión de la energía producida. Los transformadores pueden alojarse en locales especiales o, en el mismo pabellón de distribución, los cuales se encuentran separados de la sala de máquinas.

Las centrales térmicas de vapor necesitan, generalmente, un consumo bastante elevado de energía; lo más conveniente es tomar esta energía de un pabellón de distribución especial ya que la tensión para las necesidades propias de la central es distinta a la tensión de distribución.

El funcionamiento de una CTE inicia con la quema de combustible en la caldera provocando energía

térmica la cual es utilizada para calentar el agua, que a su vez se transforma en vapor a una presión muy elevada. Posteriormente, ese vapor hace girar una turbina, convirtiendo la energía calorífica en energía mecánica la cual se transforma en energía eléctrica en el alternador. La electricidad pasa por un transformador que aumenta su tensión y permite transportarla reduciendo las pérdidas energéticas, en la Figura (2.1) se muestra un diagrama esquemático del funcionamiento de una CTE.

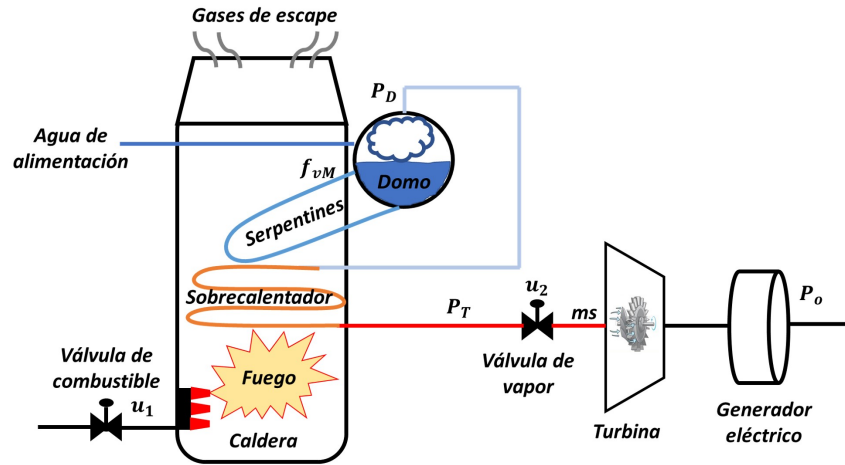


Fig. 2.1. Diagrama esquemático de una central termoeléctrica.

2.2.1. Sistemas de control

Para ayudar a mantener el equilibrio energético de la planta, los sistemas de control deben regular las entradas de materia y energía para lograr una salida en las condiciones deseadas. Las variaciones por la demanda de carga de energía eléctrica es uno de los grandes factores que afectan al balance energético de la central, por tal motivo estos factores deben ser regulados por el esquema de control maestro de combustible, como se muestra en la Figura (2.2).

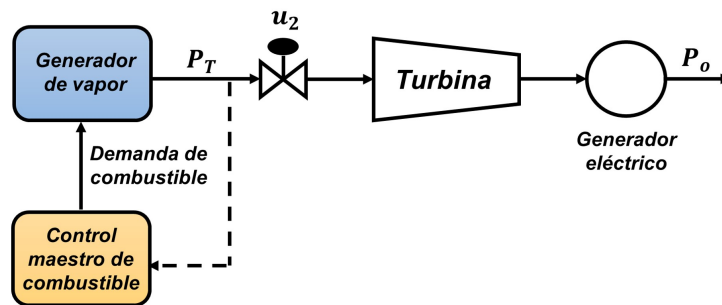


Fig. 2.2. Diagrama del esquema de control maestro de combustible.

Para satisfacer la demanda de energía eléctrica, se debe regular la apertura de la válvula de flujo de vapor (u_2), dicha válvula proporciona el vapor necesario para mantener una velocidad constante en la turbina. La variación de la válvula (u_2) afecta drásticamente a la presión de vapor principal (P_T). Mediante la medición de P_T , el sistema de control maestro de combustible se encarga de generar la señal de control del generador de vapor el cual adiciona o disminuye el combustible a los quemadores.

2.2.2. Modelo matemático reducido de una CTE aplicado a esquemas de control

El modelo matemático no lineal reducido que representa el proceso de generación de vapor y energía eléctrica de la central termoeléctrica, toma como base las leyes de conservación de materia y energía que rigen el comportamiento dinámico del proceso en un rango amplio de operación. Madrigal-Espinosa et al. (2017) presenta el modelo no lineal reducido integrado por los resultados de los trabajos reportados en Cheres (1990), de Mello (1991) y Zhongxu-Han (2005).

Para el desarrollo del modelo reducido de Mello (1991) consideró el balance de masa, volumen y energía del sistema considerando las siguientes suposiciones:

1. El agua de alimentación en entalpía y la velocidad de flujo se mezclan con agua saturada del tambor, la mezcla fluye por el tubo a una velocidad de recirculación constante. En las calderas de circulación natural la flotabilidad contra las características de caída de fricción también tienden a mantener una recirculación constante.
2. El calor absorbido por el fluido en las paredes de agua se distribuye uniformemente, es decir, en forma proporcional a la longitud o al volumen.
3. Se supone que las velocidades de vapor y agua son iguales.

En las Figuras (2.3) y (2.4) se presenta el diagrama a bloques de los resultados del estudio de balance de materia y energía. Del análisis de las figuras se encuentran las ecuaciones; presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina (P_T), presión del domo (P_D) y flujo de vapor principal (m_s).

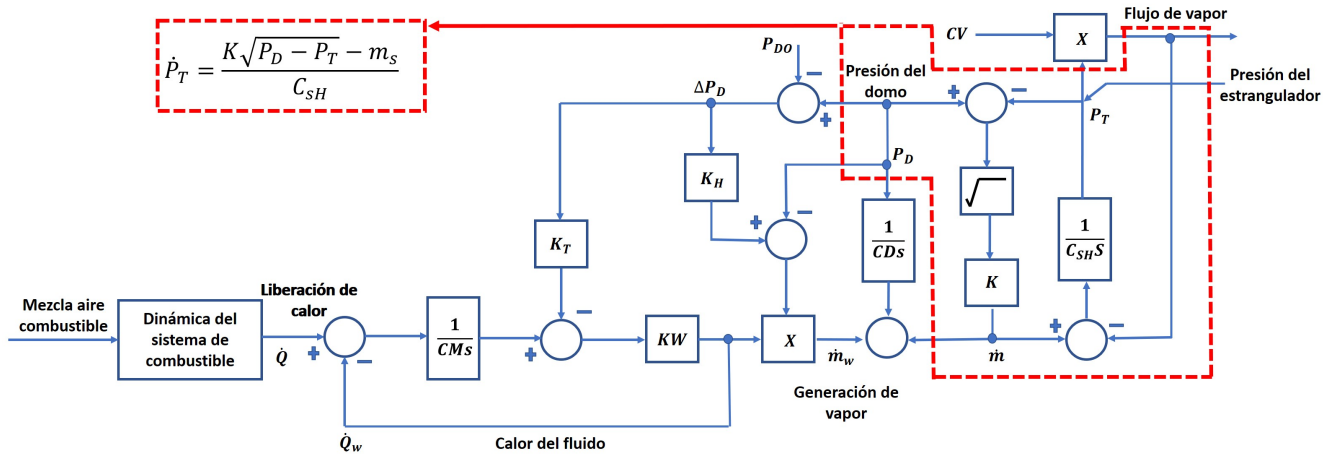


Fig. 2.3. Diagrama del modelo reducido con efecto de presión de generación de vapor.

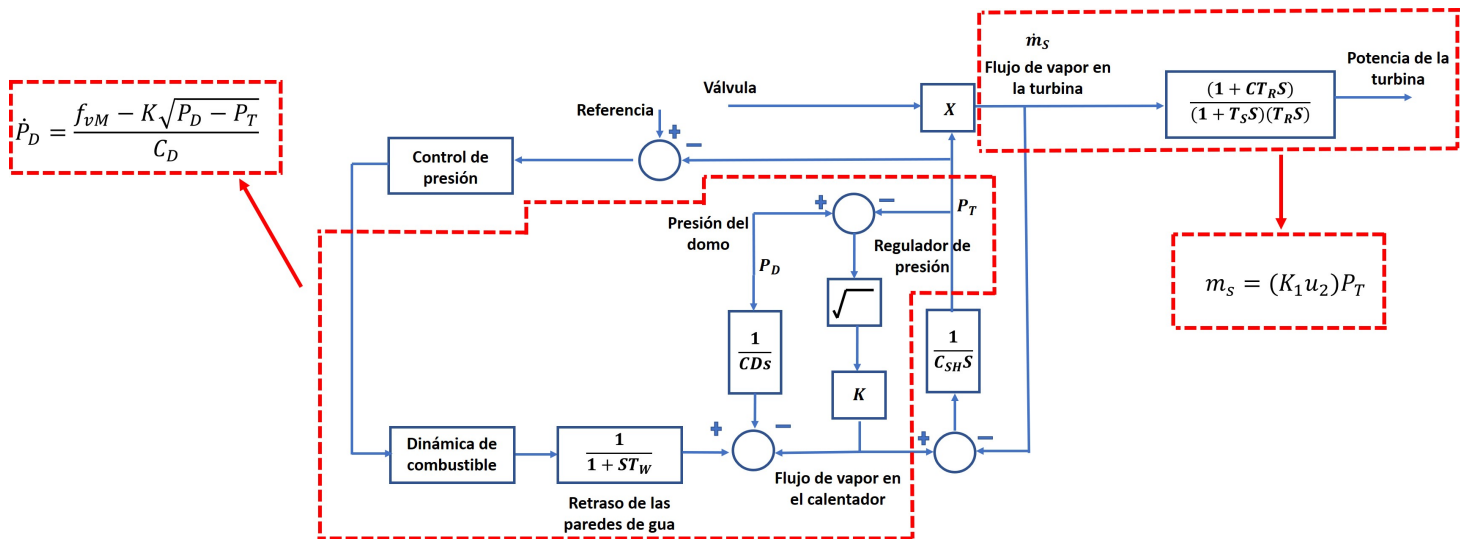


Fig. 2.4. Dinámica de la potencia de la turbina incluyendo los efectos de la presión en la caldera.

Con base en el esquema de las Figuras (2.3) y (2.4) Cheres (1990) presenta la importancia del controlador proporcional integral (PI) en el flujo de combustible de una caldera de bajo orden para obtener una respuesta adecuada en MW. Del análisis de la Figura (2.6) se encuentra la ecuación flujo de vapor en la mezcla agua-vapor (f_{vM}).

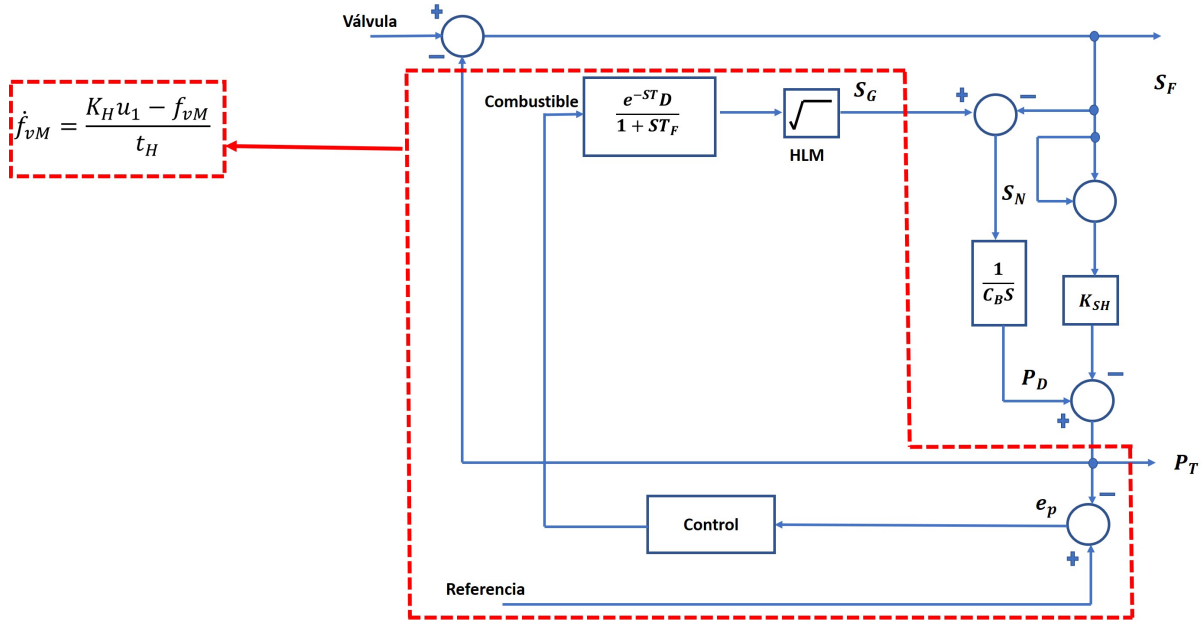


Fig. 2.5. Modelo de bajo orden para una caldera de tambor de vapor.

Zhongxu~Han (2005) presenta el modelo de una planta unitaria agregando un segmento de la turbina y del generador, para obtener la ecuación de potencia eléctrica (P_o)

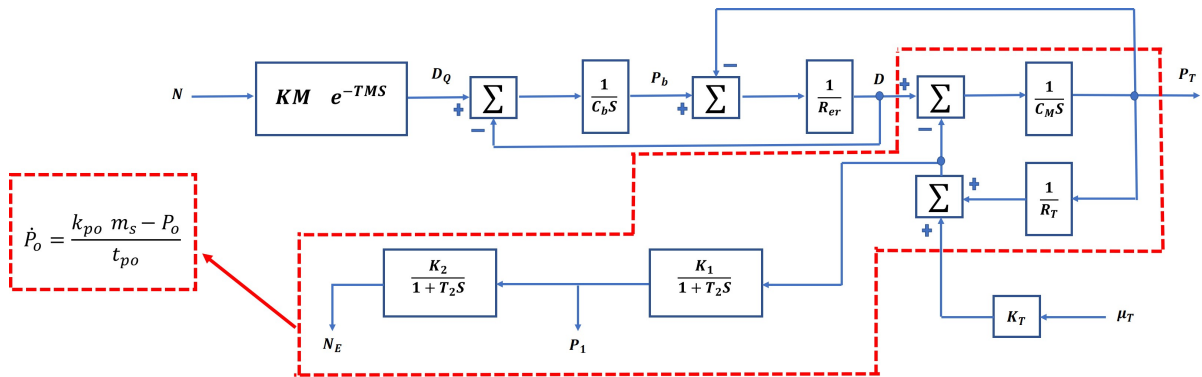


Fig. 2.6. Modelo matemático de una planta unitaria.

2.2.3. Antecedentes del modelo matemático reducido de una CTE

Una central termoeléctrica es un sistema que transforma la energía química que contiene el combustible en energía eléctrica. Cuando el combustible fósil es quemado produce calor transfiriendo esta energía, para lograr un cambio de fase en el agua generando vapor a alta presión, este transfiere energía mecánica a una turbina que hace girar un generador eléctrico con lo que se genera o produce electricidad. Sin embargo, la dinámica completa de una central termoeléctrica es muy compleja y difícil de modelar por lo que se buscan modelos reducidos que puedan capturar la dinámica esencial, especialmente el efecto de acoplamiento entre la electricidad generada y el aceleramiento de presión.

Cheres (1990), de-Mello (1991) y Zhongxu-Han (2005) desarrollaron sus modelos principalmente mediante análisis de mecanismos que consisten en ecuaciones diferenciales y ecuaciones algebraicas. Otros investigadores han desarrollado trabajos utilizando los modelos matemáticos de los tres investigadores anteriormente mencionados, tal es el caso de Grobbelaar and MacLeod (1999) quien toma como base el modelo de de-Mello (1991) el cual es un modelo no lineal de orden bajo con recirculación forzada, su investigación se basa en la comparación del modelo con mediciones de una planta física, el cual da resultados favorables ante los cambios en el caudal de agua de alimentación.

Por otro lado, tenemos a Sun et-al. (2016) quien trabaja con un modelo matemático para la investigación de balance energético directo (DEB), por simplicidad el sistema es dividido en tres módulos donde uno de esos módulos es representado por las ecuaciones de de-Mello (1991), la precisión del modelo es confirmada utilizando datos reales de una Central Termoeléctrica de 300 MW, los resultados obtenidos del control son suficientes para cumplir con los objetivos fundamentales de una central termoeléctrica. Otro modelo utilizado es Cheres (1990) dicho modelo lo utilizó Daren and Zhiqiang (2005), donde analizan la viabilidad de aplicar controladores no lineales a la variable de presión de vapor sobrecalentado en la salida de la turbina, ellos desarrollan un controlador coordinado no lineal el cual es evaluado ante simulaciones, las cuales arrojan resultados donde es posible lograr un mejor desempeño y así mismo obtener una regulación más estricta en la presión de vapor.

Así mismo en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) el investigador Madrigal-Espinosa et-al. (2017) presenta el modelo no lineal reducido integrado por los resultados de los trabajos reportados en Cheres (1990), de-Mello (1991) y Zhongxu-Han (2005).

Donde él parametriza el modelo no lineal con datos obtenidos de la Unidad No. 4, localizada en la ciudad de Delicias, Chihuahua, él diseña un sistema de diagnóstico y detección de fallas con sensores virtuales el cual fue aplicado en los lazos del control de generador de vapor. En la Figura (2.7) se presenta un esquema de una central termoeléctrica donde menciona la ubicación de cada una de las variables del modelo.

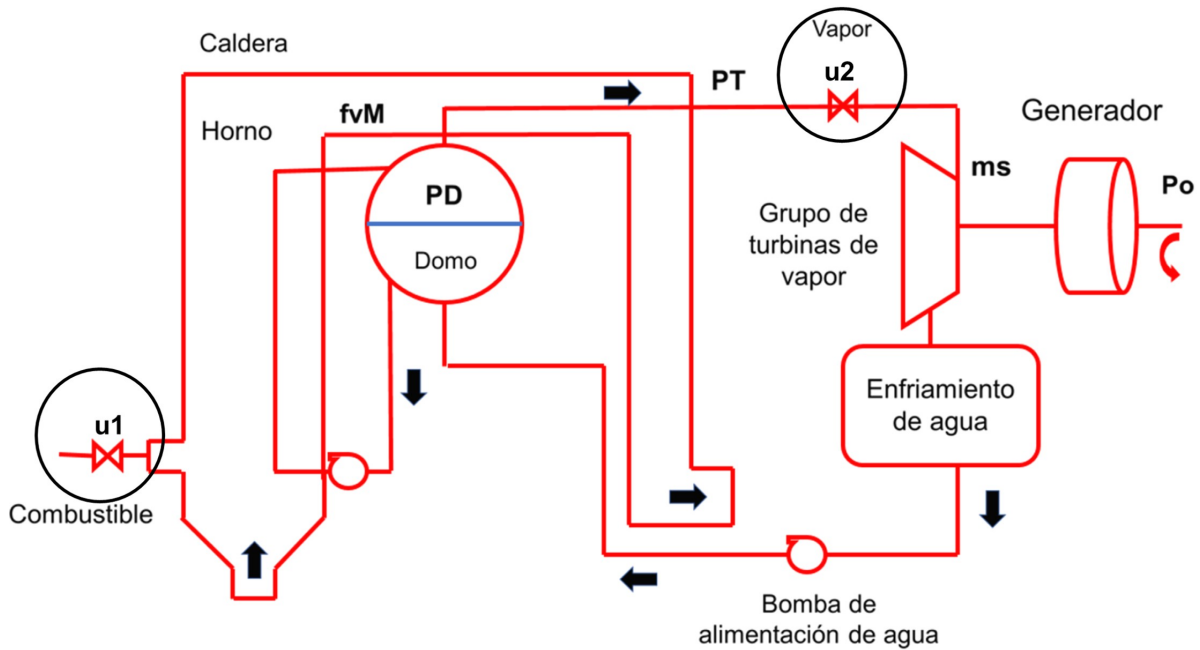


Fig. 2.7. Diagrama conceptual de una Central Termoeléctrica.

Falla en actuadores de una central termoeléctrica

Los actuadores son de gran importancia en los procesos industriales, ya que son dispositivos que se encarga de regular en mayor o menor cantidad la materia que entra o sale del proceso. El fallo en estos dispositivos puede provocar diferentes tipos de accidentes, como, por ejemplo: escapes de líquidos o gases causados por un una falla en el empaque, por la ruptura o por el bloqueo de la válvula; se pueden presentar reacciones no controladas o explosiones, si el cierre de la válvula es defectuoso permite el paso de fluidos a un equipo determinado de la instalación, cuando no es debido. Dicho lo anterior, las centrales termoeléctricas se encuentran susceptibles a fallas en actuadores. Las principales fallas que se presentan en los actuadores de una central son:

- Goteo del asiento del actuador: Se presenta cuando el actuador no se encuentra correctamente asentado, esto sucede cuando en el asiento se encuentran impurezas lo que provoca erosión en el actuador. Por tal motivo la válvula debe ser reemplazada.
- Residuos o suciedad: Se presenta cuando cualquier material extraño que logre pasar por el filtro de entrada queda alojado entre el actuador y el asentamiento de la válvula, impidiendo que cierre adecuadamente.
- Juego en la recámara del actuador: Los chorros de gas caliente pueden generar carbonizaciones considerables en el área de la recámara del actuador. Esto provoca que el actuador se mueva con dificultad por lo que se produce un sobrecalentamiento.
- Exceso de presión: Se presenta cuando válvula se encuentra atascada en posición de cierre. Esto produce un aumento de presión en el sistema de tuberías, produciendo la deformación del filtro, lo cual provoca que el empaque deje de ser hermético.
- Vibración: La alta vibración presenta un riesgo para las válvulas de control. Puede ocasionar fatiga o ruptura de las piezas, desgaste excesivo de los componentes, daño a los accesorios y pérdida de desempeño durante y después de la vibración.

Diagnóstico de fallas en centrales termoeléctricas

Es muy frecuente que en las CTE se presenten perturbaciones inesperadas en el proceso, esto implica que el operador se encuentre con la incertidumbre de la causa o el origen del problema. Además, el operador cuenta con poco tiempo para responder adecuadamente ante la falla. De aquí la importancia del desarrollo de técnicas de detección y localización de fallas. Dentro de las diferentes técnicas de FDI para CTE reportadas en la literatura se encuentra;

- Redes neuronales.

Tal es el caso de Nemecio Tlalolini~Ramos (2007) quien presenta un esquema FDI aplicado a un generador de vapor de una CTE mediante redes neuronales. El sistema FDI consta de dos componentes, donde el primer componente consiste en la generación de residuos mediante la diferencia que existe entre las mediciones actuales de la planta y las estimaciones que se obtienen con un predictor neuronal. El segundo componente consiste en un módulo difuso que se utiliza

para evaluar los residuos y realizar el diagnóstico de la falla correspondiente. Años más adelante se encuentra Dhini et~al. (2017) quien presenta un esquema FDI basado en redes neuronales, las cuales se utilizaron para el monitoreo de una CTE del gobierno de Indonesia.

- Enfoques estadísticos.

En Basseville (1998) quien describe los principios clave para la aplicación de de un sistema FDI mediante el enfoque local o enfoque estadístico aplicado a un modelo de una CTE.

- Observadores.

En la técnica de observadores, se puede mencionar a Reyes-Martínez (2016) quien presenta el diseño y la simulación de un sistema FDI aplicado a los sensores del generador de vapor de una CTE. El sistema FDI propuesto se encuentra basado en un banco de observadores no lineales. En Madrigal-Espinosa et~al. (2018) se realizó el diseño y la evaluación de un sistema de diagnóstico de fallas para el generador de vapor de una central termoeléctrica. El sistema realiza la función de detección y localización de fallas en sensores mediante un banco de observadores tipo Luenberger.

2.3. Conceptos básicos sobre fallas.

Con el rápido desarrollo de la tecnología, los sistemas modernos se han vuelto cada vez más complejos, costosos y propensos a fallas severas, lo que resulta en mayor demanda de seguridad y confiabilidad (Mogens~Blanke., 2006). Las secciones del sistema propensas a fallas se muestran en la Figura (2.8).

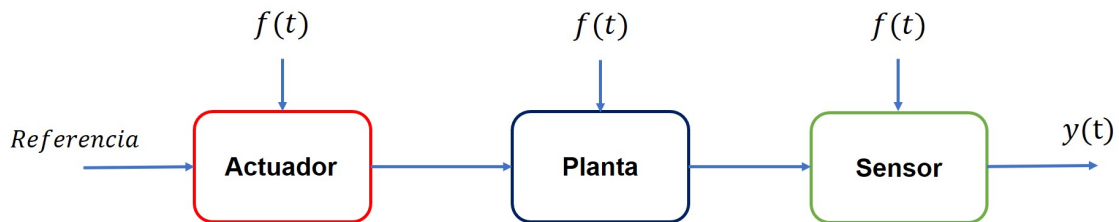


Fig. 2.8. Secciones del sistema donde se presentan fallas.

Las fallas son aquellos elementos que deben detectarse y cuyos efectos deben eliminarse. De acuerdo con Rodarte (2013) menciona que el comité de Federación Internacional de Control Automático (IFAC) ha establecido los siguientes conceptos:

- **Falla:** Una falla es algo que cambia el desempeño de un sistema, tal que el sistema ya no satisface el propósito para el cual fue diseñado. Por lo tanto, una falla en un solo componente puede cambiar el rendimiento del sistema en general.
- **Avería:** Una avería es una interrupción permanente de la capacidad de un sistema para realizar una función requerida en condiciones operativas específicas.
- **Mal funcionamiento:** Un mal funcionamiento es una irregularidad intermitente en el cumplimiento de una función deseada en el sistema.

Tipos de fallas

El comité técnico del IFAC se dio a la tarea de realizar una clasificación de fallas basada en patrones aprendidos. En Mogens-Blanke. (2006) se presenta la siguiente clasificación:

- **Falla abrupta:** La falla se manifiesta con un cambio repentino y puede ser modelada mediante una función tipo escalón donde se desconoce el tiempo de ocurrencia y desaparece también de la misma forma.
- **Falla incipiente:** Se manifiesta con un cambio de magnitud en las variables del sistema que va aumentando paulatinamente con respecto al tiempo y puede modelarse mediante una función tipo rampa con un tiempo de ocurrencia desconocido.
- **Falla intermitente:** Este tipo de fallas se considera que no tiene una evolución determinada en el tiempo y frecuentemente solo se presenta en ciclos de trabajo de manera aleatoria y desaparece también de la misma forma.

2.3.1. Sistema de detección y localización de fallas

La tarea de detección de fallas simplemente consiste en tomar una decisión binaria: es decir que algo está bien o mal. Para que un sistema de detección y localización de fallas sea factible la presencia de fallas debe ser conocida antes de que se vuelvan averías. Madrigal-Espinosa et~al.

(2017) menciona que un sistema FDI se emplea para detectar y localizar fallas de manera oportuna, cuando el sistema opera todavía en una región controlable, a fin de evitar la ocurrencia de eventos anormales en la operación del proceso, que pudieran derivar en consecuencias severas o catastróficas para el operador.

Los sistemas de diagnóstico de fallas no sólo son importantes desde un punto de vista de seguridad, sino también desde el punto de vista de la confiabilidad del proceso, ya que es utilizado para monitorear el desempeño de un proceso real.

2.3.2. Sistema control tolerante a fallas

Hoy en día, los sistemas modernos se vuelven cada vez más complejos, costosos y propensos a fallas severas, lo que resulta en mayor demanda de seguridad y confiabilidad. Dicho esto, las estrategias de control tolerante a fallas son consideradas las áreas de control más eficientes para enfrentar estos problemas en los sistemas. Los esquemas FTC son clasificados en dos categorías: activos y pasivos como se muestra en la Figura (2.9).

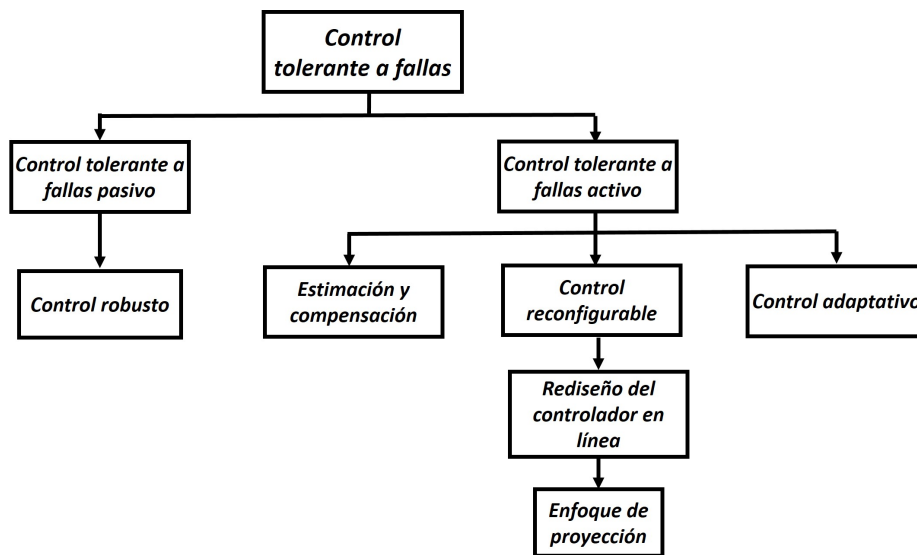


Fig. 2.9. Clasificación de los esquemas FTC.

Control tolerante a fallas pasivo (PFTC)

Este enfoque puede tolerar un solo número limitado de fallas, las cuales se conocen antes del diseño del controlador PFTC. El PFTC presentado en la Figura (2.10) posee la capacidad de compensar fallas anticipadamente sin tener acceso a la información de la falla en línea. Las características principales de un PFTC son las siguientes:

- Robustez mediante la anticipación de fallas.
- Utiliza redundancia de hardware, múltiples actuadores y sensores.

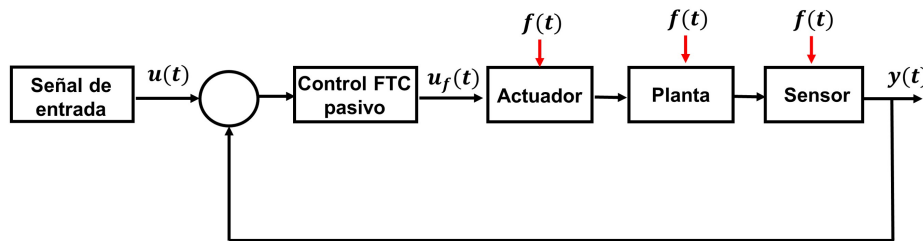


Fig. 2.10. Esquema control tolerante a fallas pasivo (PFTC).

Control tolerante a fallas activo (AFTC)

Este enfoque cuenta con la capacidad de compensar los efectos de las fallas, por medio de una ley de control la cual se mantiene con una reconfiguración en línea, tal y como se muestra en la Figura (2.11). El enfoque AFTC necesita un algoritmo FDI para detectar e identificar los cambios inducidos por las fallas, y así mismo reconfigurar la ley de control en línea para mantener las propiedades de rendimiento y estabilidad deseadas. Las características principales de un AFTC son las siguientes:

- Emplea redundancia analítica.
- Utiliza un algoritmo FDI y un controlador configurable.
- Presenta rendimiento degradado en presencia de una falla

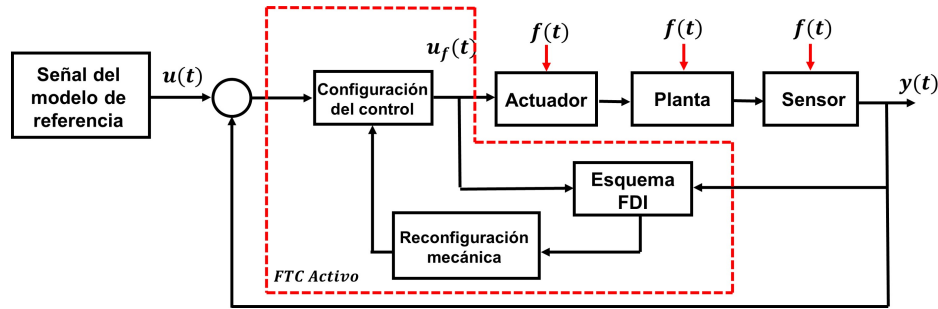


Fig. 2.11. Esquema control tolerante a fallas activo (AFTC).

2.4. Sistemas difusos Takagi-Sugeno

El sistema Takagi-Sugeno es una aproximación de un sistema no lineal en donde solo se puede mantener un comportamiento similar dentro de la vecindad de un punto de equilibrio.

Existen dos métodos que se emplean para construir una representación difusa o una aproximación de un sistema no lineal. Uno de estos métodos es el enfoque de no linealidad, dicho método es empleado para obtener un modelo Takagi-Sugeno el cual maneja un comportamiento exacto al de un sistema no lineal. Otro método de aproximación a un sistema no lineal es la linealización dinámica el cual se basa en una expansión de las series de Taylor en diferentes puntos de operación. La forma general de un modelo T-S es:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde M es el número de modelos locales, A_i , B_i y C son matrices conocidas de dimensiones apropiadas, $z(t)$ es el vector de variables premisas, $\mu_i(z(t))$ se conoce como la función de pertenencia normalizada, es decir $1 \geq \mu_i(z(t)) \geq 0$ y $\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) = 1$

2.4.1. Sector lineal

Uno de los métodos para obtener una aproximación a un sistema no lineal es la linealización dinámica el cual se basa en una expansión de las series de Taylor en diferentes puntos de operación. Este método cuenta con la ventaja de conservar propiedades del sistema no lineal en los puntos

en el cual se linealiza. Esto quiere decir que, si el sistema no lineal es observable en un rango de operación del punto de linealización, entonces el modelo local correspondiente es observable. La desventaja que puede presentar el método es determinar la cantidad de puntos de linealización que se deben tomar para obtener una aproximación precisa, esto implica un costo computacional elevado.

2.4.2. Sector no lineal

El método de sector no lineal es utilizado para la construcción de modelos difusos T-S, se puede obtener una representación exacta de un sistema no lineal expresado de una manera compacta en espacio de estados.

El modelo T-S construido mediante el método de sector no lineal tiene la ventaja de ser una representación exacta del sistema no lineal. El enfoque tiene dos inconvenientes importantes: la primera deficiencia se encuentra en los modelos lineales obtenidos ya que no garantiza que los modelos sean observables o estables. La segunda deficiencia es sobre el número de reglas o número de modelos locales, el modelo T-S es obtenido exponencialmente por el número de no linealidades que contenga el sistema no lineal. Esto quiere decir que, a mayor número de modelos locales conlleva a problemas de diseño por lo tanto requiere un mayor costo computacional.

2.4.3. Propiedades de los sistemas T-S

Controlabilidad de sistemas T-S

Se dice que el sistema descrito mediante la ecuación (2.1) es de estados controlables en $t = t_0$, solo si es posible construir una señal de control sin restricciones, la cual permita trasladar un estado inicial a cualquier estado final en un intervalo de tiempo finito. Si todos los estados son controlables, se puede decir que el sistema es completamente controlable. Para conocer si el sistema es completamente controlable se plantea la siguiente condición (2.2).

$$\text{rango} \begin{bmatrix} B & A_i B & \dots & A_i^{n-1} B \end{bmatrix} = n, \quad \forall i = 1, \dots, M \quad (2.2)$$

la cual se conoce comúnmente como la matriz de controlabilidad (Ogata, 2010).

Análisis de observabilidad de sistemas T-S

La observabilidad es una propiedad que determina la capacidad de estimar los estados del sistema a través de las mediciones de salida y entrada (Ogata, 2010). La matriz de observabilidad para el sistema (2.1) está dada por la siguiente condición

$$\text{rango} \begin{bmatrix} C \\ CA_i \\ CA_i^2 \\ \vdots \\ CA_i^{n-1} \end{bmatrix} = n, \quad \forall i = 1, \dots, M \tag{2.3}$$

2.5. Observadores

Cuando no se tiene la información de todos los estados, una herramienta factible es construir un observador que estime las variables no medibles. La estimación de este tipo de variables se define como observación. Un dispositivo o programa que estima u observa las variables de estado se llama observador de estados o simplemente observador.

De acuerdo con Mantz (2003) un observador de estados es un sistema dinámico cuyos estados convergen a los del sistema observado. En la Figura (2.12) se muestra un esquema de un observador en donde se aprecia que las señales medidas pasan por una etapa de procesamiento y un algoritmo de estimación para lograr obtener las variables de estado estimadas (Zetina-Rios, 2019).

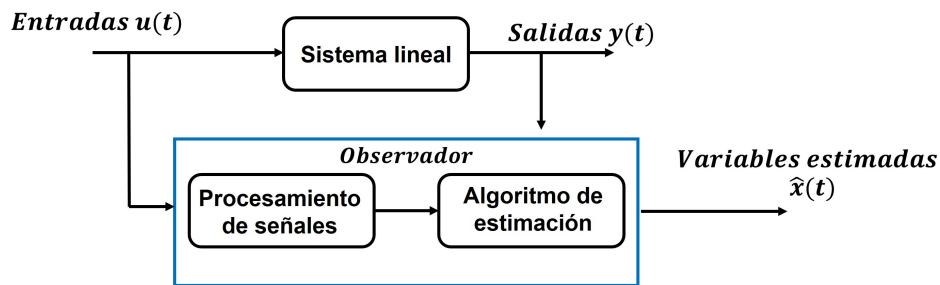


Fig. 2.12. Diagrama esquemático de un observador.

En la literatura existen diversos trabajos en los cuales se han implementado el uso de observadores para conocer las variables de estado internas (conocidas y no conocidas), tal es el caso de Quintero-

Marmol (1991) donde presenta el uso de los observadores para predecir la composición por lotes de múltiples componentes, mediante mediciones de temperatura. Posteriormente Dochain et~al. (1992) presenta la estimación en línea de las concentraciones de reactivo y producto en reactores de tanque agitado. En donde se desarrolla un observador asintótico con bases en el observador tipo Luenberger.

En Aguilar et~al. (1997) propone una estrategia para estimar el calor de las reacciones exotérmicas dentro de un reactor de tanque agitado con dos reacciones exotérmicas consecutivas y oscilatorias. Años más adelante Coutinho and Pereira (2005) presenta el diseño de un observador tipo Luenberger para la estimación de estados de una máquina de inducción, la cual se encuentra sujeta a variaciones de resistencia del rotor y perturbaciones de carga. El observador se encuentra diseñado para minimizar estos efectos en el rendimiento de la estimación de estado, donde se garantiza la estabilidad de la dinámica de error. Por otro lado, Celani (2006) presenta un observador estilo Luenberger para brazos manipuladores con medición de posición. El observador propuesto es diseñado para la estimación de estados de velocidades limitadas.

Hu et~al. (2010) presenta una técnica adaptativa basada en observadores para estimar el estado de carga de un paquete de baterías de iones de litio utilizadas en un vehículo eléctrico. Los resultados de dicha técnica muestran que el observador puede estimar con precisión el estado de carga de las baterías. En Damon et~al. (2019) presentan una validación para el simulador de una motocicleta comercial, utilizando un observador tipo Luenberger, el cual se encarga de estimar simultáneamente la dinámica lateral de la motocicleta y la acción del conductor. Cabe mencionar que el movimiento lateral del vehículo se describe con un modelo lineal de dos cuerpos que tiene en cuenta la velocidad longitudinal que varía con el tiempo.

2.5.1. Tipos de observadores

Una forma de clasificar los observadores es por su orden. De esta manera se puede considerar una clasificación de observadores en tres tipos:

- Orden completo:

El observador de orden completo cuenta con la característica de captar todas las variables del sistema, sin importar si alguna está disponible para una medición directa.

- Orden reducido:

En este tipo de observador se estima menos de n variables de estado, en donde n es la dimensión del vector de estados.

- Orden mínimo:

Es un observador de orden reducido con el mínimo orden posible, es decir, si n es la dimensión del vector de estado y m es la dimensión del vector de salidas, el observador de orden mínimo observa $n - m$ variables.

2.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se muestran algunos de los conceptos básicos de fallas, características y representaciones de las mismas, también se presentan algunas de las técnicas aplicadas a esquemas de control para detectar, localizar y compensar fallas en el sistema, dicha información se describe con el fin de que el lector pueda obtener una mejor comprensión del tema. También se muestran algunos elementos y componentes que conforman las centrales termoeléctricas. Asimismo, se presenta la cronología del modelo no lineal reducido de una central termoeléctrica con el cual se trabaja a lo largo de este tema de tesis. También se muestran conceptos básicos sobre observadores, así como, sus aplicaciones en el ramo de la industria.

Capítulo 3

Caso de estudio

En este capítulo se presenta el modelo matemático no lineal reducido de una central termoeléctrica, con el cual se trabajará a lo largo de este tema de tesis. También se muestra una representación en espacio de estados del modelo no lineal simplificado para el diseño de un sistema Takagi-Sugeno.

En la sección 3.1 se presenta el modelo no lineal reducido de una CTE con el cual se trabajará, su nomenclatura y las pruebas de evaluación en distintos puntos de carga.

En la sección 3.2 se presenta el diseño de un sistema Takagi-Sugeno el cual se obtiene del modelo no lineal reducido, también, se presenta la validación con el modelo no lineal reducido.

3.1. Modelo no lineal reducido de la central termoeléctrica

El modelo matemático no lineal reducido que representa el proceso de generación de vapor y energía eléctrica de la central termoeléctrica, toma como base las leyes de conservación de materia y energía que rigen el comportamiento dinámico del proceso en un rango amplio de operación. En Madrigal-Espinosa et al. (2017) se presenta el modelo no lineal reducido integrado por los resultados de los trabajos reportados en Cheres (1990), de Mello (1991) y Zhongxu-Han (2005).

El modelo matemático representa las características dinámicas no lineales de las variables críticas de presión, flujo y potencia eléctrica en diferentes puntos de carga. Se consideran cargas bajas en potencia de 150 MW, cargas medias en 225 MW y cargas altas en 300 MW. El modelo está integrado por cuatro variables de estado (f_{VM} , P_D , P_T y P_o), dos variables de entrada (u_1 y u_2)

y cuatro variables de salida (f_{VM} , P_D , P_T y P_o). Dependiendo de las condiciones operativas de la unidad y de los requerimientos en la demanda de carga eléctrica (bajas, medias o altas), estas variables se mantienen en distintos puntos de operación como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Puntos de operación en lazo cerrado.

Variable	Unidad	Cargas		
		Bajas	Medias	Altas
P_o	MW	150	225	300
P_T	Pa	14.2	14.2	14.2
P_D	Pa	14.8	15.6	16.6
f_{vM}	Kg/s	129	193.4	257.9
u_1	Fracción	0.25	0.37	0.5
u_2	Fracción	0.4	0.6	0.8

Para lograr cada cambio de carga es necesario contar con un controlador proporcional integral (PI) descrito por la ecuación (3.1), el cual se encarga de mantener constante la variable P_T . La finalidad del controlador es mantener la variable P_T menor que P_D para evitar una falla catastrófica en el sistema, falla que en el modelo matemático se manifiesta como una indeterminación o inestabilidad en los resultados. Los valores de las ganancias del controlador PI se obtuvieron a partir de la respuesta dinámica de la presión en la turbina P_T ante variaciones de distintos puntos de carga, y de cómo el flujo de vapor principal m_s afecta la dinámica de P_T . En la Tabla 3.2 se muestran los valores de las ganancias del controlador PI.

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt \tag{3.1}$$

Tabla 3.2. Ganancias del controlador PI.

Sistema de control de combustible	
Ganancia	Valor
Proporcional (K_P)	1.1
Integral (K_I)	0.005

Modelo matemático

El conjunto de ecuaciones que representan el modelo no lineal reducido de la CTE está integrado por cuatro ecuaciones diferenciales y una ecuación algebraica.

- Ecuaciones diferenciales

$$\dot{f}_{vM} = \frac{k_H u_1}{t_H} - \frac{f_{vM}}{t_H} \quad (3.2)$$

$$\dot{P}_D = \frac{f_{vM} - k\sqrt{P_D - P_T}}{C_D} \quad (3.3)$$

$$\dot{P}_T = \frac{k\sqrt{P_D - P_T} - m_s}{C_{SH}} \quad (3.4)$$

$$\dot{P}_o = \frac{k_{po} m_s - P_o}{t_{P_o}} \quad (3.5)$$

- Ecuación algebraica

$$m_s = (K_1 u_2) P_T \quad (3.6)$$

La nomenclatura de las variables y parámetros del modelo reducido no lineal se muestran en la Tabla (3.3).

Tabla 3.3. Nomenclatura del modelo.

Variable	Unidad	Valor	Descripción
f_{vM}	kg/s	257.89	Flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.
P_D	Pa	16.652×10^6	Presión del domo.
P_T	Pa	14.235×10^6	Presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina.
P_o	MW	300	Potencia eléctrica.
m_s	kg/s	257.89	Flujo de vapor principal.
u_1	% (0-1)	0.5	Apertura de la válvula de combustible.
u_2	% (0-1)	0.8	Apertura de la válvula de vapor principal.
t_{P_o}	s	10	Constante de tiempo de P_o .
t_H	s	10	Constante de tiempo de la energía calorífica en el hogar.
C_D	kg/Pa	2.806×10^{-3}	Constante que relaciona P_D con la masa de vapor en paredes de agua.
C_{SH}	kg/Pa	3.118×10^{-4}	Constante que relaciona la masa de vapor en el sobrecalentador con P_T .
k_{po}	(MW.s)/kg	1.163	Constante que relaciona P_o con m_s .
K_1	kg/(Pa.s)	2.264×10^{-5}	Constantes que relacionan u_2 y P_T , con m_s .
k_H	kg/s	515.78	Constante que relaciona f_{vM} con u_1 .

Representación matricial del modelo

Para obtener una representación matricial del sistema no lineal en variables de estado, las ecuaciones diferenciales (3.2-3.5) se expresan de la siguiente manera:

$$\dot{f}_{vM} = \frac{k_H u_1}{t_H} - \frac{f_{vM}}{t_H} \quad (3.7)$$

$$\dot{P}_D = \frac{f_{vM}}{C_D} - \frac{k P_D}{C_D \sqrt{P_D - P_T}} + \frac{k P_T}{C_D \sqrt{P_D - P_T}} \quad (3.8)$$

$$\dot{P}_T = \frac{k P_D}{C_{SH} \sqrt{P_D - P_T}} - \frac{k P_T}{C_{SH} \sqrt{P_D - P_T}} - \frac{K_1 u_2 P_T}{C_{SH}} \quad (3.9)$$

$$\dot{P}_o = \frac{k_{po} K_1 u_2 P_T}{t_{po}} - \frac{P_o}{t_{po}} \quad (3.10)$$

La representación matricial en variables de estado del modelo no lineal reducido está dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{vM} \\ \dot{P}_D \\ \dot{P}_T \\ \dot{P}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D \sqrt{P_D - P_T}} & \frac{k}{C_D \sqrt{P_D - P_T}} & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH} \sqrt{P_D - P_T}} & -\frac{k}{C_{SH} \sqrt{P_D - P_T}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{po}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_D \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{po}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1 P_T}{C_{SH}} \\ 0 & \frac{k_{po} K_1 P_T}{t_{po}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Las no linealidades del modelo o variables premisas se encuentran dadas por:

$$z_1(t) = \frac{1}{\sqrt{P_D - P_T}},$$

$$z_2(t) = P_T$$

Pruebas de evaluación del modelo no lineal reducido

El objetivo de esta simulación es mostrar el comportamiento de cada una de las variables de estado del modelo no lineal reducido en diferentes puntos de carga. En la Figura (3.1) se presenta un diagrama a bloques del modelo no lineal reducido, en donde se muestran las entradas y salidas del sistema, así como la variable controlada.

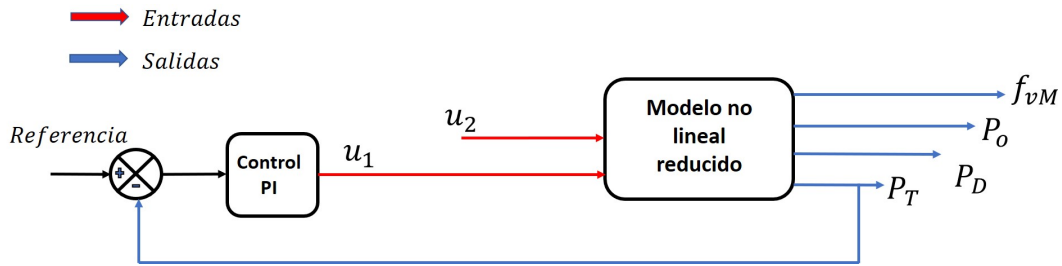


Fig. 3.1. Diagrama a bloques del modelo no lineal reducido.

Las simulaciones se llevaron a cabo en la plataforma Matlab/Simulink R2017b, con un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A), con el cual se realizaron las pruebas en los distintos puntos de carga que se muestran en la Tabla 3.1. La variable que se programa es la apertura de la válvula de vapor principal, como se muestra en la Figura (3.2), la cual inicia en la apertura máxima (0.8%), pasa hasta apertura media (0.6%) y desciende hasta apertura baja (0.4%); todo ello con una razón de cambio de 0.09%/s lo que equivale a 0.27 MW/s.

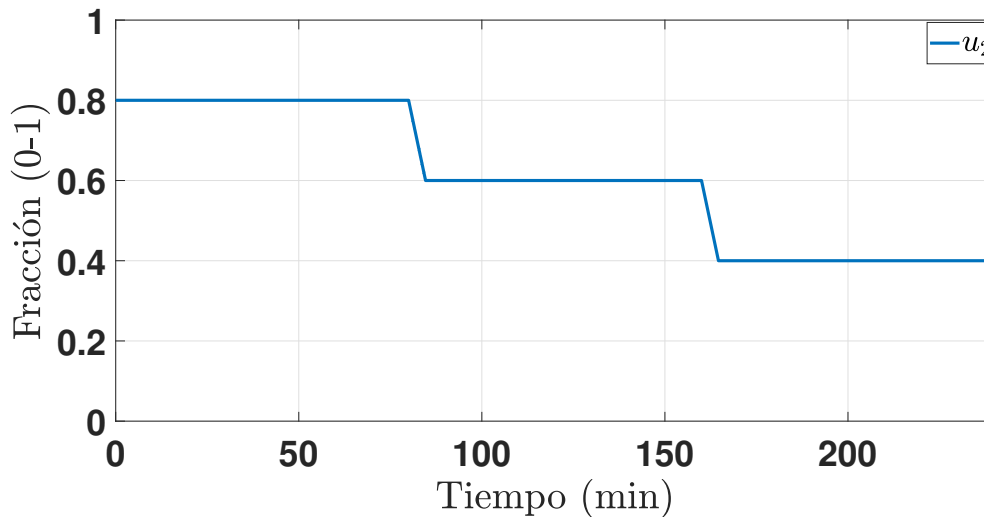


Fig. 3.2. Apertura de la válvula de vapor principal.

De acuerdo con la demanda de los diferentes intervalos de carga, la apertura de la válvula de vapor principal u_2 presentada en la Figura (3.2), tiene efecto ante las respuestas dinámicas de las variables de salida (f_{vM} , P_D , P_T y P_o) como se muestra en las Figuras (3.3 - 3.6) para los diferentes niveles de carga.

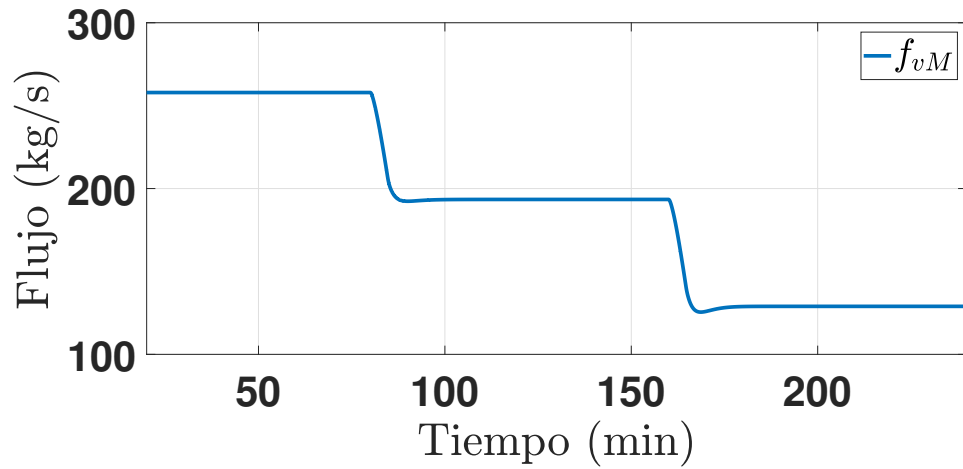


Fig. 3.3. Flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

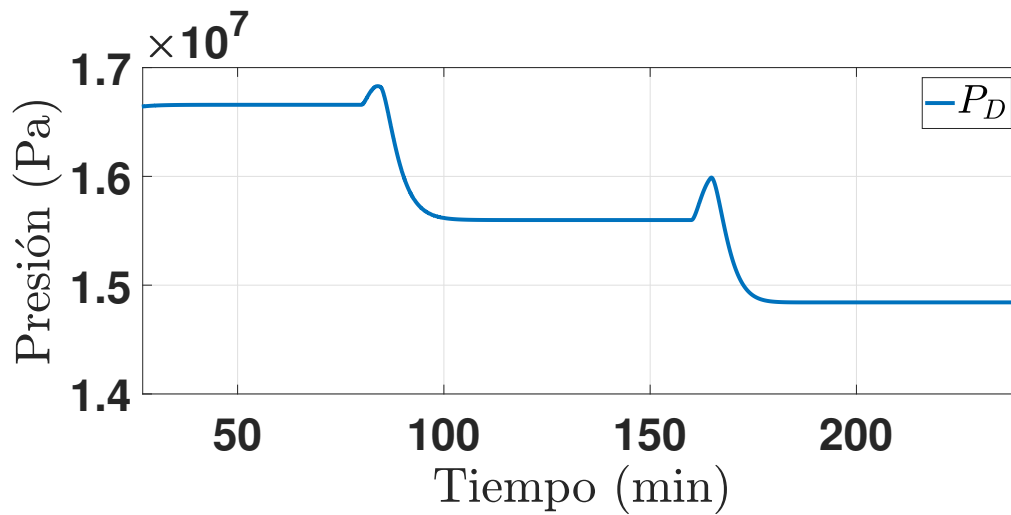


Fig. 3.4. Presión del domo.

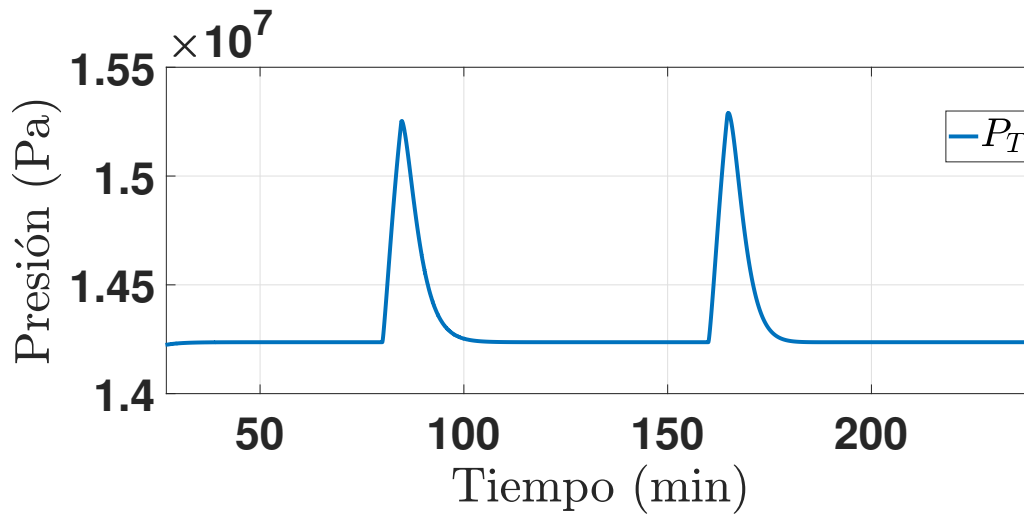


Fig. 3.5. Presión de vapor sobrecalentado que entra a la turbina.

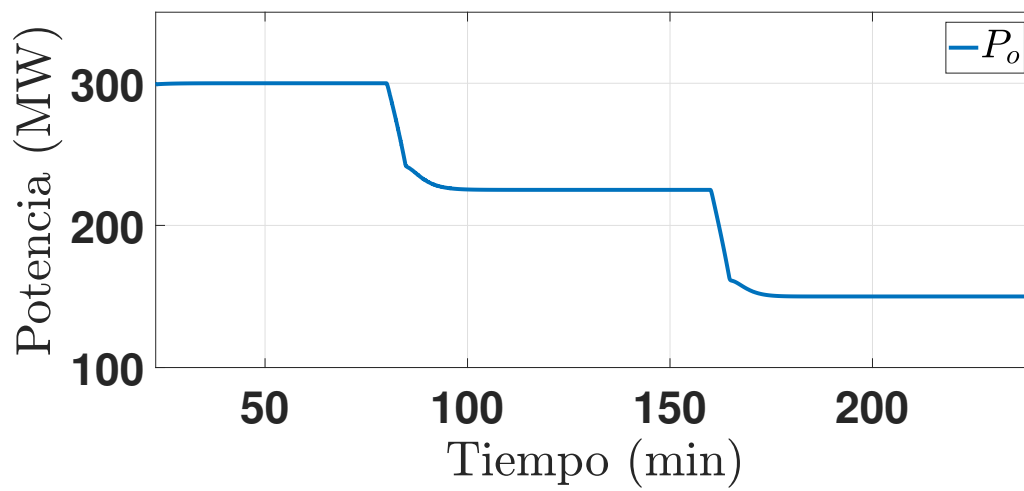


Fig. 3.6. Potencia eléctrica.

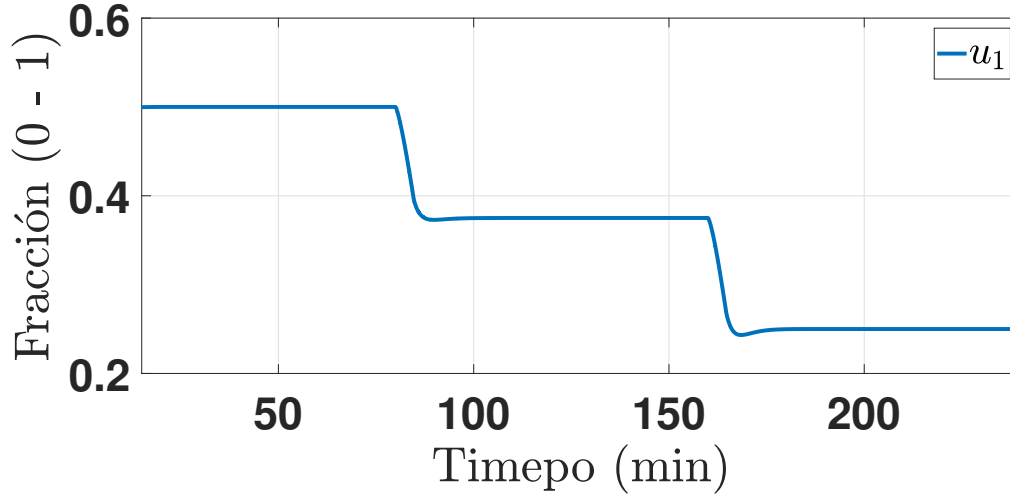


Fig. 3.7. Apertura de la válvula de combustible.

Podemos observar que en cada cambio de carga que realiza la CTE la variable P_T regresa a su punto de referencia ya que es una variable controlada por medio de la apertura de la válvula de flujo de combustible u_1 Figura (3.7).

3.2. Modelo Takagi-Sugeno

3.2.1. Obtención del modelo T-S

Un sistema T-S en su forma continua es representado de forma general como:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

con:

$$\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) = 1, \quad 1 \geq \mu_i(z(t)) \geq 0 \quad (3.13)$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas, $y(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de salida. Las matrices $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$ y $C \in \mathbb{R}^{n \times n}$ son matrices conocidas de dimensiones apropiadas. Los pares de matrices A_i, C son observables. M es el número de modelos locales lineales, siendo $M = 2^m$. $z(t) = [z_1(t) \ \dots \ z_k(t)]$ es el vector de $k = 1, \dots, m$ no linealidades o variables premisas, las cuales se encuentran acotadas dentro de los intervalos $[\bar{z}(t), \underline{z}(t)]$ de la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Valores máximos y mínimos

$z_k(t)$	\bar{z}_k	\underline{z}_k
z_1	1.2852×10^{-3}	6.4261×10^{-4}
z_2	1.5295×10^7	1.0140×10^7

donde $[\bar{z}(t), \underline{z}(t)]$ denotan los valores máximos y mínimos de la no linealidad. Los valores de la Tabla 3.4 son obtenidos al considerar las entradas u_1 de la Figura (3.2) y u_2 de la Figura (3.7) en las no linealidades de la ecuación (3.12). De forma gráfica se muestran en las Figuras (3.8) y (3.9).

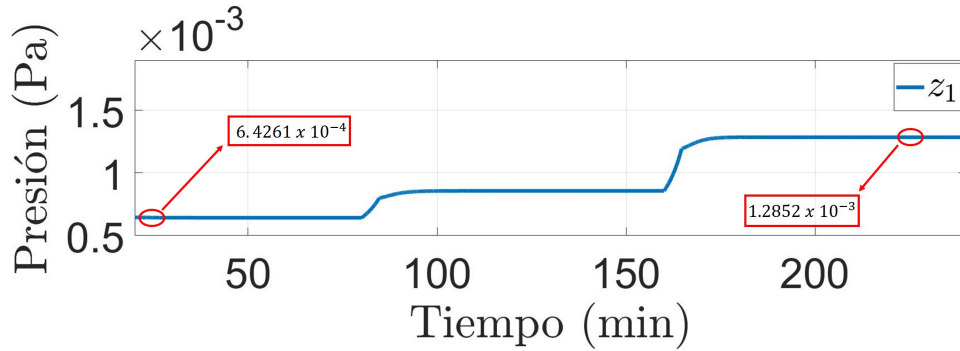


Fig. 3.8. Dinámica de la no linealidad z_1 .

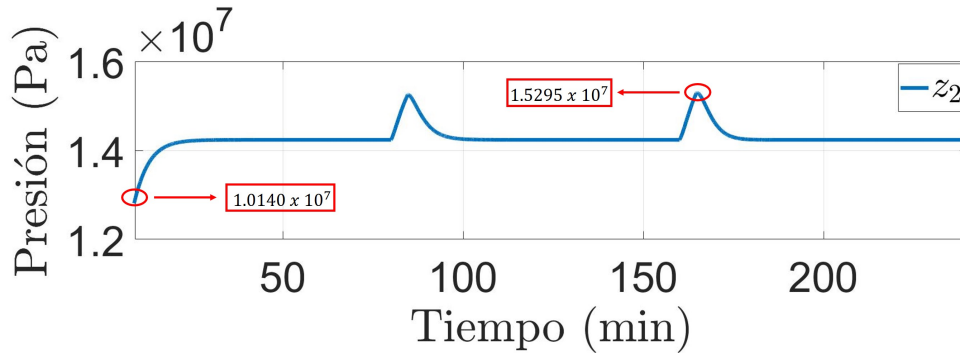


Fig. 3.9. Dinámica de la no linealidad z_2 .

Las matrices (A_i, B_i) dependen de las no linealidades por lo cual sus valores se calculan considerando los valores máximos y mínimos de $z_k(t)$.

Para cada $z(t)$ se construyen dos funciones de ponderación las cuales están normalizadas, de tal manera que $\lambda_0^i \geq 0$, $\lambda_1^i \geq 0$ y $\lambda_0^i + \lambda_1^i = 1$, para un solo valor de $z(t)$ como se presenta en las

ecuaciones (3.14) y (3.15).

$$\lambda_0^1 = \frac{\bar{z}_1 - z_1(t)}{\bar{z}_1 - z_1}, \quad \lambda_1^1 = 1 - \lambda_0^1 \quad (3.14)$$

$$\lambda_0^2 = \frac{\bar{z}_2 - z_2(t)}{\bar{z}_2 - z_2}, \quad \lambda_1^2 = 1 - \lambda_0^2 \quad (3.15)$$

El sistema T-S tiene $M = 2^m$ reglas. Estas reglas se construyen de tal manera que se tengan en cuenta todas las variables de programación z_k . Por lo tanto, las funciones de pertenencia se calculan como:

$$\mu_i(z(t)) = \prod_{k=1}^M \mu_i(z(t)) \quad (3.16)$$

donde $\mu_i(z(t))$ corresponde a las funciones de pertenencia que dependen de cada regla i , donde $i = 1, \dots, M$. Las funciones de pertenencia $\mu_i(z(t))$ están normalizadas de tal manera que $1 \geq \mu_i(z(t)) \geq 0$ y $\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) = 1$. Tomando en cuenta la normalización, las funciones de pertenencia se presentan en (3.17)

$$\begin{aligned} \mu_1(z(t)) &= (\lambda_0^1)(\lambda_0^2), & \mu_2(z(t)) &= (\lambda_0^1)(\lambda_1^2) \\ \mu_3(z(t)) &= (\lambda_1^1)(\lambda_0^2), & \mu_4(z(t)) &= (\lambda_1^1)(\lambda_1^2) \end{aligned} \quad (3.17)$$

Para ejemplificar la ecuación (3.17), se presenta la Figura (3.10) en donde se muestra las funciones de pertenencia y los vértices los cuales están formados por la combinación de los valores máximos y mínimos de los conjuntos $z_1(t)$ y $z_2(t)$.

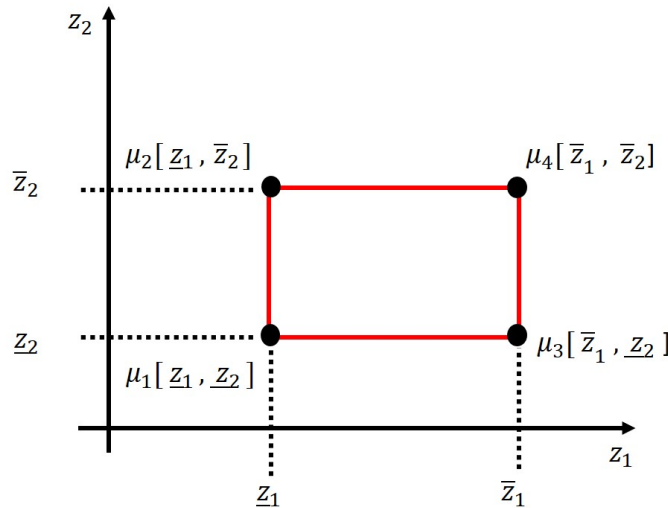


Fig. 3.10. Representación de un sistema en el que se consideran dos parámetros variables.

En la Figura (3.11) se presenta el comportamiento de las funciones de pertenencia, donde cada señal representa la presencia de cada modelo local, las cuales nos permiten obtener la dinámica global del modelo no lineal reducido descrito en las ecuaciones (3.2 - 3.5).

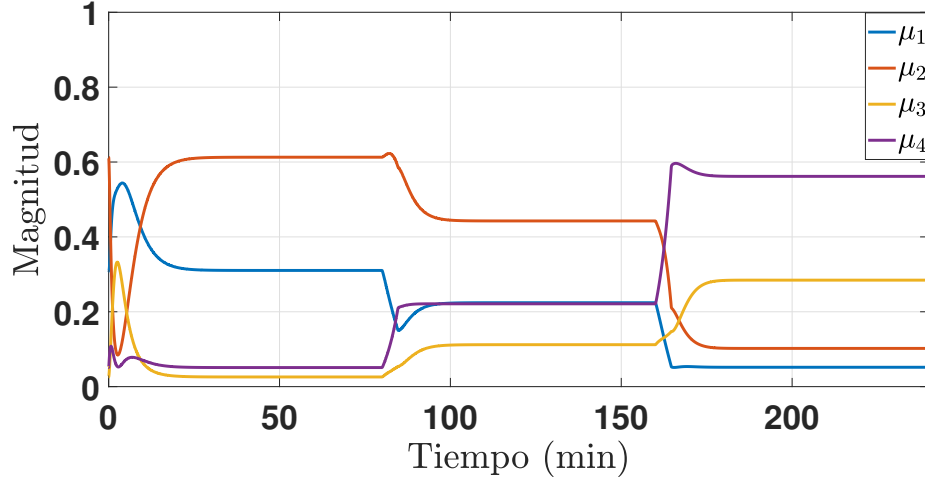


Fig. 3.11. Dinámica de las funciones de pertenencia.

De la representación matricial del modelo no lineal reducido descrito por la ecuación (3.11), se obtiene la siguiente representación del modelo reducido considerando las no linealidades z_1 y z_2 .

$$\begin{bmatrix} \dot{f}_{vM} \\ \dot{P}_D \\ \dot{P}_T \\ \dot{P}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D} z_1 & \frac{k}{C_D} z_1 & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH}} z_1 & -\frac{k}{C_{SH}} z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{P_o}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_D \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{P_o}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{C_{SH}} z_2 \\ 0 & \frac{k_{po} K_1}{t_{P_o}} z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Para cada función de ponderación descrita en las ecuaciones (3.14) y (3.15) le corresponde un conjunto difuso al sustituir los valores máximos y mínimos de cada variable premisa, obteniendo de esta manera 4 reglas difusas, las cuales se representan de la siguiente manera:

■ Modelo Regla 1

$$A_1(\underline{z}_1) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D} z_1 & \frac{k}{C_D} z_1 & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH}} z_1 & -\frac{k}{C_{SH}} z_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{P_o}} \end{bmatrix}, \quad B_1(\underline{z}_2) = \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{P_o}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{C_{SH}} z_2 \\ 0 & \frac{k_{po} K_1}{t_{P_o}} z_2 \end{bmatrix}$$

■ Modelo Regla 2

$$A_2(\underline{z}_1) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D}\underline{z}_1 & \frac{k}{C_D}\underline{z}_1 & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH}}\underline{z}_1 & -\frac{k}{C_{SH}}\underline{z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{Po}} \end{bmatrix}, B_2(\underline{z}_2) = \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{Po}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{C_{SH}}\underline{z}_2 \\ 0 & \frac{k_{po}K_1}{t_{Po}}\underline{z}_2 \end{bmatrix}$$

■ Modelo Regla 3

$$A_3(\overline{z}_1) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D}\overline{z}_1 & \frac{k}{C_D}\overline{z}_1 & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH}}\overline{z}_1 & -\frac{k}{C_{SH}}\overline{z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{Po}} \end{bmatrix}, B_3(\underline{z}_2) = \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{Po}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{C_{SH}}\underline{z}_2 \\ 0 & \frac{k_{po}K_1}{t_{Po}}\underline{z}_2 \end{bmatrix}$$

■ Modelo Regla 4

$$A_4(\overline{z}_1) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{t_H} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_D} & -\frac{k}{C_D}\overline{z}_1 & \frac{k}{C_D}\overline{z}_1 & 0 \\ 0 & \frac{k}{C_{SH}}\overline{z}_1 & -\frac{k}{C_{SH}}\overline{z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{t_{Po}} \end{bmatrix}, B_4(\underline{z}_2) = \begin{bmatrix} \frac{K_H}{t_{Po}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_1}{C_{SH}}\underline{z}_2 \\ 0 & \frac{k_{po}K_1}{t_{Po}}\underline{z}_2 \end{bmatrix}$$

En la ecuación (3.19) se muestra el modelo T-S, en donde las matrices (A_i, B_i) , se obtienen al sustituir los valores máximos y mínimos de cada variable premisa, correspondiente a cada elemento y así mismo construir los modelos locales.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^4 \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.19)$$

donde las matrices $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $B_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$ se muestran en (3.20-3.22) una vez que se reemplazan

los valores de los parámetros de la Tabla (3.1), y $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$.

$$A_1(\underline{z}_1) = A_2(\underline{z}_1) = \begin{bmatrix} -0.1000 & 0 & 0 & 0 \\ 356.3182 & -0.0342 & 0.0342 & 0 \\ 0 & 0.3075 & -0.3075 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1000 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$A_3(\bar{z}_1) = A_4(\bar{z}_1) = \begin{bmatrix} -0.1000 & 0 & 0 & 0 \\ 356.3182 & -0.0835 & 0.0835 & 0 \\ 0 & 0.7514 & -0.7514 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.1000 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$B_1(\underline{z}_2) = B_3(\underline{z}_2) = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -6.6272 \times 10^5 \\ 0 & 24.0399 \end{bmatrix}, \quad B_2(\bar{z}_2) = B_4(\bar{z}_2) = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -1.2218 \times 10^6 \\ 0 & 44.3195 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $y(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de salidas y $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas descrito en (3.23).

$$x(t) = \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_D \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_D \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Los eigenvalores de las matrices A_i se muestran a continuación:

$$\lambda(A_1, A_2) = \begin{bmatrix} -0.3416 \\ 0 \\ -0.1000 \\ -0.1000 \end{bmatrix}, \quad \lambda(A_3, A_4) = \begin{bmatrix} -0.8348 \\ 0 \\ -0.1000 \\ -0.1000 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

por lo que los sistemas son críticamente estables, al tener polos negativos y uno en el origen del plano complejo.

3.2.2. Validación del modelo T-S

Las siguientes pruebas tienen el propósito de evaluar la similitud del modelo T-S con respecto al modelo no lineal, evaluando las respuestas dinámicas de las variables de salida f_{vM} , P_D , P_T y P_o del modelo no lineal reducido (3.2-3.5) y el modelo T-S (3.19), en condiciones de demanda de cargas altas, medias y bajas.

En las Figuras (3.12 - 3.15) se muestran las respuestas de las variables de ambos modelos, las cuales tienen una tendencia dinámica similar para los distintos niveles de carga. Las simulaciones se llevaron a cabo en la plataforma de simulación Matlab/Simulink R2017b, con un método de solución

y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A), las condiciones iniciales son las mismas para el sistema T-S como para el modelo no lineal reducido y son: $f_{vM} = 257.89 \text{ kg/s}$, $P_D = 16.652 \times 10^6 \text{ Pa}$, $P_T = 14.235 \times 10^6 \text{ Pa}$ y $P_o = 300 \text{ MW}$.

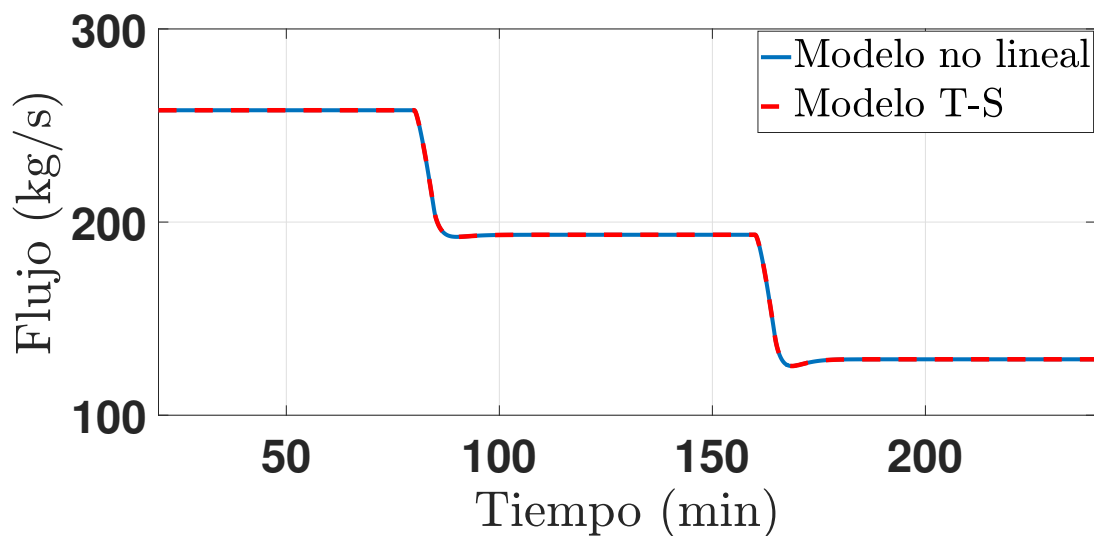


Fig. 3.12. f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

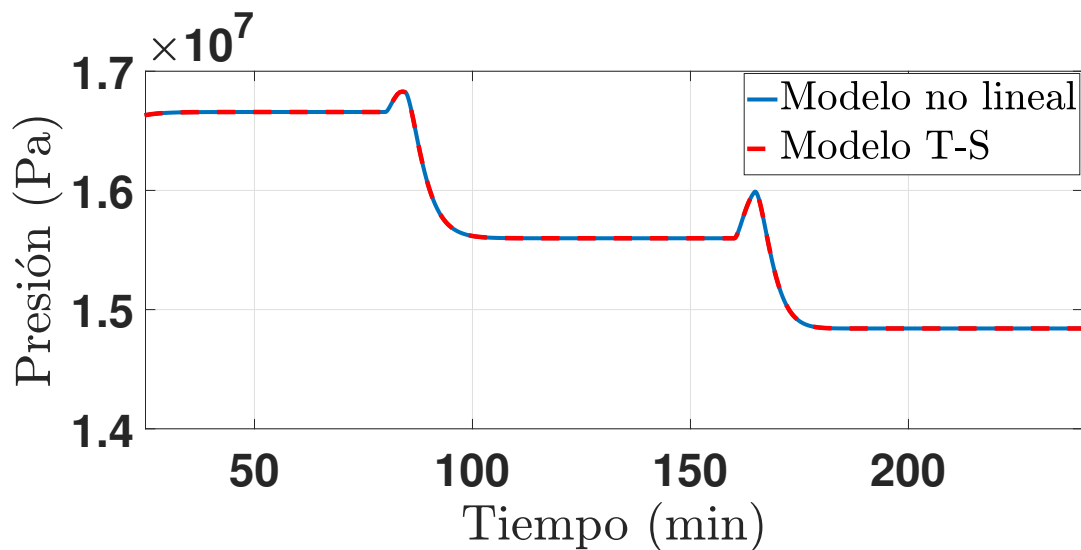


Fig. 3.13. P_D Presión del domo.

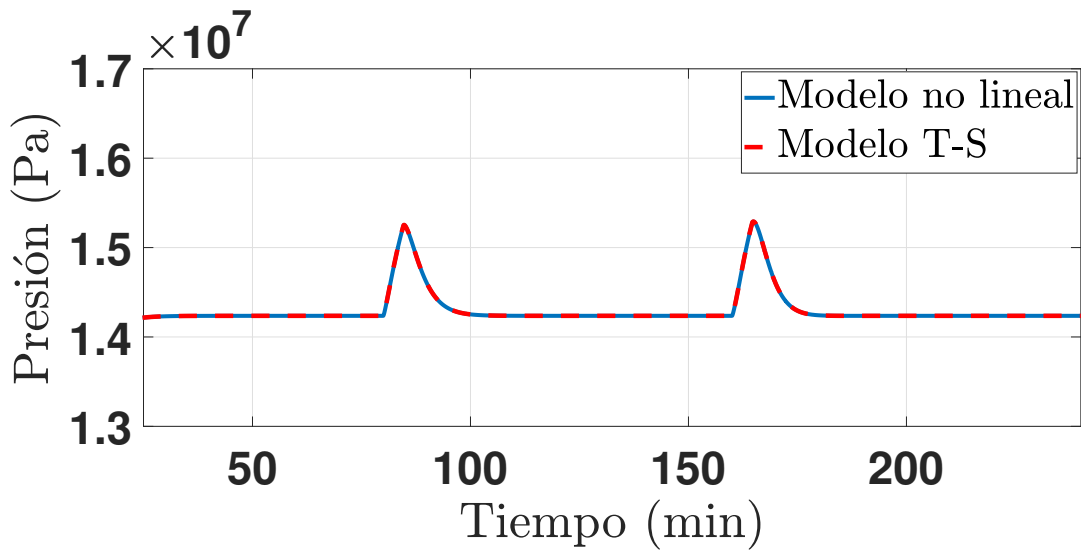


Fig. 3.14. P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

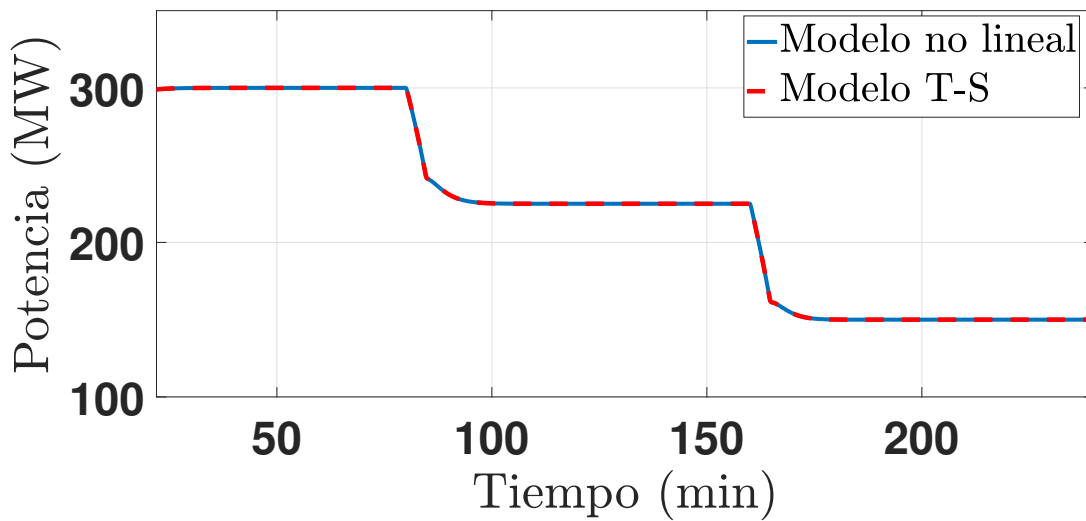


Fig. 3.15. P_o potencia eléctrica.

En las Figuras (3.12-3.15) se puede observar que el sistema T-S representado por la línea punteada roja mantiene el comportamiento del modelo no lineal reducido representado por la línea azul, esto se debe a la información que brinda cada una de las funciones de pertenencia ilustradas en la Figura (3.11).

3.3. Monitoreo de variables

En esta sección se presenta el diseño de un observador proporcional (PO) para la estimación de estados y monitoreo de variables, en el cual se considera un sistema T-S en donde no tenemos todas las variables disponibles para la medición directa. El sistema T-S se representa de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t)\end{aligned}\tag{3.25}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salidas y $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas, los cuales están dados por:

$$x(t) = \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_D \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix}, \quad y(t) = \begin{bmatrix} f_{vM} \\ P_T \\ P_o \end{bmatrix}, \quad u(t) = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix}\tag{3.26}$$

las matrices A_i , B_i y C están dadas en (3.20-3.22).

Para poder diseñar un observador es necesario cumplir la condición de observabilidad definida en la sección 2.3, la cual en este caso puede ser escrita como:

$$\begin{aligned}\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_1 \\ CA_1^2 \\ CA_1^3 \end{bmatrix} &= 4, & \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_2 \\ CA_2^2 \\ CA_2^3 \end{bmatrix} &= 4, \\ \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_3 \\ CA_3^2 \\ CA_3^3 \end{bmatrix} &= 4, & \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_4 \\ CA_4^2 \\ CA_4^3 \end{bmatrix} &= 4\end{aligned}$$

3.3.1. Observador PO

El observador PO está descrito por:

$$\dot{Z}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(N_i Z(t) + G_i u(t) + L_i y(t))\tag{3.27}$$

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(Z(t) + H_2 y(t))\tag{3.28}$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t)\tag{3.29}$$

donde $Z(t)$ representa el vector de estados del observador, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ representa el vector de entradas, $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de estados estimados. Las matrices $N_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $G_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$, $L_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $H_2 \in \mathbb{R}^{n \times m}$ son las ganancias locales del observador las cuales permiten tener grados de libertad adicionales.

Obtención de la dinámica del error

El diseño del observador requiere del estudio del error de estimación de estados $e(t)$ mediante las ecuaciones (3.25) y (3.28), definiendo el error como:

$$\begin{aligned} e(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ &= x(t) - (Z(t) + H_2 C x(t)) \end{aligned} \quad (3.30)$$

agrupando $x(t)$ se tiene

$$e(t) = H_1 x(t) - Z(t) \quad (3.31)$$

donde $H_1 \in \mathbb{R}^{n \times n} = (I_n - H_2 C)$.

Utilizando la ecuación (3.31) se puede obtener la dinámica del error de estimación de estados como:

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= H_1 \dot{x}(t) - \dot{Z}(t) \\ &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (H_1 (A_i x(t) + B_i u(t)) - (N_i Z(t) + G_i u(t) + L_i y(t))) \end{aligned} \quad (3.32)$$

posteriormente se sustituye $Z(t) = H_1 x(t) - e(t)$

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) ((H_1 A_i - N_i H_1 - L_i C) x(t) + (H_1 B_i - G_i) u(t) + N_i e(t)) \quad (3.33)$$

Para simplificar la expresión de $e(t)$ se proponen las siguientes condiciones

$$H_1 A_i - N_i H_1 - L_i C = 0 \quad (3.34)$$

$$G_i = H_1 B_i \quad (3.35)$$

$$H_1 = (I_n - H_2 C) \quad (3.36)$$

Quedando de la siguiente manera

$$\dot{e} = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(N_i e(t)) \quad (3.37)$$

El error de estados tiende asintóticamente a cero si la matriz N_i es estable. Para obtener la matriz N_i se debe de utilizar la ecuación (3.34) y (3.36), de forma tal que.

$$N_i = H_1 A_i + K_i C \quad (3.38)$$

donde $K_i = N_i H_2 - L_i$

Análisis de estabilidad y convergencia

En esta sección se presentan las condiciones para garantizar la estabilidad del PO.

La función cuadrática a considerar es:

$$V(e(t)) = e^T(t) J e(t) > 0 \quad (3.39)$$

con $J > 0$

$$\dot{V}(e(t)) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(e^T(t)(N_i^T J + J N_i)e(t)) < 0 \quad (3.40)$$

La estabilidad de (3.40) es garantizada si y solo si $\dot{V}(e(t)) < 0$. Lo que permite obtener la siguiente desigualdad matricial lineal (LMI)

$$N_i^T J + J N_i < 0 \quad (3.41)$$

Posteriormente se sustituye N_i en la ecuación (3.41), tal que se obtiene la siguiente ecuación

$$A_i^T H_1^T J + C^T K_i^T J + J H_1 A_i + J K_i C < 0 \quad (3.42)$$

La desigualdad (3.42) presenta bilinealidades por el elemento $J K_i$, por tal motivo se propone un cambio de variable para eliminar la bilinialidad

$$W_i = J K_i \quad (3.43)$$

Este observador es asintóticamente estable si existe una matriz J simétrica definida positiva y matrices $W_i = JK_i$ de modo que se verifique la siguiente LMI:

$$A_i^T H_1^T J + C^T W_i^T + JH_1 A_i + W_i C < 0 \quad (3.44)$$

para $i = 1, \dots, M$. La cual puede ser solucionada utilizando herramientas disponibles en la literatura.

Resolviendo la LMI de la ecuación (3.44) con la restricción de una matriz $J < 0$ se obtienen las siguientes matrices.

$$J = \begin{bmatrix} 1.3264 & 4.9466 \times 10^{-13} & 0 & 0 \\ 4.9466 \times 10^{-13} & 1.8314 & -1.4951 \times 10^{-09} & -4.1216 \times 10^{-05} \\ 0 & -1.4951 \times 10^{-09} & 1.3264 & 0 \\ 0 & -4.1216 \times 10^{-05} & 0 & 1.3262 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

la cual tiene los siguientes valores propios positivos:

$$\lambda(J) = \begin{bmatrix} 1.3264 \\ 1.3264 \\ 1.3264 \\ 1.8314 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Matrices W_i

$$W_1 = \begin{bmatrix} -0.6632 & 0.0379 & 0.0073 \\ -652.5629 & -0.0626 & -1.0866 \times 10^{-05} \\ -0.0379 & -0.6632 & -0.0019 \\ 0.0073 & 0.0019 & -0.5969 \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} -0.6632 & 0.0173 & 0.0073 \\ -652.5629 & -0.0626 & -1.0866 \times 10^{-05} \\ -0.0173 & -0.6632 & -0.0062 \\ 0.0073 & 0.0062 & -0.5969 \end{bmatrix}$$

$$W_3 = \begin{bmatrix} -0.6632 & 0.0356 & 0.0073 \\ -652.5629 & -0.1529 & -2.3578 \times 10^{-05} \\ -0.0356 & -0.6632 & -0.0040 \\ 0.0074 & 0.0041 & -0.5969 \end{bmatrix}, W_4 = \begin{bmatrix} -0.6632 & 0.0570 & 0.0073 \\ -652.5629 & -0.1529 & -2.3578 \times 10^{-05} \\ -0.0570 & -0.6632 & -0.0020 \\ 0.0073 & 0.0019 & -0.5969 \end{bmatrix}$$

Matrices (N_i) , (G_i) , (L_i) , (K_i) , (H_1) y (H_2) .

$$N_1 = \begin{bmatrix} -0.5000 & 0 & 0.0286 & 0.005 \\ -1.2456 \times 10^{-07} & -0.0342 & 3.1436 \times 10^{-08} & -1.6061 \times 10^{-05} \\ -0.0286 & 2.0230 \times 10^{-10} & -0.5000 & -0.0014 \\ -0.0055 & 5.5768 \times 10^{-06} & 0.0014 & -0.5000 \end{bmatrix},$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} -0.5000 & 0 & -0.0130 & 0.0055 \\ -1.2449 \times 10^{-07} & -0.0342 & 1.0499 \times 10^{-07} & -1.6061 \times 10^{-05} \\ 0.0130 & 2.0230 \times 10^{-10} & -0.5000 & -0.0047 \\ -0.0055 & 5.5768 \times 10^{-06} & 0.0047 & -0.5000 \end{bmatrix},$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} -0.5000 & 0 & 0.0268 & 0.0055 \\ -1.2440 \times 10^{-07} & -0.0835 & 6.7879 \times 10^{-08} & -2.3001 \times 10^{-05} \\ 0.0268 & 4.9434 \times 10^{-10} & -0.5000 & -0.0031 \\ -0.0055 & 1.3628 \times 10^{-05} & 0.0031 & -0.5000 \end{bmatrix},$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} -0.5000 & 0 & 0.0430 & 0.0055 \\ -1.2460 \times 10^{-07} & -0.0835 & -3.4202 \times 10^{-08} & -2.3001 \times 10^{-05} \\ 0.0430 & 4.9434 \times 10^{-10} & -0.5000 & -0.0015 \\ -0.0055 & 1.3628 \times 10^{-05} & 0.0015 & -0.5000 \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -4.7146 \times 10^{-11} \\ 0 & -3 - 7094 \times 10^{-11} \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1.0180 \times 10^{-10} \\ 0 & 2.2280 \times 10^{-10} \end{bmatrix},$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -4.7146 \times 10^{-11} \\ 0 & -3.7094 \times 10^{-11} \end{bmatrix}, G_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1.0180 \times 10^{-10} \\ 0 & 2.2280 \times 10^{-10} \end{bmatrix},$$

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0038 \times 10^{-07} & -0.0027 \\ 356.3182 & 0.0341 & 8.0302 \times 10^{-06} \\ 0 & 2.5952 \times 10^{-08} & 0.0007 \\ 0 & 3.4919 \times 10^{-06} & 0.2000 \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0032 \times 10^{-07} & -0.0027 \\ 356.3182 & 0.0341 & 8.0302 \times 10^{-06} \\ 0 & 8.5205 \times 10^{-08} & 0.0023 \\ 0 & 3.4919 \times 10^{-06} & 0.2000 \end{bmatrix},$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0038 \times 10^{-07} & -0.0028 \\ 356.3182 & 0.0835 & 1.1501 \times 10^{-05} \\ 0 & 5.5212 \times 10^{-08} & 0.0015 \\ 0 & 4.5589 \times 10^{-06} & 0.2000 \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 0 & -1.0041 \times 10^{-07} & -0.0028 \\ 356.3182 & 0.0834 & 1.1500 \times 10^{-05} \\ 0 & -2.7056 \times 10^{-08} & -0.0007 \\ 0 & -4.5589 \times 10^{-06} & 0.2000 \end{bmatrix},$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.50000 & 0.02858 & 0.0055 \\ -356.3182 & -0.0341 & -1.6060 \times 10^{-05} \\ -0.0285 & -0.4999 & -0.0014 \\ -0.0055 & 0.0014 & -0.4500 \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} -0.50000 & -0.0130 & 0.0055 \\ -356.3182 & -0.0342 & -1.6060 \times 10^{-05} \\ 0.0130 & -0.5000 & -0.0047 \\ -0.0055 & 0.0047 & -0.4500 \end{bmatrix}, \\
 K_3 = \begin{bmatrix} -0.50000 & 0.0268 & 0.0055 \\ -356.3182 & -0.0835 & -2.3001 \times 10^{-05} \\ -0.0268 & -0.5000 & -0.0031 \\ -0.0055 & 0.0031 & -0.4500 \end{bmatrix}, K_4 = \begin{bmatrix} -0.50000 & 0.0430 & 0.0055 \\ -356.3182 & -0.0835 & -2.3001 \times 10^{-05} \\ 0.0430 & -0.5000 & -0.0015 \\ -0.0055 & 0.0015 & -0.4500 \end{bmatrix}, \\
 H_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6.5793 \times 10^{-10} & 1.8137 \times 10^{-05} \\ 0 & 0 & 1.8137 \times 10^{05} & 0.5000 \end{bmatrix} \text{ y } H_2 = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 & 1.8137 \times 10^{-05} \\ 0 & 1.8137 \times 10^{05} & 0.5000 \end{bmatrix}.$$

3.3.2. Resultados del PO

La siguiente prueba tiene como objetivo mostrar la convergencia del de las señales de salida del observador PO con las señales de salida del modelo no lineal reducido. Las pruebas de evaluación del PO, se realizaron sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, con un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab, (ver Anexo A). La simulación se llevo a cabo para los diferentes niveles de cargas (bajas, medias y altas), en un periodo de aproximadamente 4 horas de simulación. Las condiciones iniciales para el modelo reducido son: $f_{vM} = 257.89 \text{ kg/s}$, $P_D = 16.652 \times 10^6 \text{ Pa}$, $P_T = 14.235 \times 10^6 \text{ Pa}$ y $P_o = 300 \text{ MW}$ y para el observador PO son: $\hat{f}_{vM} = 200 \text{ kg/s}$, $\hat{P}_D = 15.652 \times 10^6 \text{ Pa}$, $\hat{P}_T = 15.235 \times 10^6 \text{ Pa}$ y $\hat{P}_o = 250 \text{ MW}$

Los resultados del PO se ilustran en las Figuras (3.16-3.19). En las Figuras (3.16 - 3.18) se muestran las estimaciones de las variables de estado del PO descrito por las ecuaciones (3.27 - 3.29). La estimación de las variables de estado es adecuada ya que mantienen el mismo comportamiento del sistema T-S. La Figura (3.19) muestra la estimación del estado P_D que se obtiene del PO.

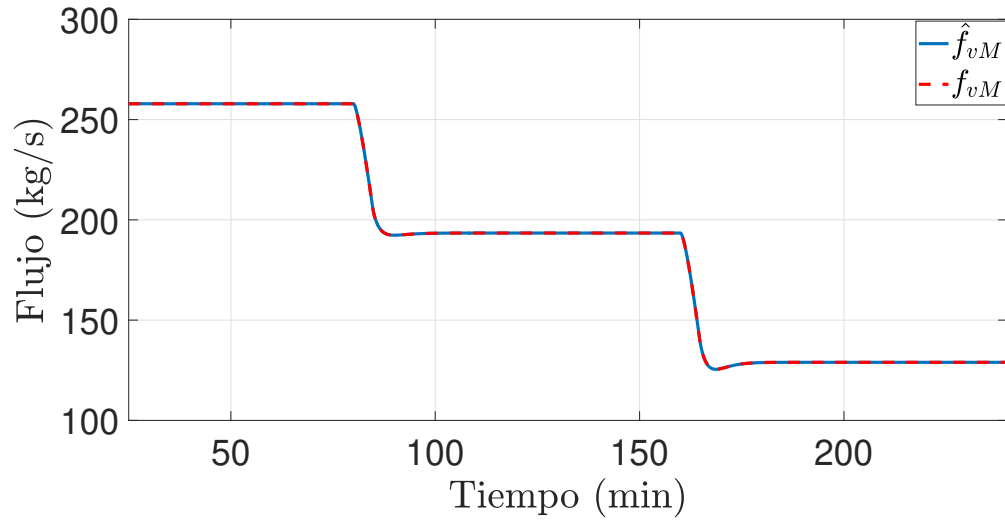


Fig. 3.16. Comparación de la variable f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

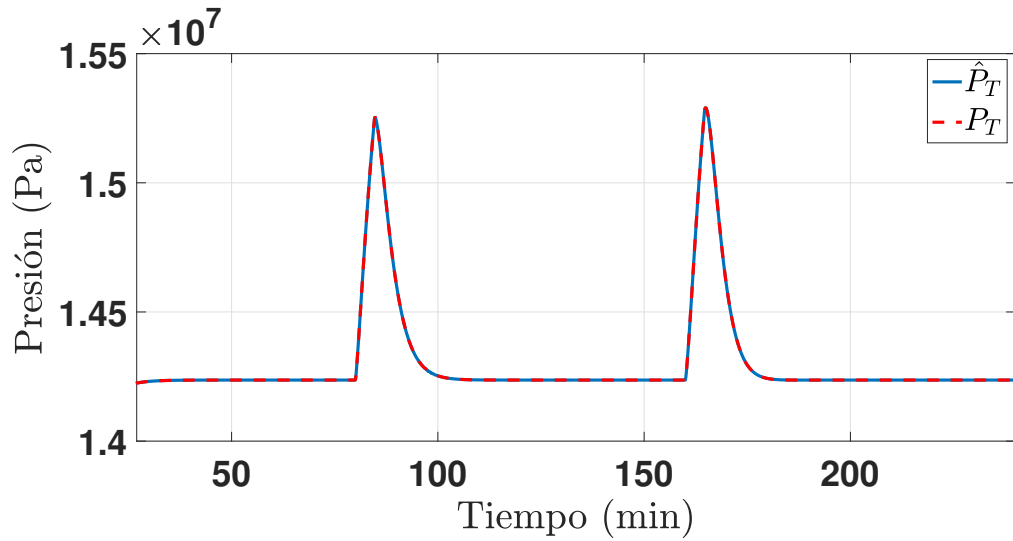


Fig. 3.17. Comparación de la variable P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

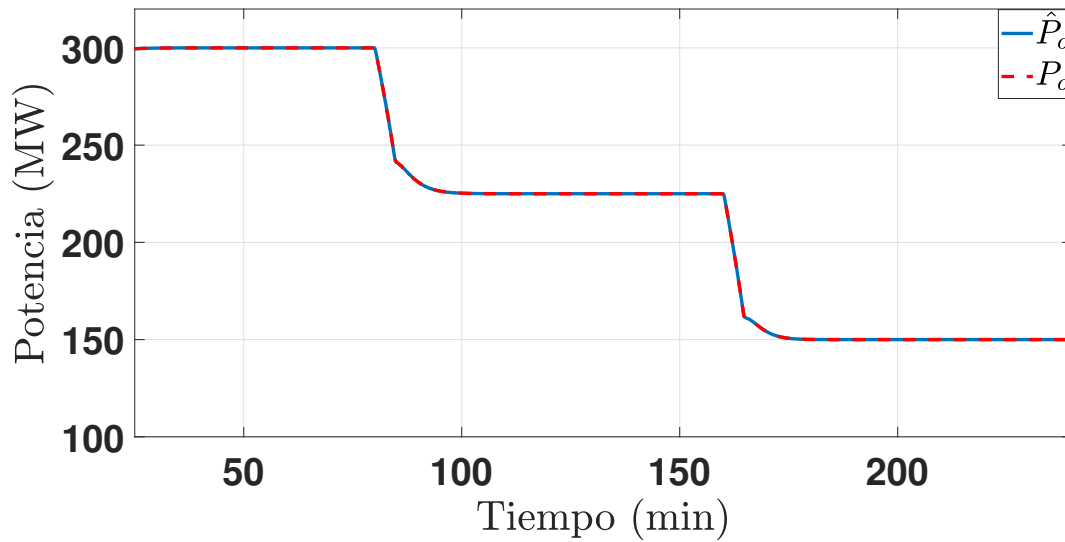


Fig. 3.18. Comparación de la variable P_o potencia eléctrica.

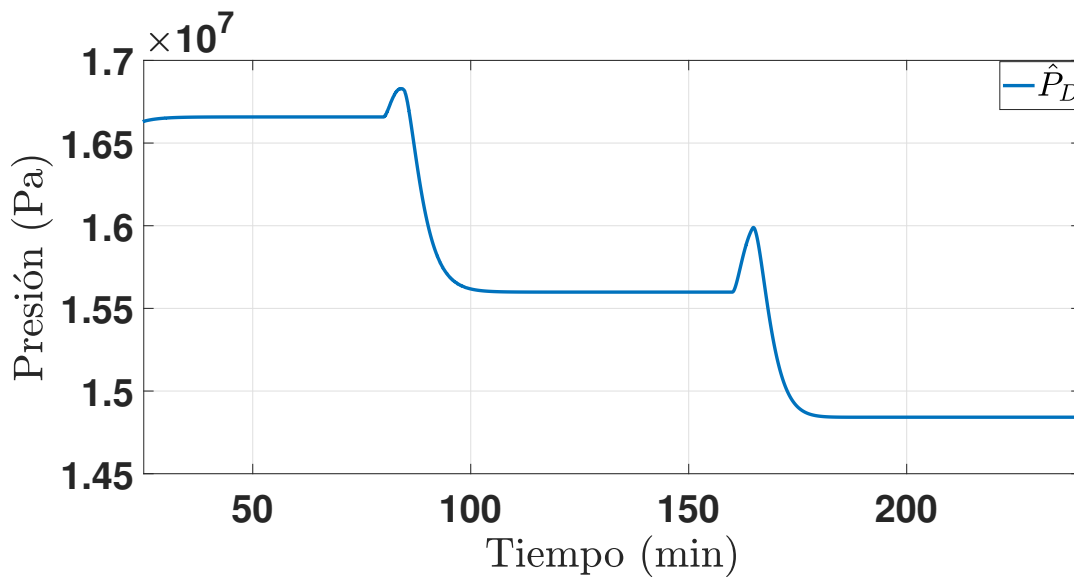


Fig. 3.19. Estimación de la variable P_D presión del domo.

En las Figuras (3.16-3.18) se presenta la comparación de las variables conocidas, se aprecia que la estimación de estados es eficiente ya que el error de la estimación en cada una de las variables se encuentra alrededor de $\times 10^{-8}$ y $\times 10^{-10}$. En la Figura (3.19) se presenta la estimación de la variable de estado P_D , donde en este caso particular no se consideró medible por lo que solo se muestra la variable estimada.

3.4. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó el modelo no lineal reducido de una central termoeléctrica aplicado a esquemas de control. También se diseñó un sistema de control, el cual regula la presión en el en la entrada de la turbina para evitar daños en las tuberías y mantener una calidad en el vapor generado.

Posteriormente se obtuvo una representación matricial del modelo reducido el cual fue utilizado para diseñar un sistema difuso Takagi-Sugeno mediante el método de sector no lineal. En el diseño del sistema T-S se obtuvieron cuatro modelos locales, los cuales representan de manera exacta el comportamiento del modelo no lineal reducido de una central termoeléctrica aplicado a esquemas de control. También se presenta el diseño del PO para realizar el monitoreo de variables de estado, en donde se considera un modelo T-S en el cual no se tienen toda la información de la variables de salida.

Capítulo 4

Diseño del esquema control tolerante a fallas

En este capítulo se presenta el diseño del esquema control tolerante a fallas activo, el cual incorpora un observador proporcional integral, el cual tiene un funcionamiento de un sistema de detección y localización de fallas (FDI) ya que brinda información de las fallas en actuadores en todo momento.

En la sección 4.1 se presenta el diseño del esquema FTC y del observador proporcional integral, así como el estudio de la dinámica del error de estimación de estados, fallas y trayectoria.

En la sección 4.2 se presenta la evaluación del esquema FTC ante distintos escenarios de pruebas, en los cuales se consideran fallas abruptas e incipientes en los actuadores del sistema.

4.1. Diseño del FTC

La Figura 4.1 presenta en forma de diagrama a bloques el esquema FTC activo que se propone en este trabajo. El esquema utiliza un modelo de referencia controlado y libre de fallas, las variables de salida del modelo de referencia $x(t)$, se compran con las variables estimadas del observador $\hat{x}_f(t)$. El observador se encuentra diseñado de tal manera que permite estimar estados $\hat{x}_f(t)$ y fallas en actuadores $\hat{f}(t)$.

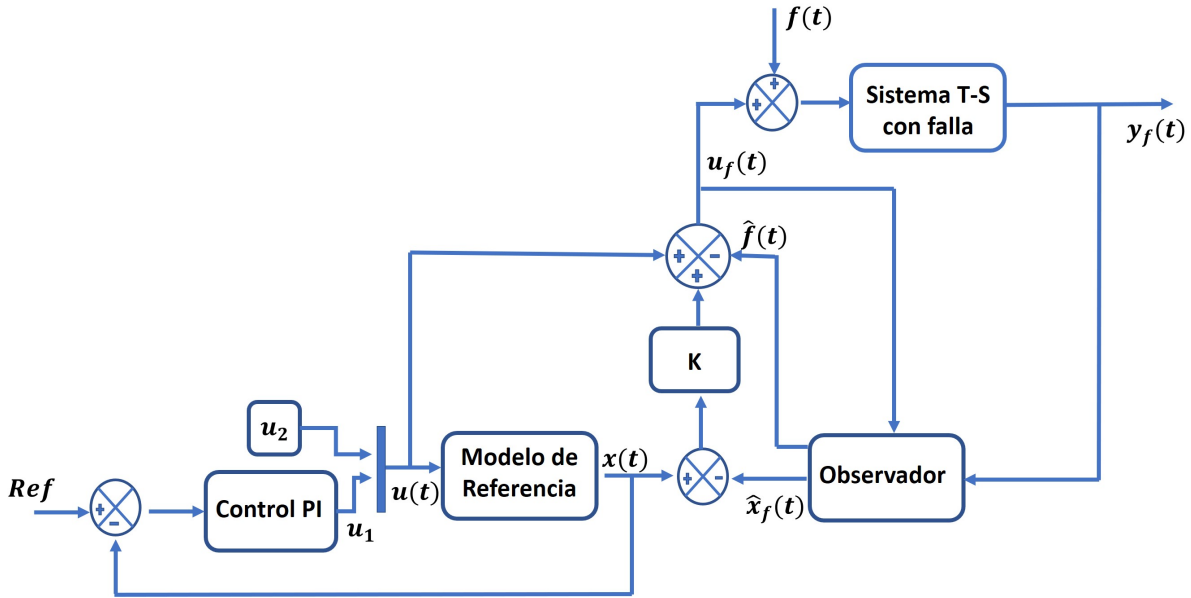


Fig. 4.1. Diagrama de bloques de un esquema FTC basado en observador

Para el diseño de la ley de control $u_f(t)$, se considera la comparación de las variables del modelo de referencia con las del observador, posteriormente son multiplicadas por una ganancia la cual permite garantizar la estabilidad del sistema. El objetivo principal de la ley de control $u_f(t)$ es acomodar la falla automáticamente en los actuadores, al restar la estimación de la falla $\hat{f}(t)$. Por lo tanto, el enfoque FTC permite que las variables de salida no reflejen el efecto de las fallas.

Las CTE son procesos sumamente complejos con dinámicas altamente inestables y susceptibles a fallas por lo que su operación debe realizarse de manera precisa y segura. Por tal motivo las CTE dependen de controladores para funcionar de manera adecuada ya que sin dichos controladores las centrales tendrían un comportamiento inestable. Por tal motivo el enfoque FTC planteado toma en cuenta el control nominal del sistema.

De acuerdo con el diagrama de bloques del esquema FTC de la Figura 4.1, el bloque “sistema T-S con falla” puede expresarse como:

$$\dot{x}_f(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x_f(t) + B_i(u_f(t) + f(t))) \quad (4.1)$$

$$y_f(t) = C x_f(t) \quad (4.2)$$

donde $x_f(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados con falla, $u_f(t) \in \mathbb{R}^p$ es la ley de control generada por el esquema FTC, $y_f(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de salida con falla y $f(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de **fallas abruptas**, entonces $\dot{f}(t) = 0$. Las matrices A_i , B_i y C son matrices conocidas de dimensiones apropiadas.

El modelo de referencia se basa en un modelo libre de falla, representándose como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= x(t)\end{aligned}\tag{4.3}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas y $y(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de salida. Las matrices $A_i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ y $B_i \in \mathbb{R}^{n \times p}$ son matrices conocidas de dimensiones apropiadas. Al ser un modelo de referencia, se asume que se ejecuta de forma paralela al proceso real. Por lo que, se tiene acceso a todas las variables de estado del modelo de referencia.

La ley de control $u_f(t)$ se diseñó con el objetivo principal de hacer que el error de trayectoria converja asintóticamente a cero. La estrategia de control se muestra en la Figura 4.1, la cual se representa de la siguiente manera:

$$u_f(t) = K(x(t) - \hat{x}_f(t)) + u(t) - \hat{f}(t)\tag{4.4}$$

donde la matriz $K \in \mathbb{R}^{p \times n}$ determina la estabilidad del sistema incluso ante la presencia de fallas. Al analizar la estructura de $u_f(t) \in \mathbb{R}^p$ dada en la ecuación (4.4), se requiere la estimación del modelo con falla $\hat{x}_f(t)$ y la estimación de la falla $\hat{f}(t)$ dicha estimación es realizada por un observador proporcional-integral (PIO) que estima simultáneamente los estados y las fallas del sistema. El observador PIO se basa en un observador tipo Luenberger con términos aditivos.

Considere el siguiente observador:

$$\dot{\hat{x}}_f(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i \hat{x}_f(t) + B_i(u_f(t) + \hat{f}(t)) + L_i(y_f(t) - \hat{y}_f(t)))\tag{4.5}$$

$$\hat{y}_f(t) = C \hat{x}_f(t)\tag{4.6}$$

$$\dot{\hat{f}}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(G_i(y_f(t) - \hat{y}_f(t)))\tag{4.7}$$

donde $\hat{x}_f(t) \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de estados estimados, $\hat{y}_f(t) \in \mathbb{R}^n$ representa el vector de salidas estimadas y $\hat{f}(t) \in \mathbb{R}^p$ representa el vector de fallas estimadas. Las matrices $L_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y $G_i \in \mathbb{R}^{p \times m}$ son las ganancias locales del observador las cuales permiten tener grados de libertad adicionales.

En la Figura (4.2) se presenta de manera desglosada un diagrama del esquema FTC propuesto.

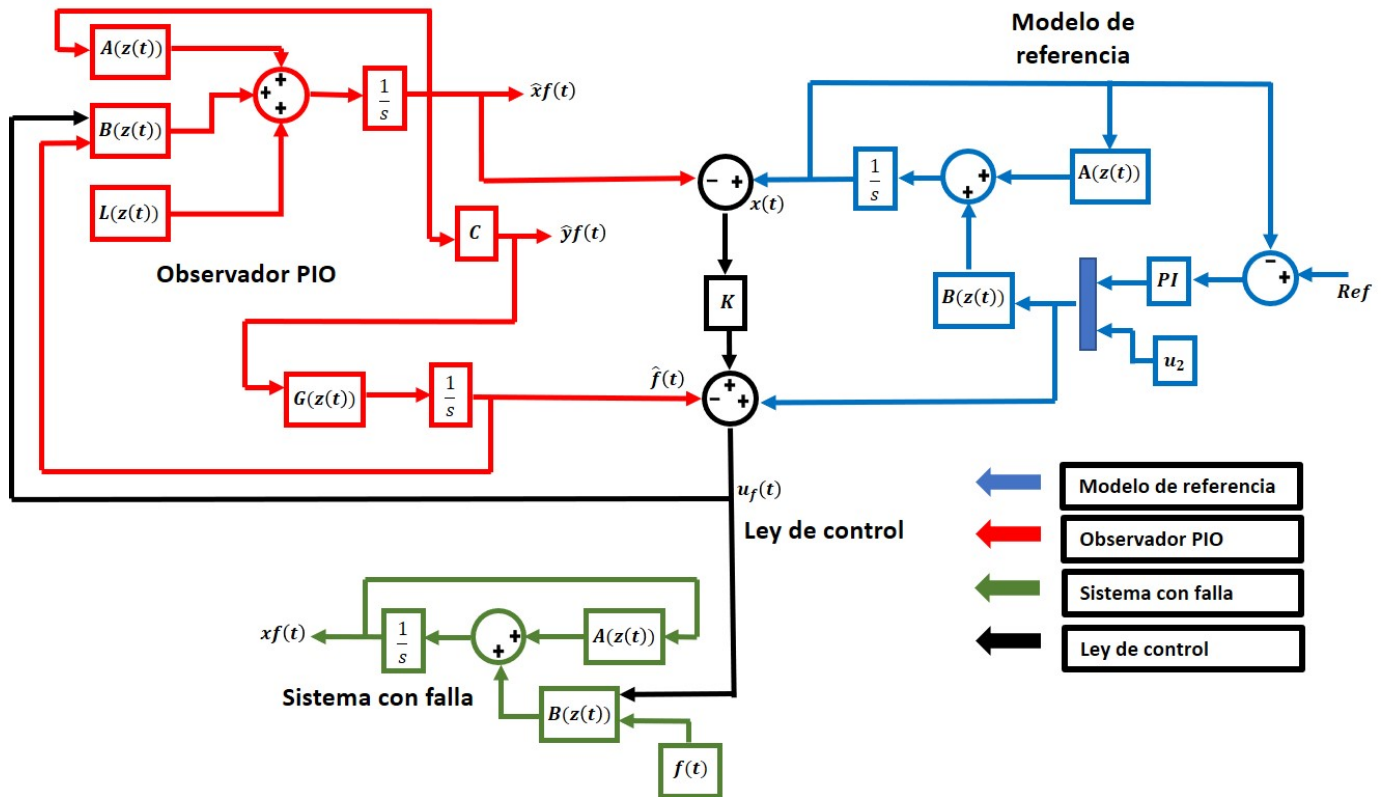


Fig. 4.2. Diagrama esquemático de un FTC basado en observador

4.1.1. Análisis de la dinámica de estimación

Considerando el error de estimación de la salida como la diferencia entre las salidas del modelo con falla (4.1) y el observador (4.5) se tiene:

$$\begin{aligned} e_y(t) &= (y_f(t) - \hat{y}_f(t)) \\ &= C(x_f(t) - \hat{x}_f(t)) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Utilizando el modelo con falla (4.1) y el modelo de referencia (4.3), se puede definir la dinámica del error de seguimiento de trayectoria $e(t) = x(t) - x_f(t)$, de la siguiente manera

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{x}_f(t) \\ \dot{e}(t) &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i(x(t) - x_f(t)) + B_i u(t) - B_i u_f(t) - B_i f(t)) \end{aligned} \quad (4.9)$$

sustituyendo la ley de control (4.4) en la ecuación (4.9) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i e(t) - B_i(K(x(t) - \hat{x}_f(t)) + u(t) - \hat{f}(t)) - B_i f(t) + B_i u(t)) \quad (4.10)$$

simplificando se obtiene la siguiente ecuación

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i e(t) - B_i K(x(t) - \hat{x}_f(t)) - B_i(f(t) - \hat{f}(t))) \quad (4.11)$$

posteriormente se sustituye $x(t) = e(t) + x_f(t)$

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i e(t) - B_i K(e(t) + x_f(t) - \hat{x}_f(t)) - B_i(f(t) - \hat{f}(t))) \quad (4.12)$$

simplificando se obtiene

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))((A_i - B_i K)e(t) - B_i K(x_f(t) - \hat{x}_f(t)) - B_i(f(t) - \hat{f}(t))) \quad (4.13)$$

Considerando

$$x_a(t) = \begin{bmatrix} x_f(t) \\ f(t) \end{bmatrix}, \quad e_a(t) = x_a - \hat{x}_a(t) = \begin{bmatrix} x_f(t) - \hat{x}_f(t) \\ f(t) - \hat{f}(t) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

la dinámica del error de trayectoria (4.13) es representada de la siguiente manera:

$$\dot{e}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))((A_i - B_i K)e(t) - \bar{L}_i e_a(t)) \quad (4.15)$$

donde $\bar{L}_i = \begin{bmatrix} B_i K & B_i \end{bmatrix}$.

Derivando $x_a(t)$ y $\hat{x}_a(t)$ de la ecuación (4.14) obtenemos los siguientes sistemas aumentados

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{x}_f(t) \\ \dot{f}(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}_a(t)} = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) \left(\underbrace{\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\bar{A}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} x_f(t) \\ f(t) \end{bmatrix}}_{x_a(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix}}_{\bar{B}_i} u_f(t) \right) \quad (4.16)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_f(t) \\ \dot{\hat{f}}(t) \end{bmatrix}}_{\dot{\hat{x}}_a(t)} = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) \left(\underbrace{\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\bar{A}_i} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{x}_f(t) \\ \hat{f}(t) \end{bmatrix}}_{\hat{x}_a(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix}}_{\bar{B}_i} u_f(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} L_i \\ G_i \end{bmatrix}}_{N_i} \underbrace{\begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}}_{\bar{C}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_f(t) - \hat{x}_f(t) \\ f(t) - \hat{f}(t) \end{bmatrix}}_{e_a(t)} \right) \quad (4.17)$$

Considerando $\bar{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$, la ecuación (4.8) puede ser escrita como:

$$y_f(t) = \bar{C}x_a(t) \quad (4.18)$$

Derivando $e_a(t)$ representada en la ecuación (4.14)

$$\begin{aligned} \dot{e}_a(t) &= \dot{x}_a(t) - \dot{\hat{x}}_a(t) \\ &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) \left\{ \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f(t) - \hat{x}_f(t) \\ f(t) - \hat{f}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_i \\ G_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_f(t) - \hat{x}_f(t) \\ f(t) - \hat{f}(t) \end{bmatrix} \right\} \\ &= \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\bar{A}_i - N_i \bar{C}) e_a(t) \end{aligned} \quad (4.19)$$

donde $N_i = \begin{bmatrix} L_i \\ G_i \end{bmatrix}$.

De las dinámicas del error de seguimiento de trayectoria (4.15), estimación de estados y de estimación de fallas (4.19), se puede representar el siguiente sistema aumentado:

$$\dot{\bar{e}}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\bar{A}_{ai}) \bar{e}(t) \quad (4.20)$$

donde $\bar{A}_{ai} = \begin{bmatrix} A_i - B_i K & -\bar{L}_i \\ 0 & \bar{A}_i - N_i \bar{C} \end{bmatrix}$, $\bar{e}(t) = \begin{bmatrix} x(t) - x_f(t) \\ x_f(t) - \hat{x}_f(t) \\ f(t) - \hat{f}(t) \end{bmatrix}$.

4.1.2. Análisis de estabilidad y convergencia

En esta sección se presentan las condiciones para garantizar la estabilidad del PIO y del FTC.

Considere la función cuadrática:

$$V(\bar{e}(t)) = \bar{e}(t)^T D \bar{e}(t) > 0 \quad (4.21)$$

donde $D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix} > 0$, $D_1 = D_1^T > 0$, $D_2 = D_2^T > 0$.

La derivada de (4.21) puede escribirse como:

$$\dot{V}(e(t)) = \dot{e}(t)^T D \bar{e}(t) + \bar{e}(t)^T D \dot{e}(t) < 0 \quad (4.22)$$

sustituyendo la ecuación (4.20) en (4.22) obtenemos:

$$\dot{V}(\bar{e}(t)) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\bar{e}(t)^T (\bar{A}_{ai}^T D + D \bar{A}_{ai}) \bar{e}(t)) < 0 \quad (4.23)$$

La estabilidad de (4.23) es garantizada si y solo si $\dot{V}(\bar{e}(t)) < 0$. Lo que permite obtener la siguiente desigualdad matricial lineal (LMI)

$$\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\bar{A}_{ai}^T D + D \bar{A}_{ai}) < 0 \quad (4.24)$$

Para asegurar la negatividad de la desigualdad (4.24) se considera una región LMI vertical en el semiplano izquierdo complejo, con un desplazamiento de $\text{Re}(-\alpha)$, obteniendo así la siguiente LMI:

$$\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (\bar{A}_{ai}^T D + D \bar{A}_{ai} + 2\alpha D) < 0 \quad (4.25)$$

donde $\alpha > 0$ es un escalar. Al sustituir las matrices \bar{A}_{ai} y D , se obtiene la siguiente desigualdad

$$\begin{bmatrix} A_i^T D_1 - K^T B_i^T D_1 + D_1 A_i - D_1 B_i K + 2\alpha D_1 & -D_1 \bar{L}_i \\ -D_1 \bar{L}_i^T & \bar{A}_i^T D_2 - \bar{C}^T N_i^T D_2 + D_2 \bar{A}_i - D_2 N_i \bar{C} + 2\alpha D_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (4.26)$$

para $i = 1, \dots, M$.

La desigualdad (4.26) presenta bilinealidades en el término (1,1) de la matriz, por el elemento $K^T B_i^T D_1$ donde se encuentran dos matrices desconocidas K y D_1 . Para poder disolver dicha bilinealidad, se procede a pre-multiplicar y pos-multiplicar la desigualdad (4.26) por $\begin{bmatrix} D_1^{-1} & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}$ obteniendo la siguiente desigualdad

$$\begin{bmatrix} D_1^{-1} A_i^T - D_1^{-1} K^T B_i^T + A_i D_1^{-1} - B_i K D_1^{-1} + 2\alpha D_1^{-1} & -\bar{L}_i \\ -\bar{L}_i^T & \bar{A}_i^T D_2 - \bar{C}^T N_i^T D_2 + D_2 \bar{A}_i - D_2 N_i \bar{C} + 2\alpha D_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (4.27)$$

para $i = 1, \dots, M$.

Realizando el cambio de variable $R = D_1^{-1}$ y agrupando $Q = KR$ para eliminar la bilinealidad, se obtiene la siguiente LMI

$$\begin{bmatrix} RA_i^T - Q^T B_i^T + A_i R - B_i Q + 2\alpha R & -\bar{L}_i \\ -\bar{L}_i^T & \bar{A}_i^T D_2 - \bar{C}^T N_i^T D_2 + D_2 \bar{A}_i - D_2 N_i \bar{C} + 2\alpha D_2 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

para $i = 1, \dots, M$. La cual puede ser solucionada utilizando herramientas disponibles en la literatura.

Para poder diseñar la estrategia FTC es necesario cumplir con las condiciones de observabilidad y controlabilidad definidas en las Secciones 2.3-2.2, las cuales en este caso puede ser escritas como:

- Observabilidad

$$\text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_1 \\ CA_1^2 \\ CA_1^3 \end{bmatrix} = 4, \quad \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_2 \\ CA_2^2 \\ CA_2^3 \end{bmatrix} = 4, \quad \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_3 \\ CA_3^2 \\ CA_3^3 \end{bmatrix} = 4, \quad \text{rank} \begin{bmatrix} C \\ CA_4 \\ CA_4^2 \\ CA_4^3 \end{bmatrix} = 4$$

- Controlabilidad

$$\begin{aligned} \text{rango} [B_1 \quad A_1 B_1 \quad A_1^2 B_1 \quad A_1^3 B_1] &= 4, & \text{rango} [B_2 \quad A_2 B_2 \quad A_2^2 B_2 \quad A_2^3 B_2] &= 4, \\ \text{rango} [B_3 \quad A_3 B_3 \quad A_3^2 B_3 \quad A_3^3 B_3] &= 4, & \text{rango} [B_4 \quad A_4 B_4 \quad A_4^2 B_4 \quad A_4^3 B_4] &= 4 \end{aligned}$$

Resolviendo las LMI presentadas en la ecuación (4.28) mediante el software YALMIP con una matriz $D_2 = I_n \times 10^7 \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ y una región LMI vertical de $\alpha = 1$, se obtienen las siguientes matrices:

$$D = \begin{bmatrix} 1.6161 \times 10^{08} & -2.4964 \times 10^{08} & -8.7806 \times 10^{03} & 18.4308 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2.4964 \times 10^{08} & 4.8822 \times 10^{08} & 5.0671 \times 10^{04} & -1.7690 \times 10^{03} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -8.7806 \times 10^{03} & 5.0671 \times 10^{04} & 2.7446 \times 10^{08} & -8.0554 \times 10^{03} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18.4308 & -1.7690 \times 10^{03} & -8.0554 \times 10^{03} & 1.3774 \times 10^{07} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \times 10^7 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

la cual tiene los siguientes valores propios positivos:

$$\lambda(D) = \begin{bmatrix} 1.3774 \times 10^{07} \\ 1 \times 10^{07} \\ 1 \times 10^{07} \\ 1 \times 10^{07} \\ 1 \times 10^{07} \\ 1 \times 10^{07} \\ 2.6608 \times 10^{07} \\ 2.74464 \times 10^{08} \\ 6.2322 \times 10^{08} \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Matrices (L_i) , (G_i) , (K) y (Q) .

$$L_1 = \begin{bmatrix} 2.9248 \times 10^{05} & 0 & 0 \\ 356.3182 & 0.3416 & 0 \\ 0 & 2.9248 \times 10^{05} & -4.0173 \times 10^{13} \\ 0 & 0 & 2.9248 \times 10^{05} \end{bmatrix}, L_2 = \begin{bmatrix} 2.9248 \times 10^{05} & 0 & 2.5810 \times 10^{-4} \\ 356.3182 & 0.3416 & 0 \\ 0 & 2.9248 \times 10^{05} & 0 \\ 0 & 0 & 2.9248 \times 10^{05} \end{bmatrix},$$

$$L_3 = \begin{bmatrix} 2.9248 \times 10^{05} & 0 & 0 \\ 356.3182 & 0.8348 & 0 \\ 0 & 2.9248 \times 10^{05} & -8.5636 \times 10^{13} \\ 0 & 0 & 2.9248 \times 10^{05} \end{bmatrix}, L_4 = \begin{bmatrix} 2.9248 \times 10^{05} & 0 & 0 \\ 356.3182 & 0.8348 & 0 \\ 0 & 2.9248 \times 10^{05} & 0 \\ 0 & 0 & 2.9248 \times 10^{05} \end{bmatrix},$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 & 0 \\ 0 & -6.6272 \times 10^{05} & 24.0399 \end{bmatrix}, G_2 = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 & 0 \\ 0 & -1.2218 \times 10^{06} & 44.3195 \end{bmatrix},$$

$$G_3 = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 & 0 \\ 0 & -6.6272 \times 10^{05} & 24.0399 \end{bmatrix}, G_4 = \begin{bmatrix} 51.5780 & 0 & 0 \\ 0 & -1.2218 \times 10^{05} & 44.3195 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} 21.3566 & 11.2776 & -0.0014 & -0.0014 \\ -3.0712 \times 10^{-06} & -1.2388 \times 10^{-06} & -0.0108 & -1.4939 \times 10^{-06} \end{bmatrix} y$$

$$Q = \begin{bmatrix} 6.3615 \times 10^{08} & 1.7453 \times 10^{08} & 994.9095 & -26.8926 \\ -92.0421 & -386.5661 & -2.9706 \times 10^{06} & 107.7652 \end{bmatrix}$$

4.2. Evaluación del esquema control tolerante a fallas

Los escenarios de prueba se orientan a evaluar el desempeño del esquema FTC. En la Figura 4.3 se presenta el esquema FTC donde, para fines de simulación, el bloque “T-S con falla” que fue presentado en la Figura 4.1 para el diseño del FTC, es reemplazado por el bloque “Sistema no lineal”, el cual representa el comportamiento del sistema no lineal de la CTE bajo condiciones de falla (3.2-3.5).

Las pruebas de evaluación se realizaron sobre la plataforma de simulación MATLAB, simulando condiciones de fallas en los actuadores que permiten el flujo de vapor y combustible, para varios niveles de cargas (bajas, medias y altas), en un periodo de aproximadamente 4 horas.

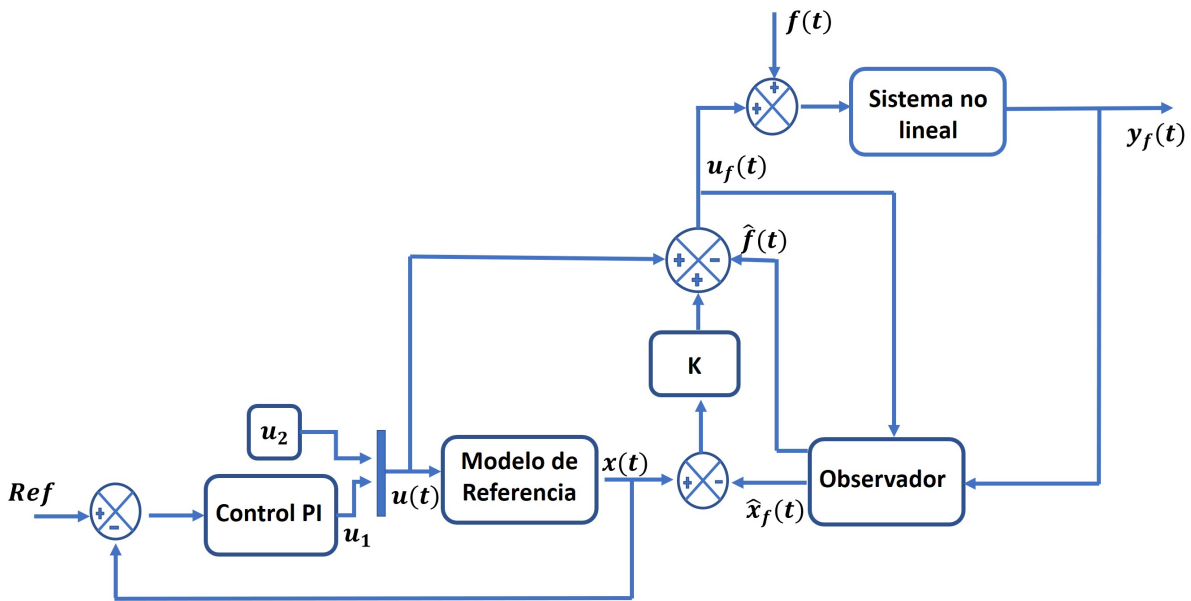


Fig. 4.3. Diagrama de bloques de un FTC basado en observador

Los escenarios de falla considerados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Escenarios de fallas en actuadores u_1 y u_2 .

Escenario 1				
Falla	Actuador	Tipo	Magnitud	Tiempo de duración (min)
f_1	u_1	Abrupta (pulso)	0.07	16.66
Escenario 2				
Falla	Actuador	Tipo	Magnitud	Tiempo de duración (min)
f_2	u_2	Abrupta (pulso)	0.1	25
Escenario 3				
Falla	Actuador	Tipo	Magnitud	Tiempo de duración (min)
f_1	u_1	Incipiente (rampa)	0.02	66.66
Escenario 4				
Falla	Actuador	Tipo	Magnitud	Tiempo de duración (min)
f_2	u_2	Incipiente (rampa)	0.06	41.66
Escenario 5				
Falla	Actuador	Tipo	Magnitud	Tiempo de duración (min)
f_1	u_1	Abrupta (pulso)	0.08	25
f_2	u_2	Abrupta (pulso)	0.09	25

4.2.1. Primer escenario falla: Falla abrupta en u_1

En el primer escenario de fallas propuesto, se considera que existe una falla debido a la falta de hermeticidad dentro de la cámara lo cual genera corrosión dentro de ella, esto provoca un atascamiento abrupto del actuador, ocurrido en el minuto 133.33 y desapareciendo en el minuto 150 con una magnitud de 0.07 lo cual equivale a un 14 % aproximadamente de su rango de medición. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones iniciales del PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$ y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las Figuras (4.4 - 4.9).

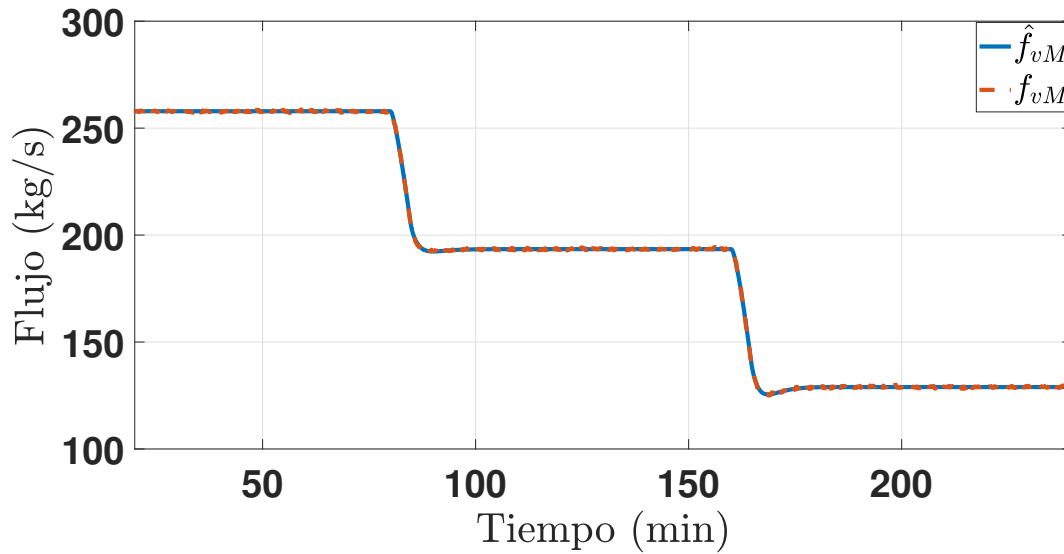


Fig. 4.4. Escenario 1: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

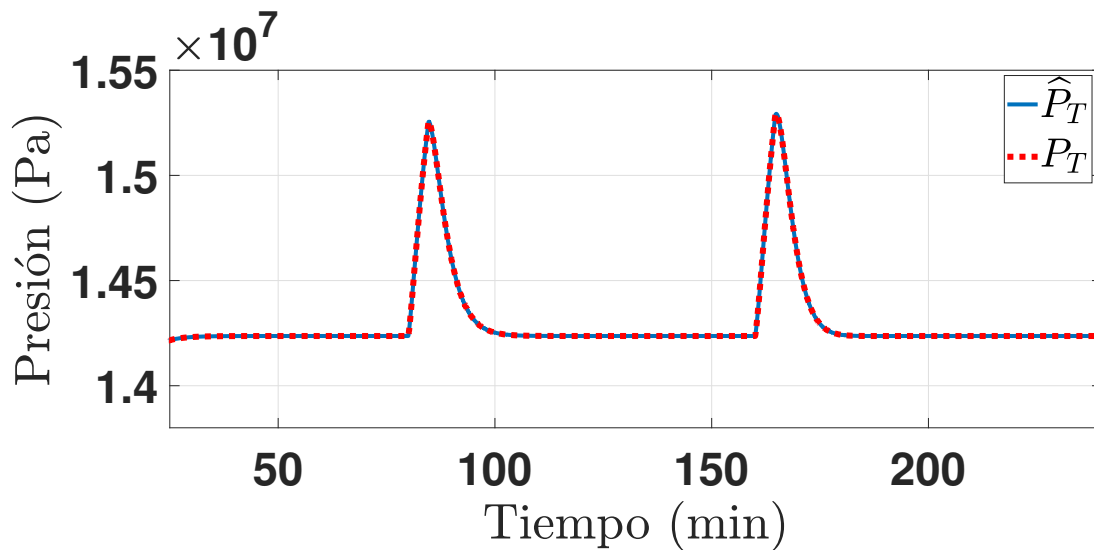


Fig. 4.5. Escenario 1: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

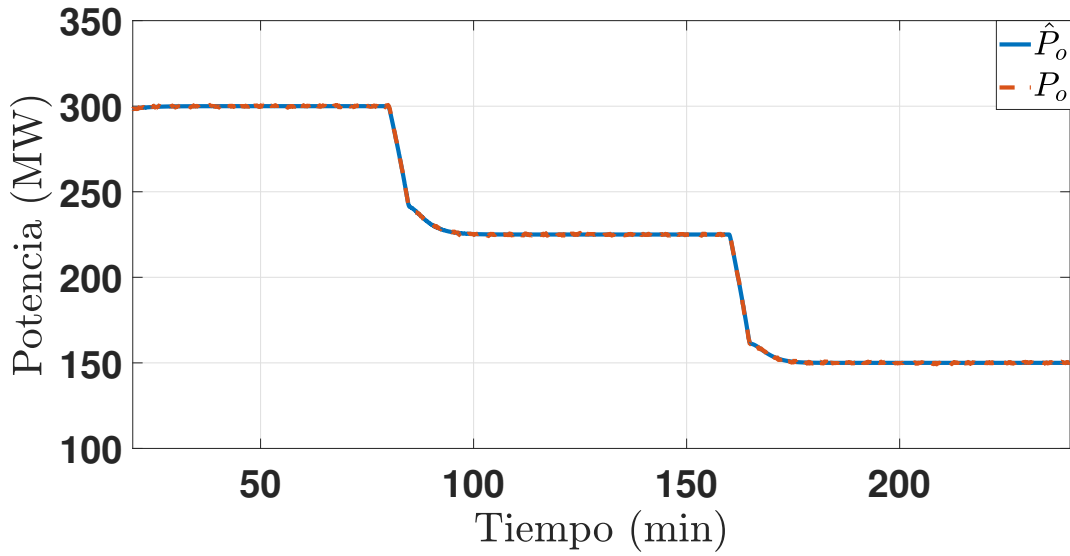


Fig. 4.6. Escenario 1: P_o potencia eléctrica.

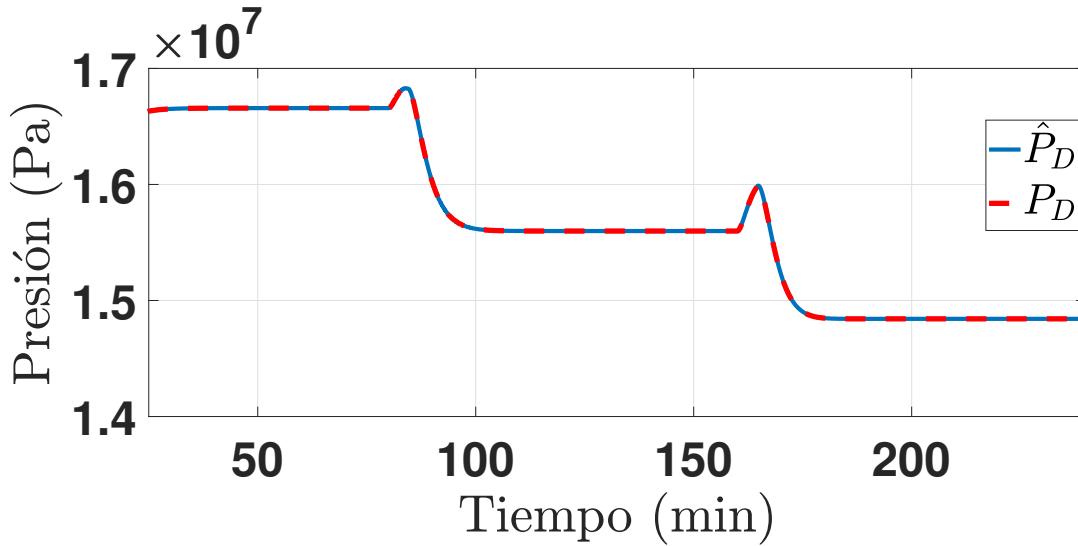


Fig. 4.7. Escenario 1: P_D presión del domo

En las Figuras (4.4 - 4.7) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacia las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de falla abrupta en el actuador u_1 . El seguimiento de trayectoria es excepcional aun con presencia de falla en el actuador.

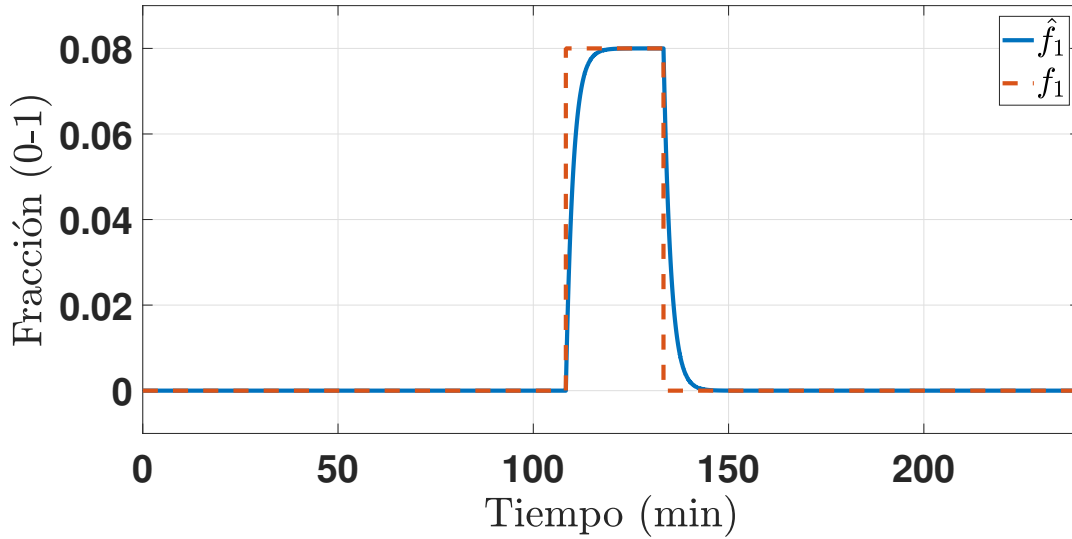


Fig. 4.8. Escenario 1: Magnitud de la falla en el actuador y su estimación

La estimación de la falla del actuador se presenta en la Figura (4.8), en donde se puede observar que el PIO logra estimar la falla abrupta ocurrida en actuador.

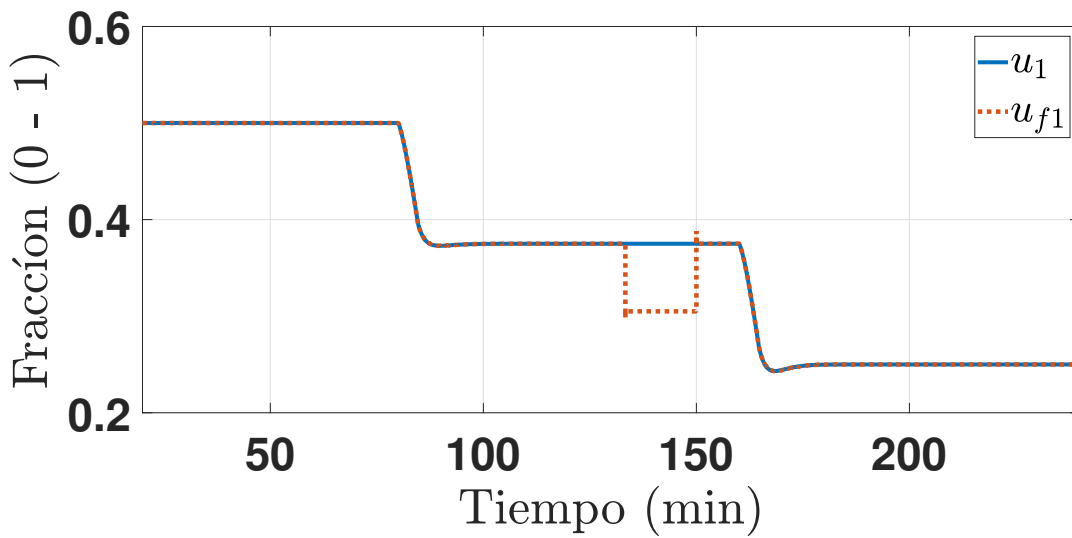


Fig. 4.9. Escenario 1: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.

En la Figura (4.9) se presenta la entrada deseada del modelo de referencia T-S representada por la línea azul y la entrada del control otorgada por la ley de FTC representada por la línea punteada

roja, en la cual se observa que el minuto 133.33 la ley de control comienza a realizar el acomodo de la falla en el actuador u_1 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación.

4.2.2. Segundo escenario de falla: Falla abrupta en u_2

En el segundo escenario de fallas propuesto, se considera que existe una falla debido a la falta de hermeticidad dentro de la cámara lo cual genera corrosión dentro de ella, esto provoca un atascamiento abrupto del actuador, ocurrido en el minuto 100 y desapareciendo en el minuto 125 con una magnitud de 0.1 lo cual equivale a un 12.5 % aproximadamente de su rango de medición. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones iniciales del observador PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$ y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las figuras (4.10 - 4.15).

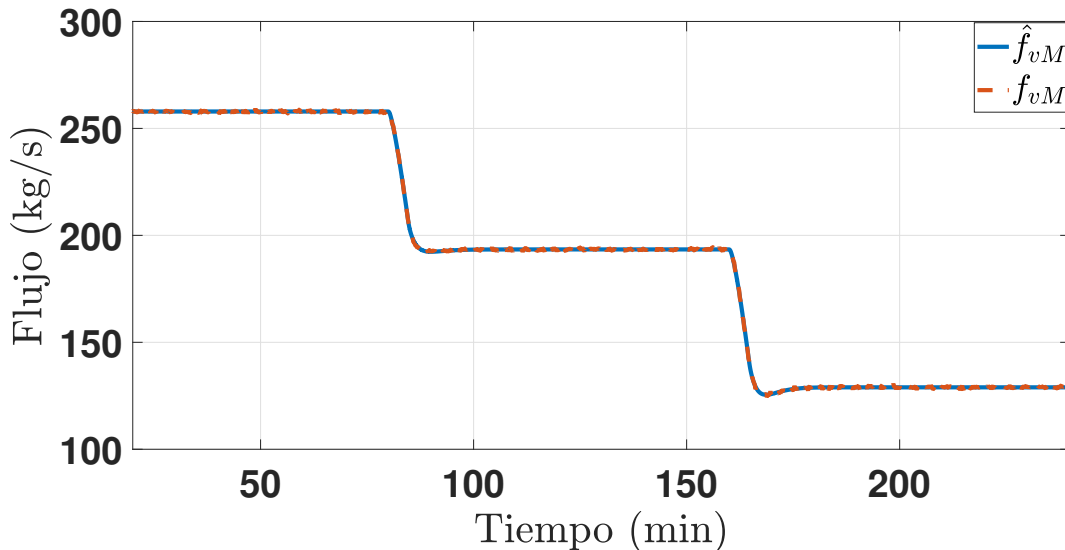


Fig. 4.10. Escenario 2: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

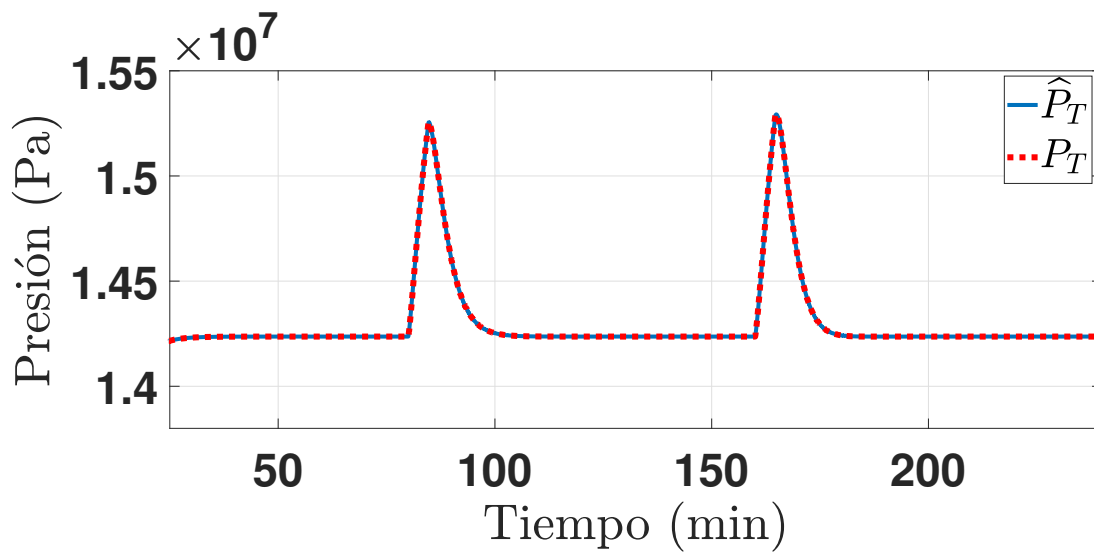


Fig. 4.11. Escenario 2: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

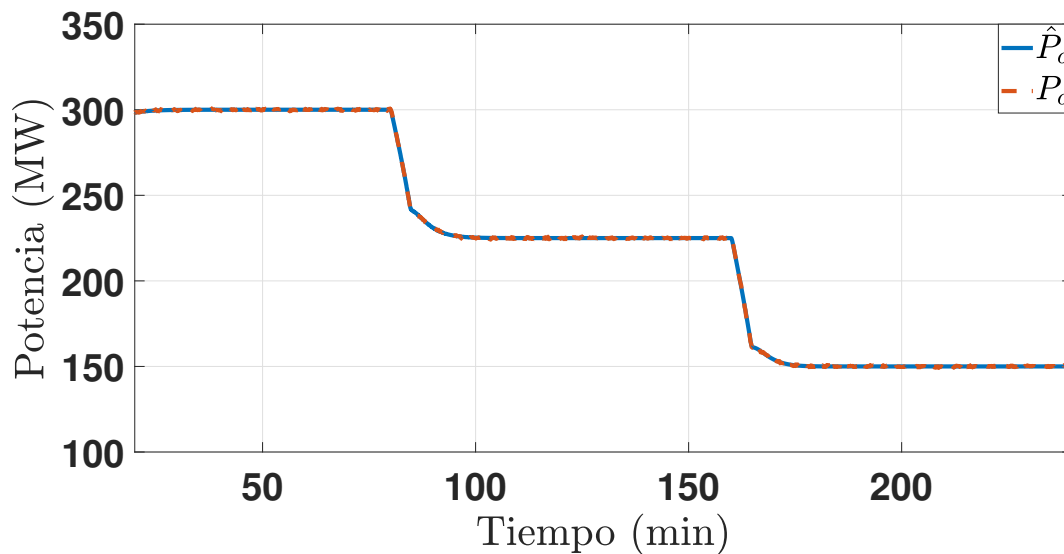


Fig. 4.12. Escenario 2: P_o potencia eléctrica.

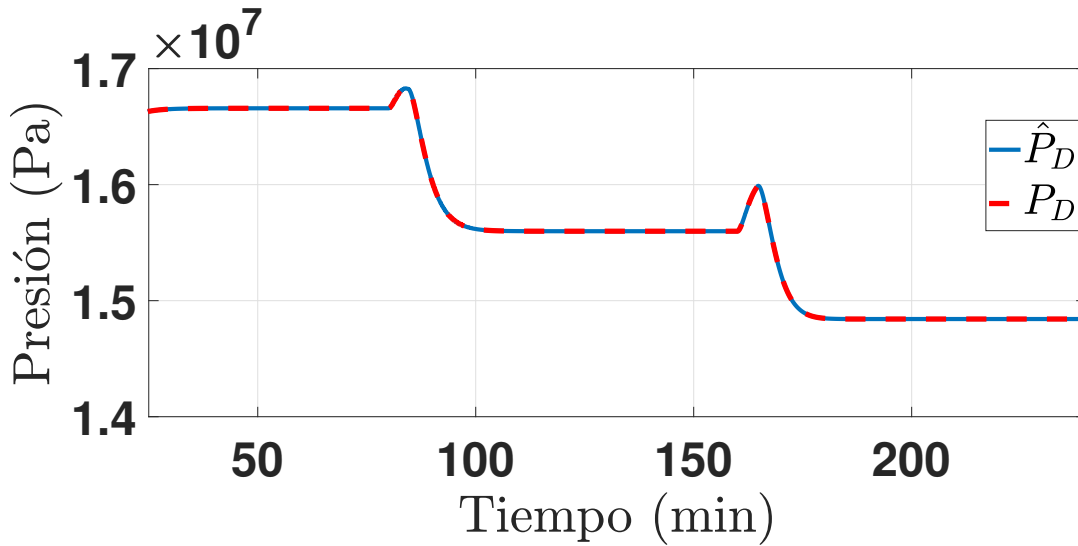


Fig. 4.13. Escenario 2: P_D presión del domo

En las Figuras (4.10 - 4.13) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacia las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de falla abrupta en el actuador u_2 . El seguimiento de trayectoria es excepcional aun con presencia de falla en el actuador.

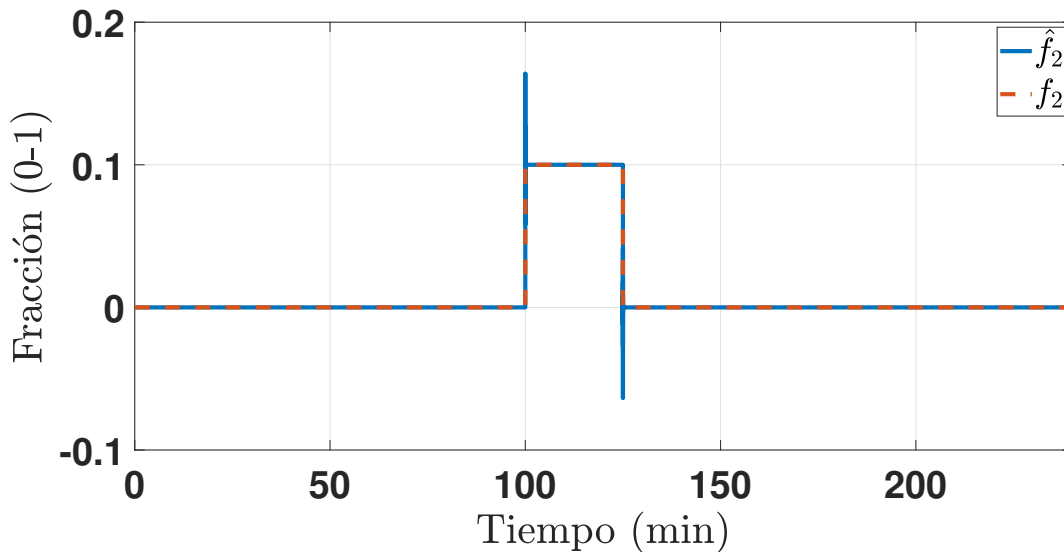


Fig. 4.14. Escenario 2: Falla en el actuador y su estimación

La estimación de la falla del actuador se presenta en la Figura (4.14), en donde se puede observar que el PIO logra estimar la falla abrupta ocurrida en actuador.

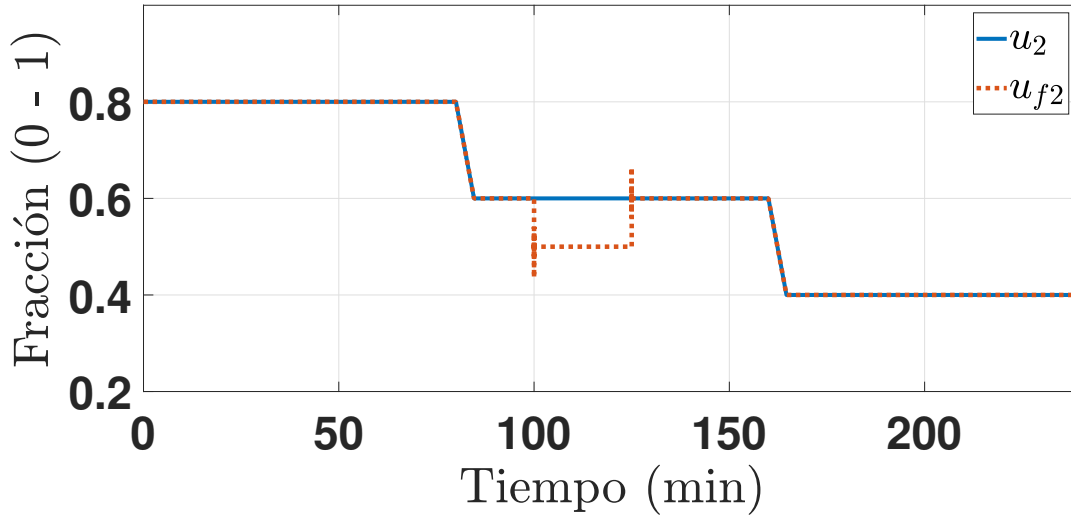


Fig. 4.15. Escenario 2: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.

En la Figura (4.15) se presenta la entrada deseada del modelo de referencia T-S representada por la línea azul y la entrada del control otorgada por la ley de FTC representada por la línea punteada roja, en la cual se observa que el minuto 100 la ley de control comienza a realizar el acomodo de la falla en el actuador u_2 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación.

4.2.3. Tercer escenario de falla: Falla incipiente en u_1

En el tercer escenario de falla propuesto, se considera que existe una falla debido a la ruptura del filtro de la válvula, donde la función del filtro es evitar el paso de residuos hacia la cámara del actuador, esto provoca que en el asiento del actuador se vaya almacenando suciedad, lo cual conlleva a la presencia de grietas en la base del actuador, ocurrido la falla en el minuto 100 y alcanzando un punto de saturación en el minuto 166.66 con una magnitud de 0.02 lo cual equivale a un 4% aproximadamente de su rango de medición. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones iniciales del observador PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$ y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las figuras (4.16 - 4.21).

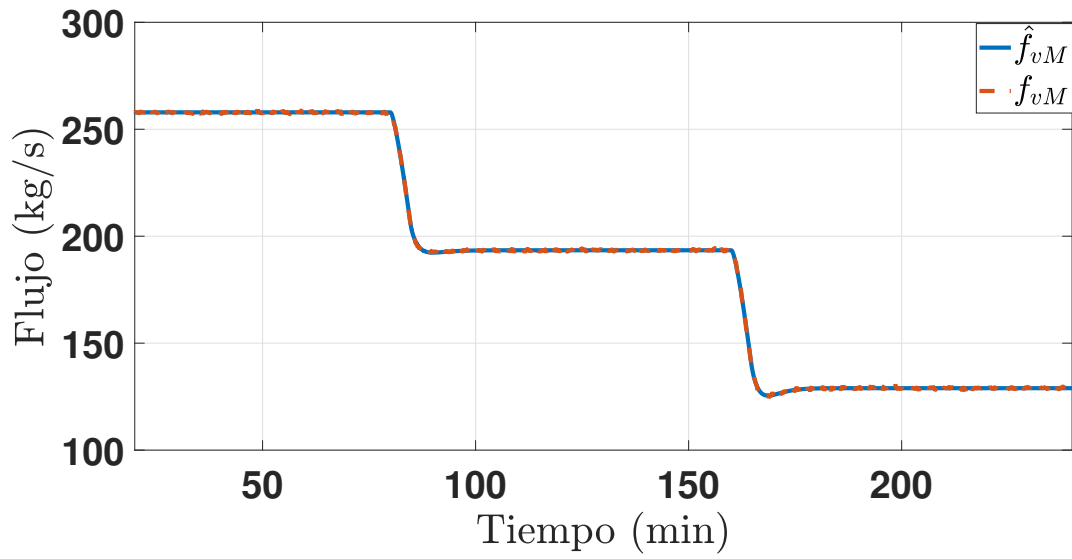


Fig. 4.16. Escenario 3: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

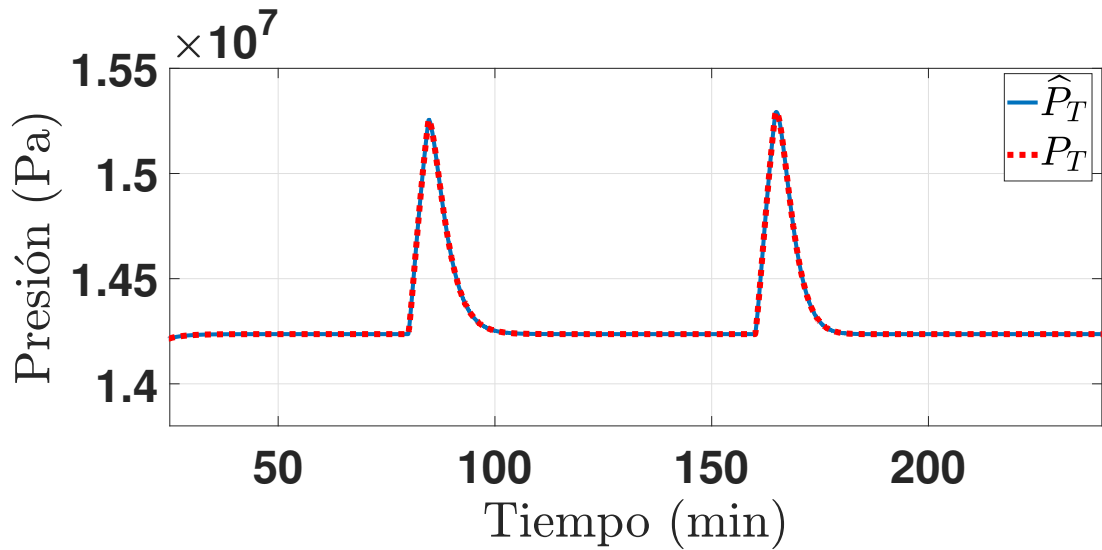


Fig. 4.17. Escenario 3: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

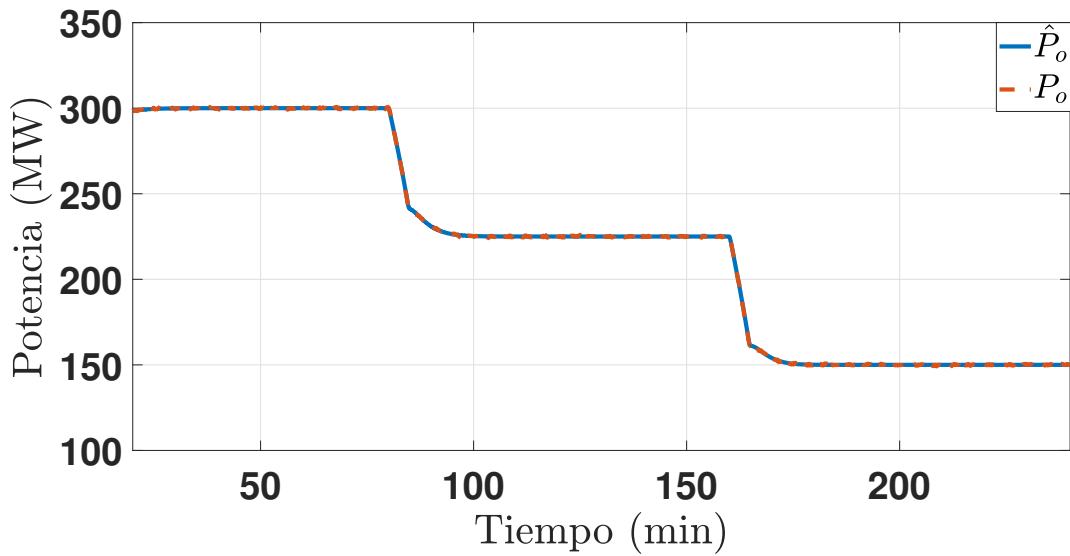


Fig. 4.18. Escenario 3: P_o potencia eléctrica.

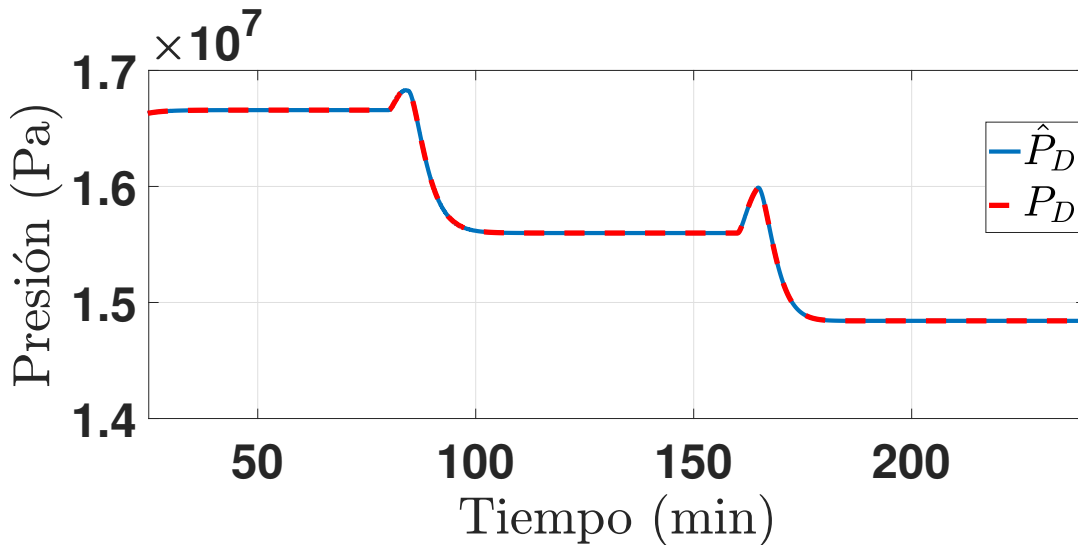


Fig. 4.19. Escenario 3: P_D presión del domo

En las Figuras (4.16 - 4.19) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacia las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de falla incipiente en el actuador u_1 . El seguimiento de trayectoria es excepcional aun con presencia de falla en el actuador.

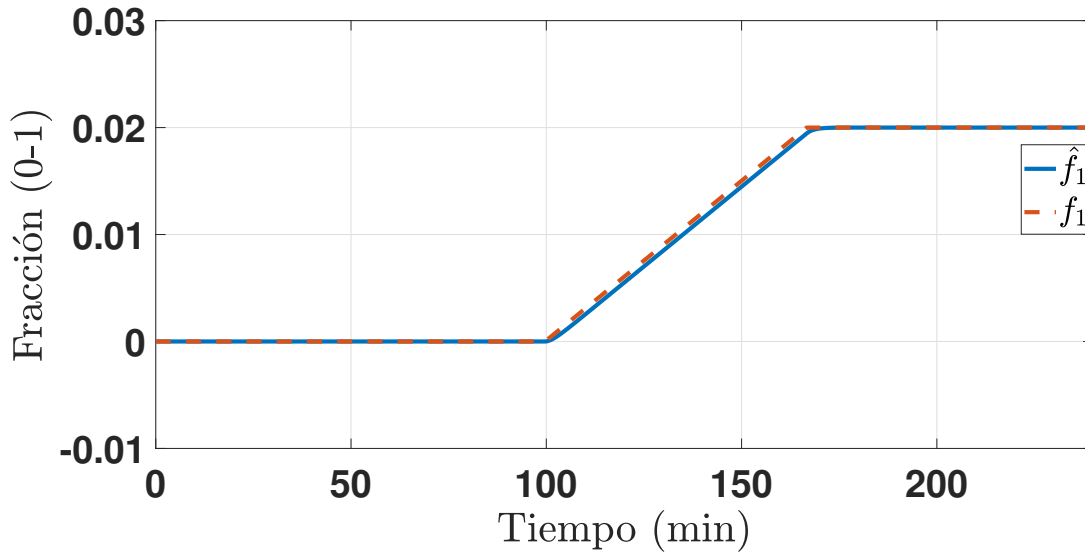


Fig. 4.20. Escenario 3: Falla en el actuador y su estimación

La estimación de la falla del actuador se presenta en la Figura (4.20), en donde se puede observar que el PIO logra estimar la falla incipiente ocurrida en actuador.

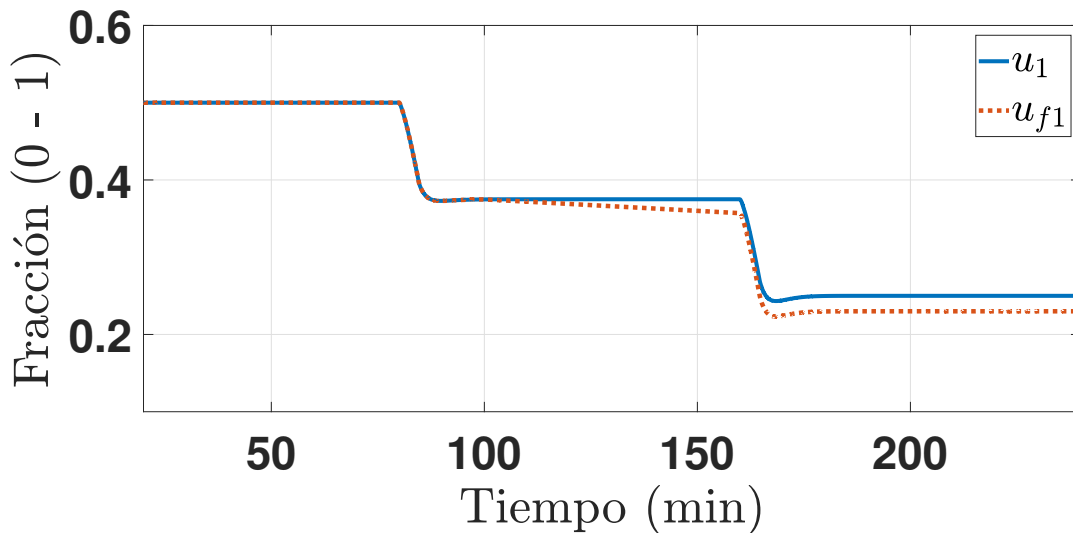


Fig. 4.21. Escenario 3: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.

En la Figura (4.21) se presenta la entrada deseada del modelo de referencia T-S representada por la línea azul y la entrada del control otorgada por la ley de FTC representada por la línea punteada roja, en la cual se observa que el minuto 100 la ley de control comienza a realizar el acomodo de

la falla en el actuador u_1 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación.

4.2.4. Cuarto escenario de falla: Falla incipiente en u_2

En el cuarto escenario de falla propuesto, se considera que existe una falla debido a la ruptura del filtro de la válvula, donde la función del filtro es evitar el paso de residuos hacia la cámara del actuador, esto provoca que en el asiento del actuador se vaya almacenando suciedad, lo cual conlleva a la presencia de grietas en la base del actuador, ocurrido la falla en el minuto 100 y alcanzando un punto de saturación en el minuto 141.66 con una magnitud de 0.06 lo cual equivale a un 7.5% aproximadamente de su rango de medición. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones iniciales del observador PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$ y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las figuras (4.22 - 4.27).

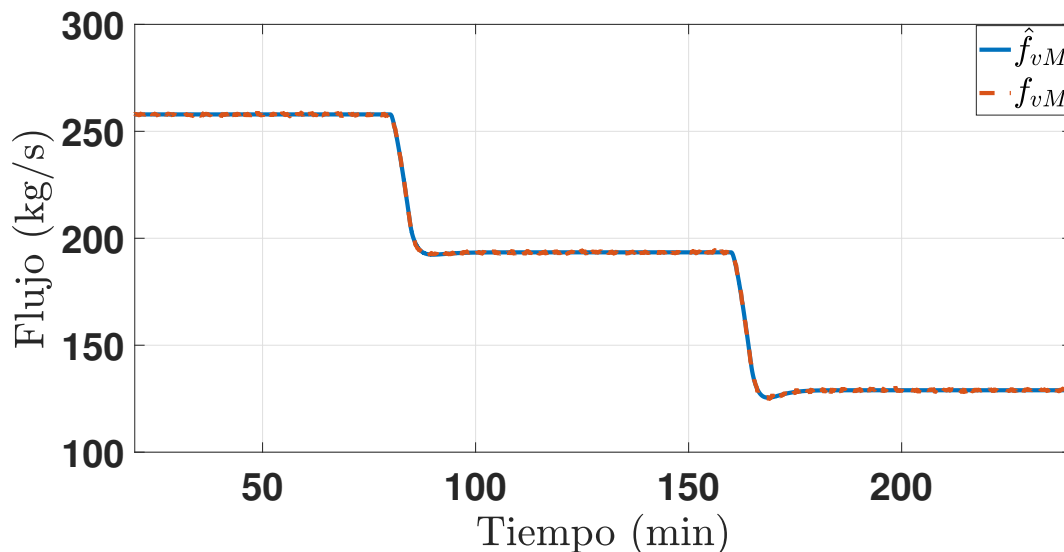


Fig. 4.22. Escenario 4: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

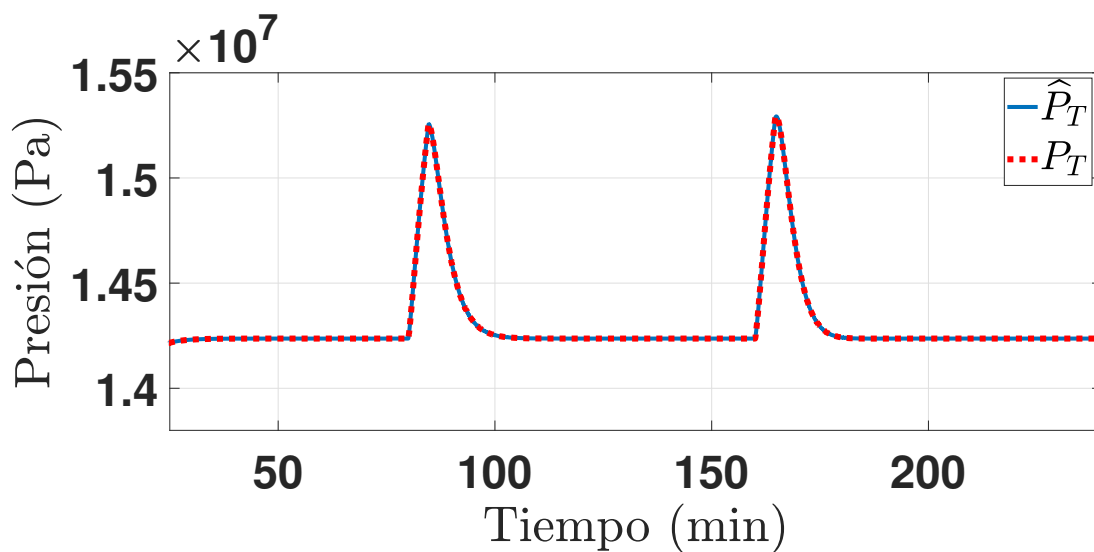


Fig. 4.23. Escenario 4: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

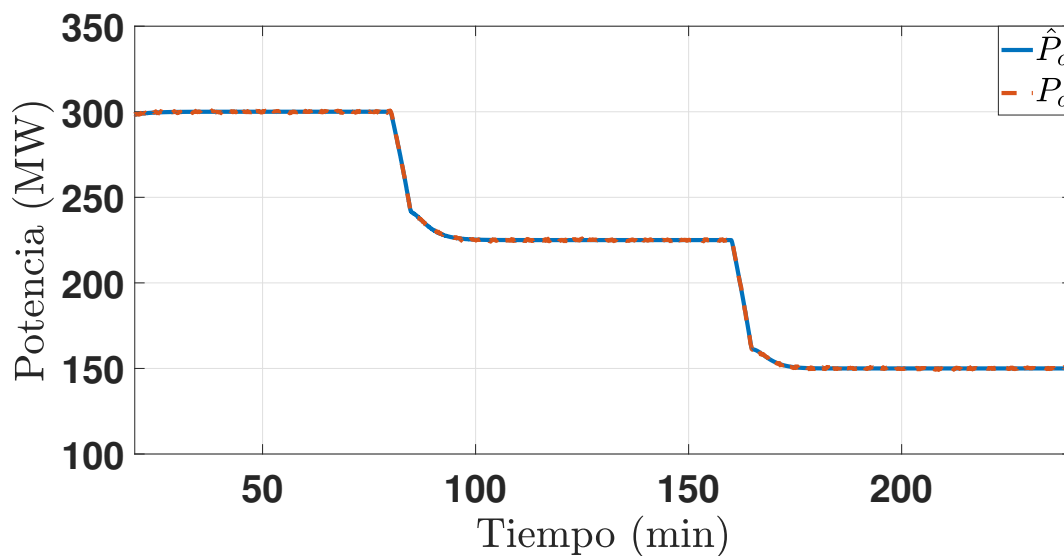


Fig. 4.24. Escenario 4: P_o potencia eléctrica.

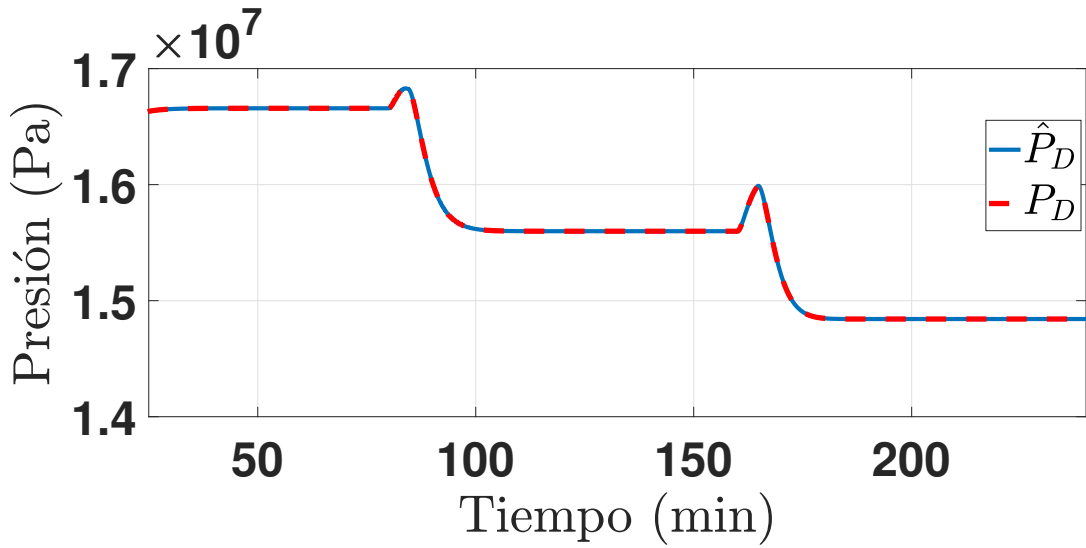


Fig. 4.25. Escenario 4: P_D presión en el domo

En las Figuras (4.22 - 4.25) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacía las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de falla incipiente en el actuador u_2 . El seguimiento de trayectoria es excepcional aun con presencia de falla en el actuador.

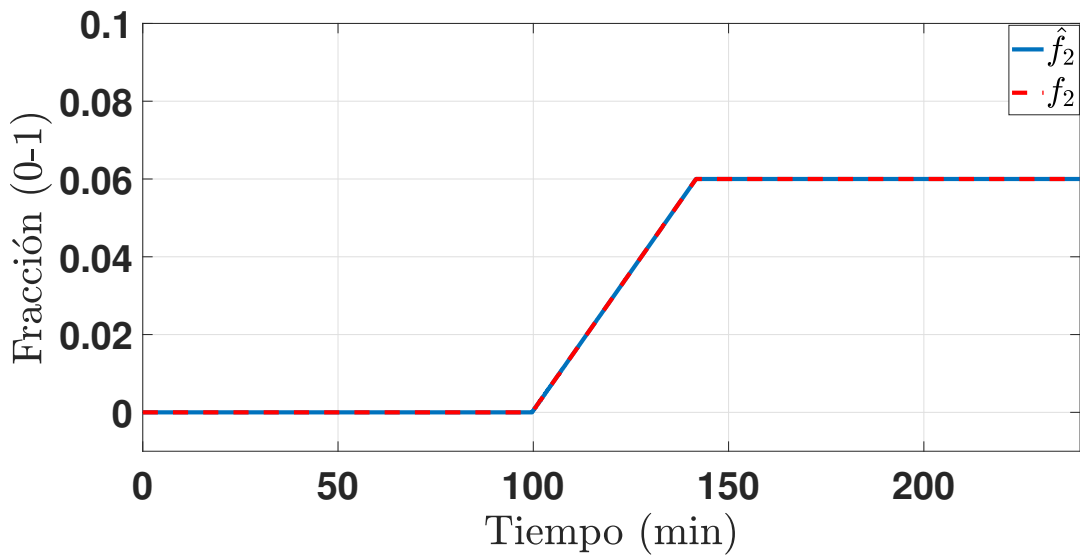


Fig. 4.26. Escenario 4: Falla en el actuador y su estimación

La estimación de la falla del actuador se presenta en la Figura (4.26), en donde se puede observar que el PIO logra estimar la falla incipiente ocurrida en actuador.

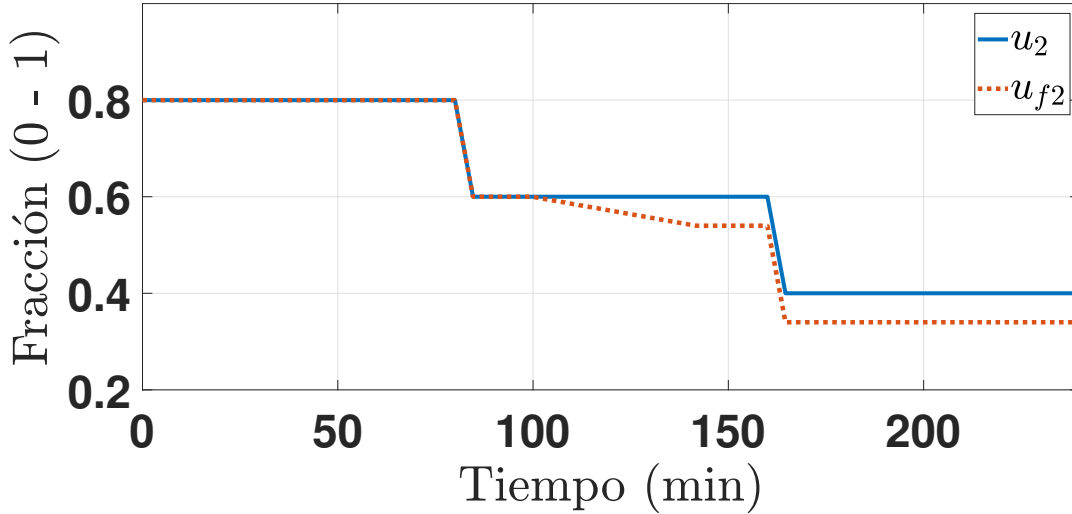


Fig. 4.27. Escenario 4: Entrada del modelo de referencia y ley FTC.

En la Figura (4.27) se presenta la entrada deseada del modelo de referencia T-S representada por la línea azul y la entrada del control otorgada por la ley de FTC representada por la línea punteada roja, en la cual se observa que el minuto 100 la ley de control comienza a realizar el acomodo de la falla en el actuador u_2 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación.

4.2.5. Quinto escenario de falla: Fallas simultaneas tipo abruptas en u_1 y u_2

En el quinto escenario de fallas propuesto, se considera que existe una falla en cada actuador del sistema, debido a la falta de hermeticidad dentro de la cámara lo cual genera corrosión dentro de ella, esto provoca un atascamiento abrupto de cada actuador, donde la falla f_1 en el actuador u_1 ocurre en el minuto 108.33 y desaparece en el minuto 133.33, con una magnitud de 0.08 lo cual equivale a un 16% aproximadamente de su rango de medición. Mientras que la falla f_2 en el actuador u_2 ocurre en el minuto 100 y desaparece en el minuto 125, con una magnitud de 0.09 lo cual equivale a un 11.25% aproximadamente de su rango de medición. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones iniciales del PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$

y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las figuras (4.28-4.35).

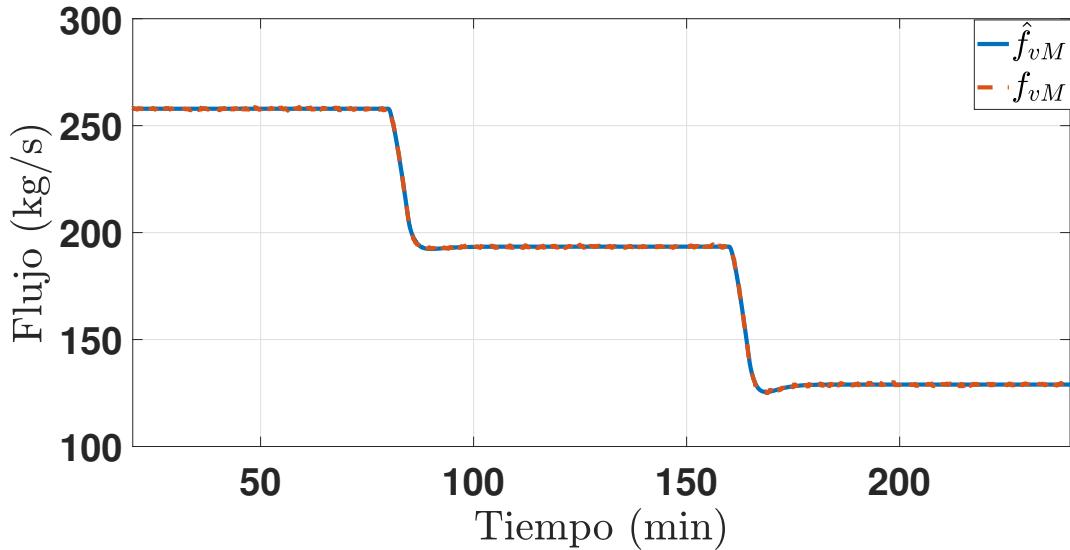


Fig. 4.28. Escenario 5: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

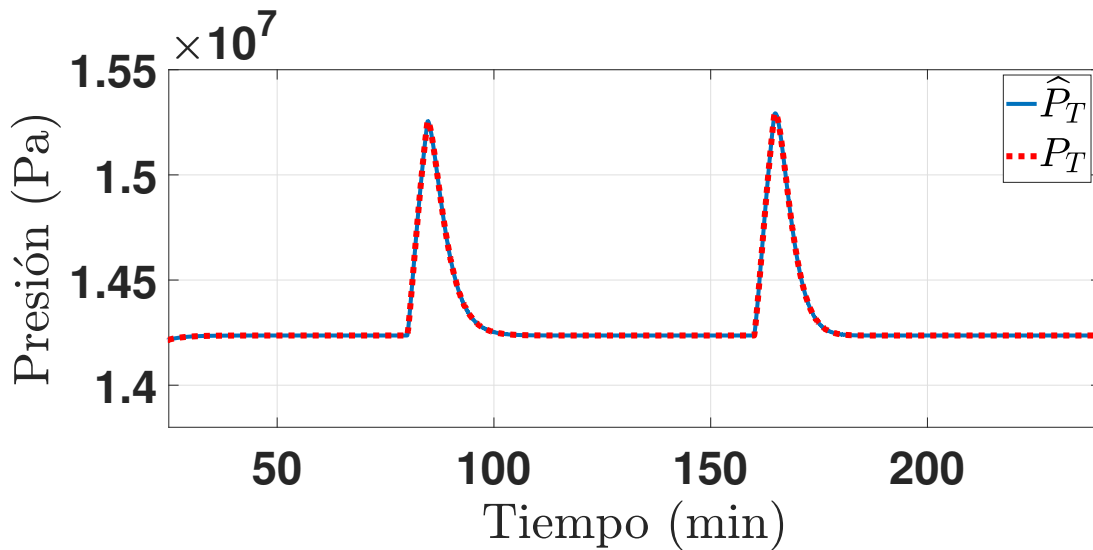


Fig. 4.29. Escenario 5: P_T presión de vapor sobre calentado en la entrada de la turbina.

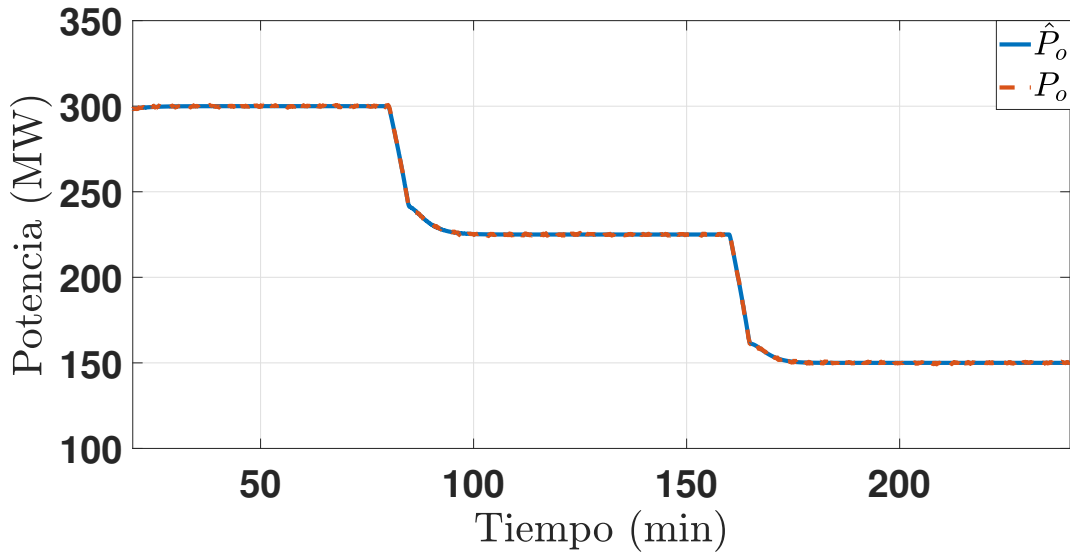


Fig. 4.30. Escenario 5: P_o potencia eléctrica.

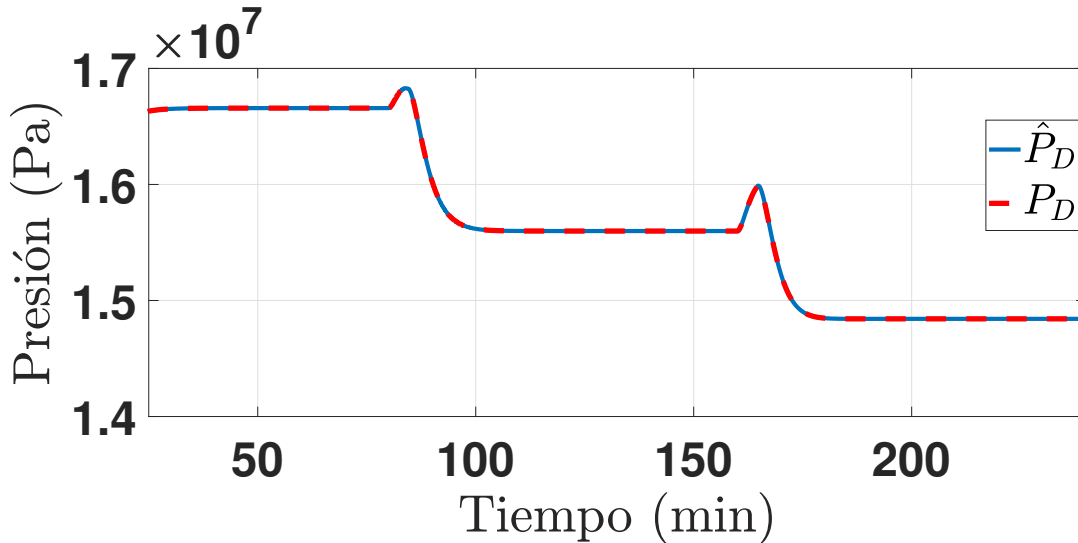


Fig. 4.31. Escenario 5: P_D presión en el domo

En las Figuras (4.28 - 4.31) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacia las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de fallas abruptas en los actuadores u_1 y u_2 . El seguimiento de trayectoria es excepcional aun con presencia de falla en el actuador.

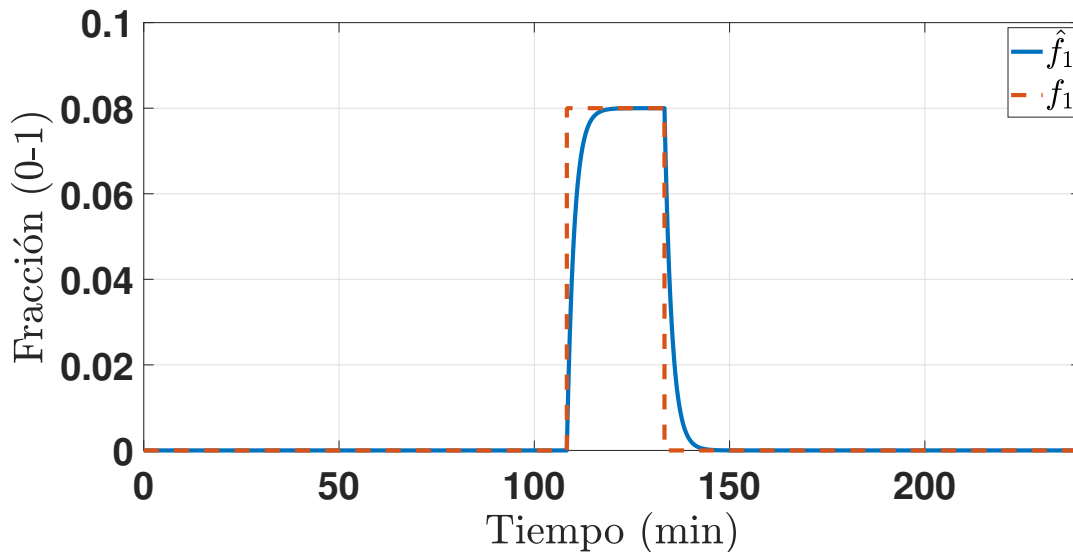


Fig. 4.32. Escenario 5: Falla en el actuador u_1 y su estimación.

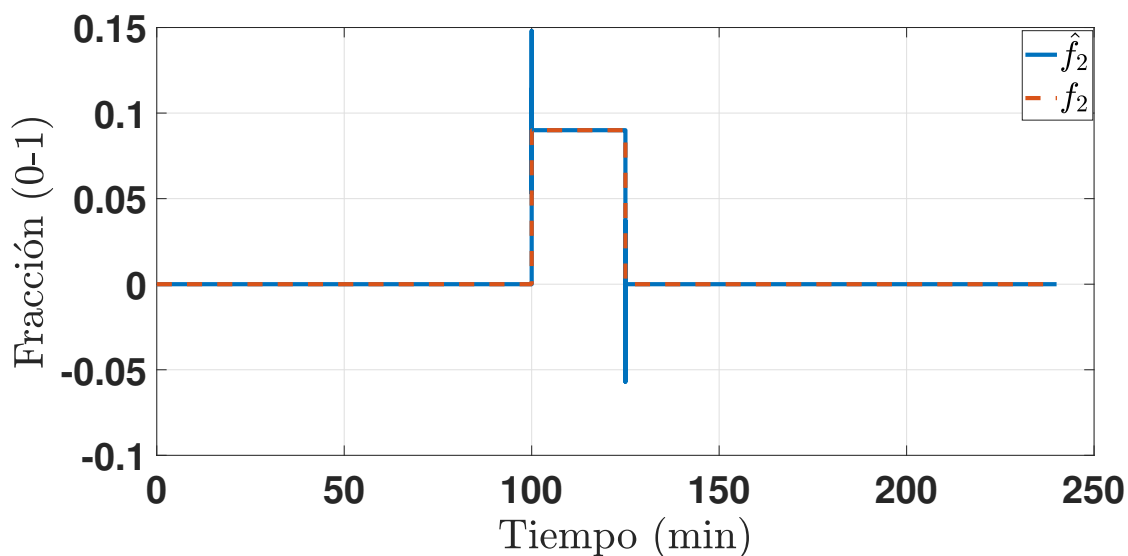


Fig. 4.33. Escenario 5: Falla en el actuador u_2 y su estimación.

Las estimaciones de las fallas en los actuadores se presentan en las Figura (4.32-4.33), en donde se puede observar que el PIO logra estimar las fallas abruptas ocurridas en los actuadores.

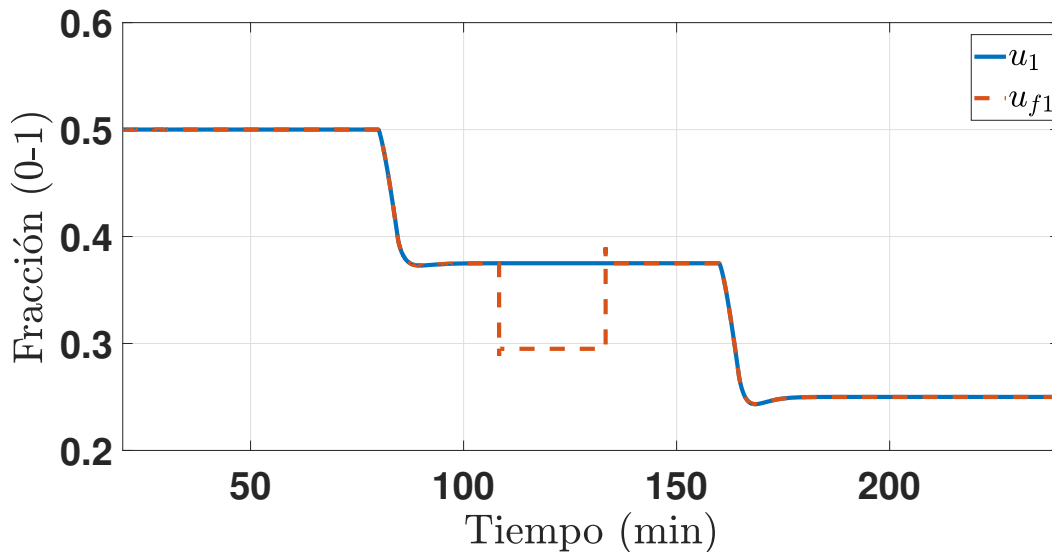


Fig. 4.34. Escenario 5: Entrada u_1 del modelo de referencia y la ley FTC otorgada.

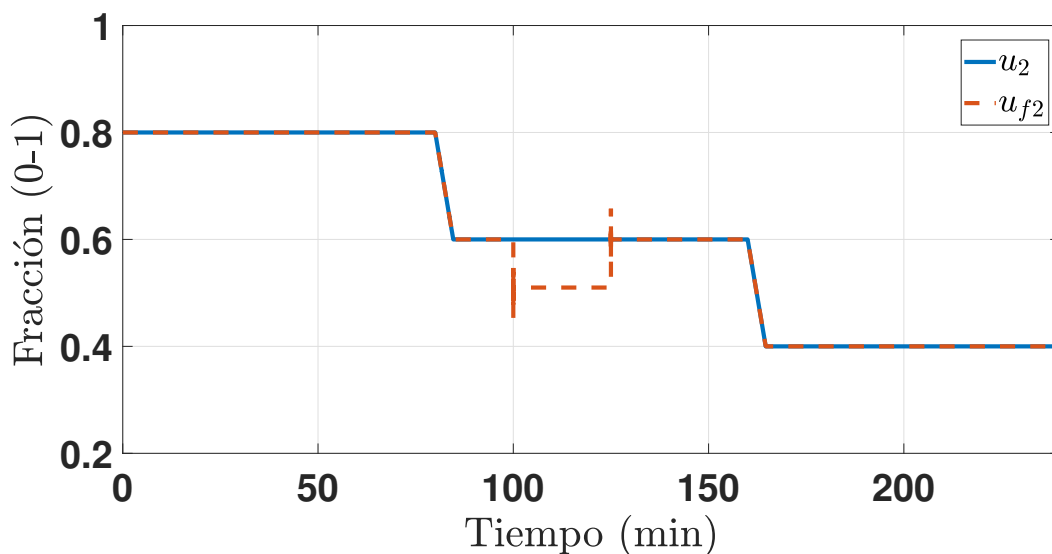


Fig. 4.35. Escenario 5: Entrada u_2 del modelo de referencia y la ley FTC otorgada.

En las Figuras (4.34-4.35) se presentan las entradas deseadas del modelo de referencia T-S representadas por las líneas azules y las entradas del control otorgada por la ley de FTC representadas por las líneas punteadas rojas. En la Figura (4.34) se observa que en el minuto 108.33 la ley de

control comienza a realizar el acomodo de la falla en el actuador u_1 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación. De la misma manera ocurre en el actuador u_2 , donde en la Figura (4.35) se observa que en el minuto 100 la ley de control comienza a realizar el acomodo de la falla en el actuador u_2 , y así mantener las variables de salida sin ninguna perturbación.

4.3. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó el diseño de un esquema FTC activo en el cual se consideró el diseño de una ley de control que se alimenta de la estimación de fallas. También se diseñó un observador proporcional integral que brinda la estimación de estados y fallas. Así mismo se presentó el estudio de la estabilidad y convergencia del esquema FTC. Para validar la robustez del esquema FTC, se analizaron los resultados obtenidos de los 5 escenarios de fallas, en los cuales se consideraron fallas abruptas e incipientes de diferente magnitud. Los resultados obtenidos en los distintos escenarios de fallas, fueron sobresalientes, ya que la estrategia FTC propuesta, logro compensar la falla en todo momento

Capítulo 5

Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se estudió el funcionamiento de las centrales termoeléctricas y cada uno de sus componentes que la conforman. Se realizó el diseño de un sistema de control para la variable de presión en la entrada de la turbina (P_T), debido a la seguridad del sistema.

Se propuso un modelo reducido de una central termoeléctrica, este modelo representa el comportamiento dinámico de las variables de presión en el domo (P_D), presión de vapor sobrecalentado en la entrada de la turbina (P_T), flujo de vapor mezcla agua-vapor (f_{vM}) y potencia eléctrica (P_o), en un rango amplio de operación de la central. El modelo no lineal reducido es utilizado para el diseño de un sistema Takagi-Sugeno, la representación Takagi-Sugeno está compuesta por cuatro submodelos o modelos locales, los cuales representan de manera adecuada el comportamiento dinámico del modelo no lineal reducido.

Se presenta el diseño de un observador PO para realizar la tarea de monitoreo de variables de estado, en donde se propone un sistema T-S en el cual no se tiene la información de todas las salidas. Es por ello que el observador PO se encarga de recopilar la información necesaria para estimar la variable de estado no medible.

Se presenta el diseño de una ley de control, la cual se alimenta de la estimación de fallas y de las entradas del sistema de referencia. Posteriormente, se estudia la estabilidad del esquema FTC y se realiza el análisis de estabilidad de un sistema FTC para sistemas T-S. Para lograr la estimación de fallas y estados del esquema FTC se implementó el diseño de un observador PIO, el cual es

usado como un sistema FDI para detectar e identificar los cambios inducidos por las fallas en los actuadores.

Para comprobar la efectividad del esquema FTC ante la compensación de fallas, se analizan los resultados obtenidos ante los diferentes escenarios de fallas considerando fallas abruptas e incipientes de diferente magnitud para observar la capacidad del esquema de compensación de fallas. Los resultados de las simulaciones muestran que el esquema FTC es capaz de compensar las fallas abruptas e incipientes que se presentan en los actuadores del modelo no lineal reducido de una CTE y así mantener un comportamiento ideal.

La principal contribución de este trabajo de tesis fue demostrar que el esquema FTC propuesto es factible de ser implementado en una CTE, para la compensación de fallas en los actuadores de flujo de combustible y flujo de vapor principal, contribuyendo a una operación factible y segura de una CTE.

5.1. Trabajos futuros

A partir de este trabajo realizado, se pueden generar otros trabajos como:

1. Considerar el diseño del esquema de FTC ante escenarios de perturbaciones, ruido u otras señales que modifiquen el comportamiento del sistema.
2. Análisis y aplicación del esquema FTC en un modelo matemático más complejo de una central termoeléctrica.
3. Validación del esquema FTC propuesto con resultados experimentales.

Anexo A

Ajustes de parámetros de simulación Matlab solver.

- Solvers:

Simulink provee un conjunto de diferentes métodos para resolver la simulación. Debido a la diversidad de modelos de sistemas dinámicos, algunos de estos métodos responden de manera más eficientes que otros para cada caso en particular. Simulink presenta dos grupos de métodos de resolución:

1. Variable-step:

Son aquellos que modifican automáticamente el tamaño del paso durante la simulación; a su vez, proveen control de error y detección de cruces por cero.

2. Fixed-step:

Mantienen el tamaño del paso de integración a través de toda la simulación y contrariamente a los métodos de paso variable, estos no proveen control de error y detección de cruces por cero.

A.1. Métodos de Paso Variable (Variable-step Solvers)

- ode45

Este es el método por defecto si simulink detecta que el modelo es de estado continuo. El ode45 es un método de un solo paso basado en la fórmula de Runge-Kutta de orden 4 y 5. En general este

método arroja resultados satisfactorios para la mayoría de los modelos continuos y resulta ser un bueno como primera aproximación cuando no se conoce mucho del sistema en estudio.

- ode23

Es un método de un solo paso basado en la fórmula de Runge-Kutta (2,3). Este método resulta más eficiente que el ode45 cuando las tolerancias del error no son tan exigentes y el modelo presenta un leve grado de rigidez.

- ode113

Es un método multipaso de orden variable de Adams-Bashforth-Moulton. Puede resultar más eficiente que ode45 cuando las tolerancias del error se tornan muy exigentes.

- ode15s

Es un método multipaso de orden variable basado en fórmulas de diferenciación numérica (NDFs). Si bien las NDFs están relacionadas con las fórmulas de diferenciación por atraso (DBFs o método de Gear), estas NDFs son mucho más eficientes. Este método es recomendable si el modelo es stiff o bien el ode45 falla o resulta muy lento. El orden de este método puede variar entre uno y cinco. Cuando mayor es el orden del método, si bien mayor será la precisión de los cálculos efectuados, puede que el mismo resulte inestable. Por tal motivo, si el modelo es stiff y requiere mayor estabilidad es aconsejable reducir el orden a dos o usar ode23s. La opción para modificar el orden de este método está disponible desde la ventana del solver una vez que ode15s fue seleccionado.

- ode23s

Es un método basado en la formula modificada de Rosenbrock de segundo orden. Al ser un método de un solo paso puede en algunos casos ser más eficiente que ode15s cuando las tolerancias no sean muy exigentes.

- discrete

Es el método por defecto que elige simulink cuando detecta un modelo de estado discreto.

A.2. Configuración solver del programa

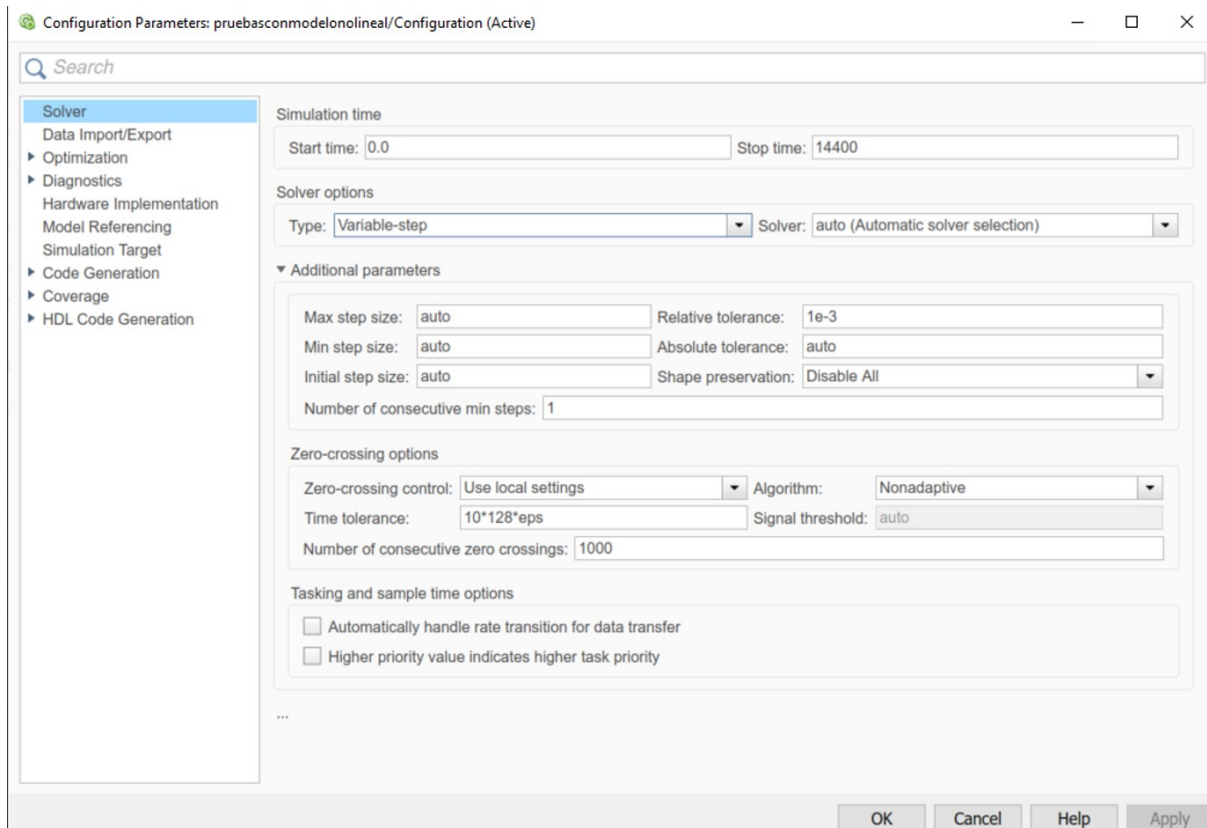


Fig. A.2.1.

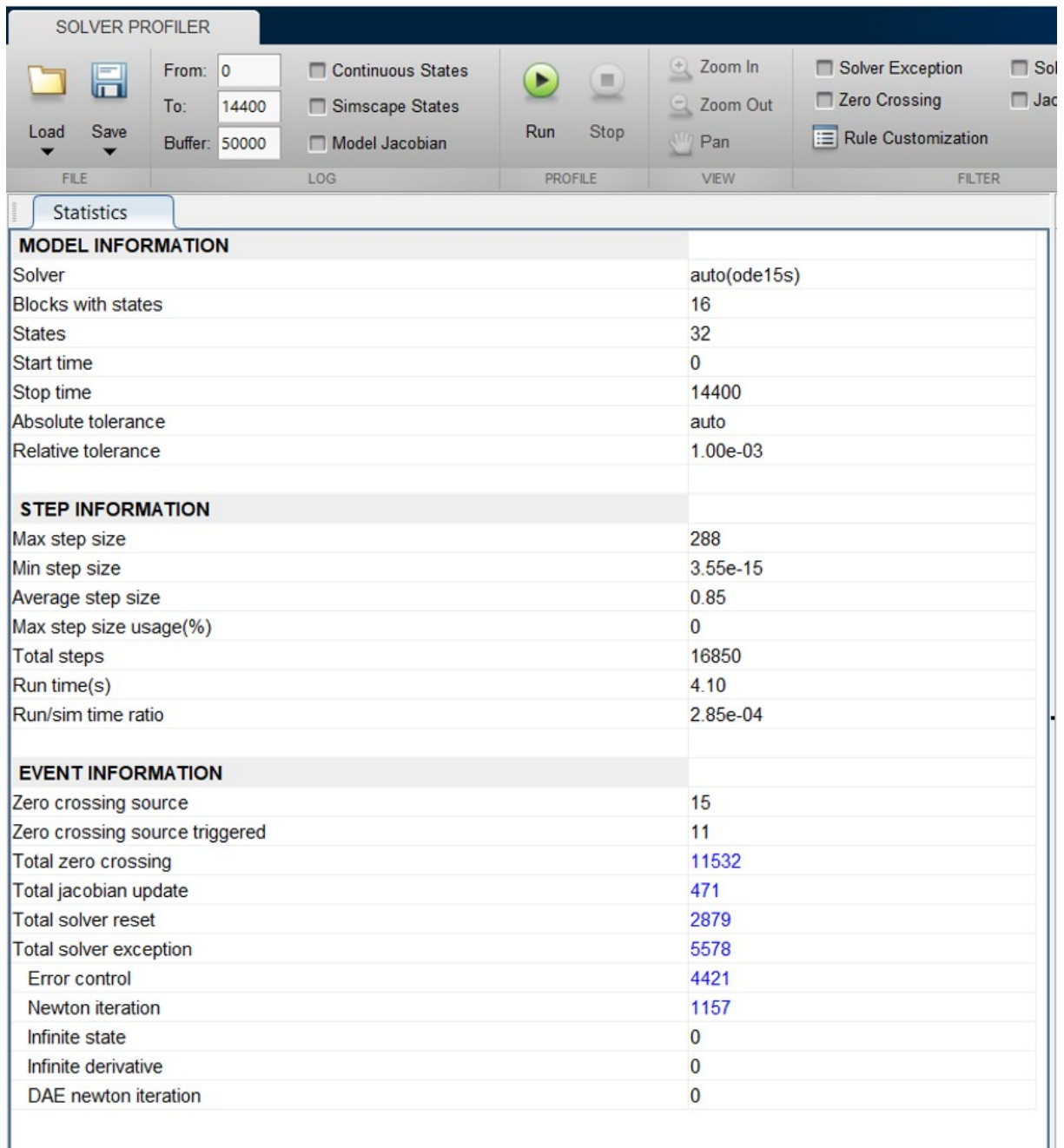


Fig. A.2.2.

Anexo B

Prueba con perturbación.

B.1. Perturbación en la variable de salida f_{vM}

En esta sección se presenta la evaluación de la estrategia FTC ante la perturbación de una de las salidas del sistema f_{vM} , tal y como se muestra en la Figura (B.1.1), en la cual se considera una perturbación en el flujo de vapor con magnitud de 20 kg/s. Para este escenario el sistema se encuentra libre de falla en los actuadores.

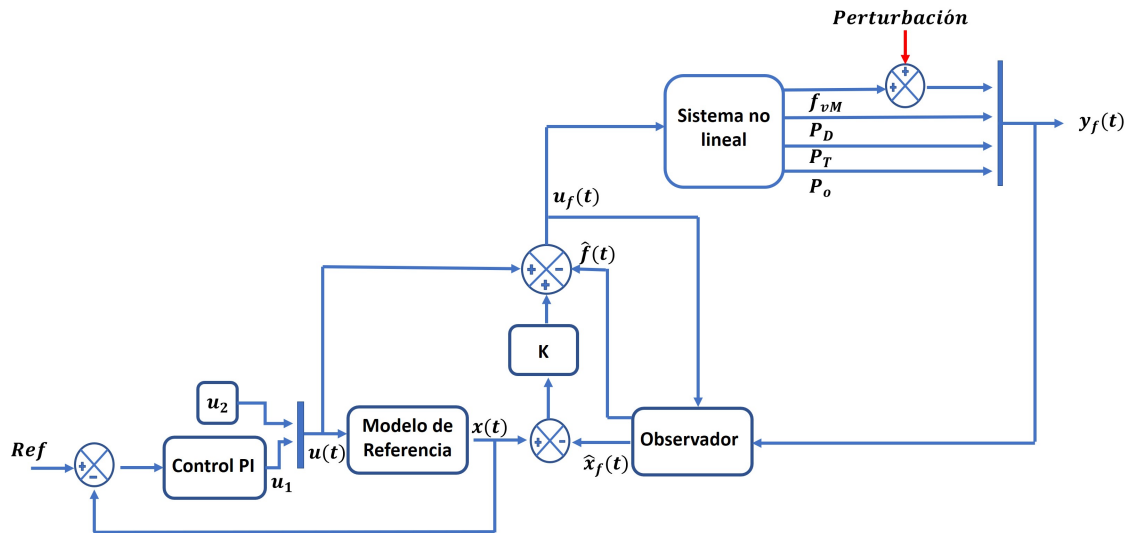


Fig. B.1.1. Esquema FTC ante perturbaciones

En el escenario propuesto, se considera que la perturbación ocurre en el minuto 96 y desaparece en el minuto 144. Las condiciones iniciales del sistema no lineal reducido fueron: $f_{vM} = 257.89$ kg/s, $P_D = 16.652 \times 10^6$ Pa, $P_T = 14.235 \times 10^6$ Pa y $P_o = 300$ MW, mientras que las condiciones

iniciales del observador PIO fueron: $\hat{f}_{vM} = 0$, $\hat{P}_D = 0$, $\hat{P}_T = 0$ y $\hat{P}_o = 0$. La simulación se realiza sobre la plataforma Matlab/Simulink R2017b, considerando un método de solución y tiempo de muestreo seleccionado automáticamente por Matlab (ver Anexo A).

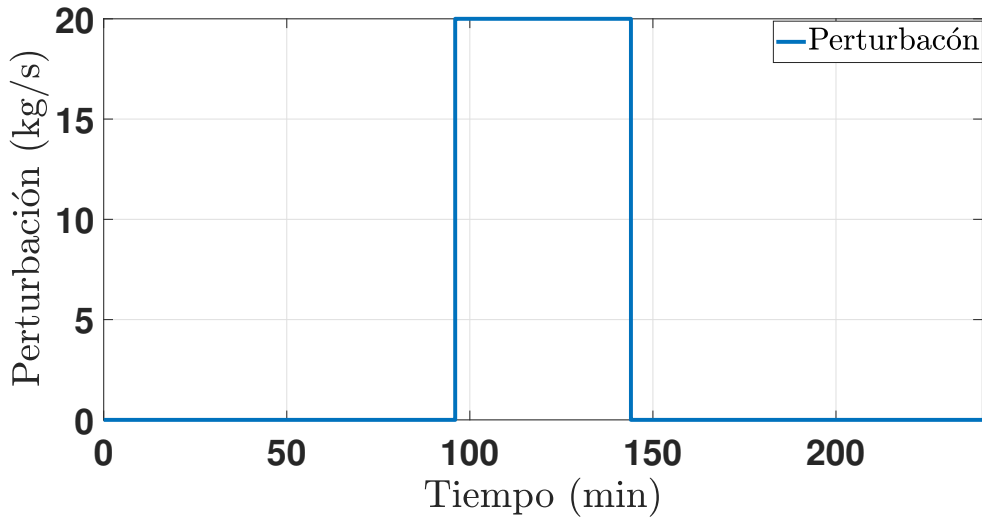


Fig. B.1.2. Perturbación

Resultados

Los resultados de la estrategia FTC se ilustran en las Figuras (B.1.3 - B.1.10).

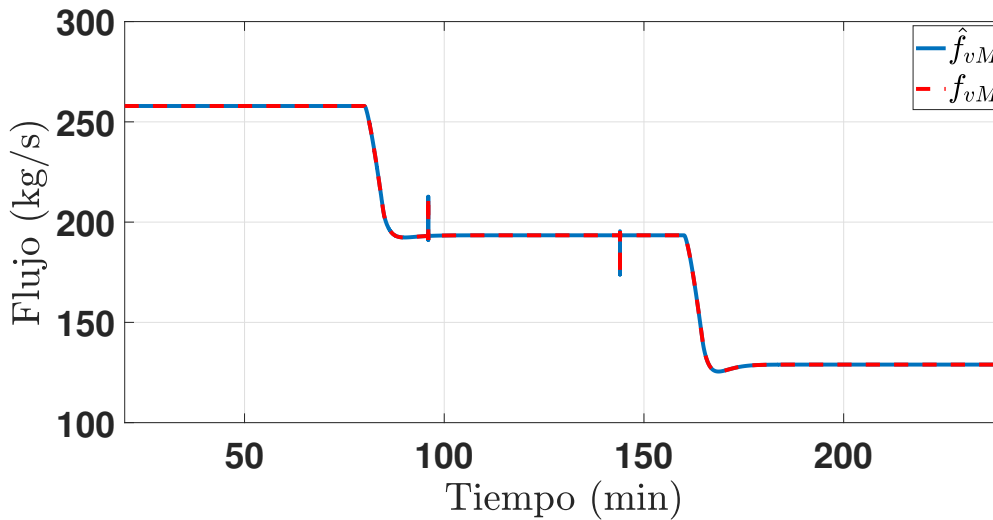


Fig. B.1.3. Anexo: f_{vM} flujo de vapor en la mezcla agua-vapor.

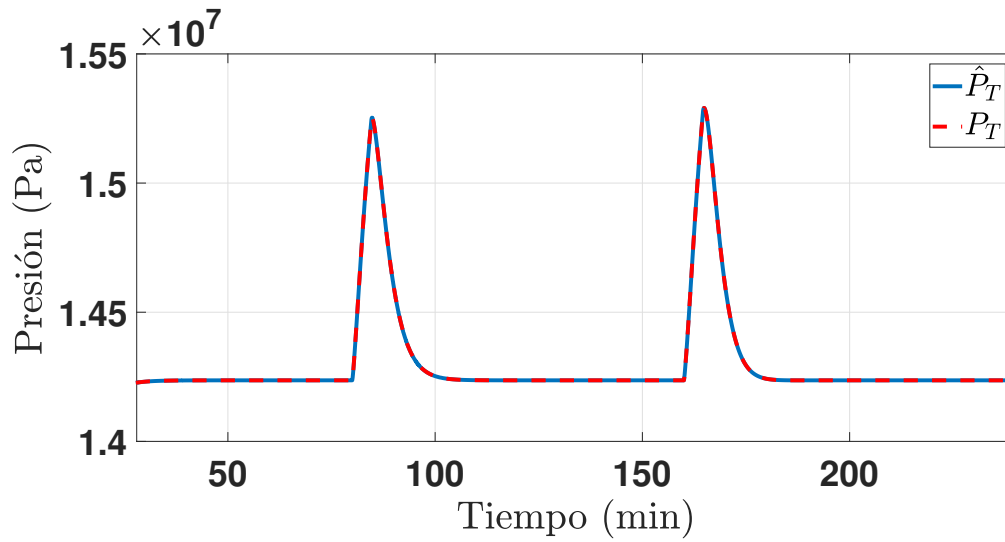


Fig. B.1.4. Anexo: P_T Presión de vapor en la entrada de la turbina.

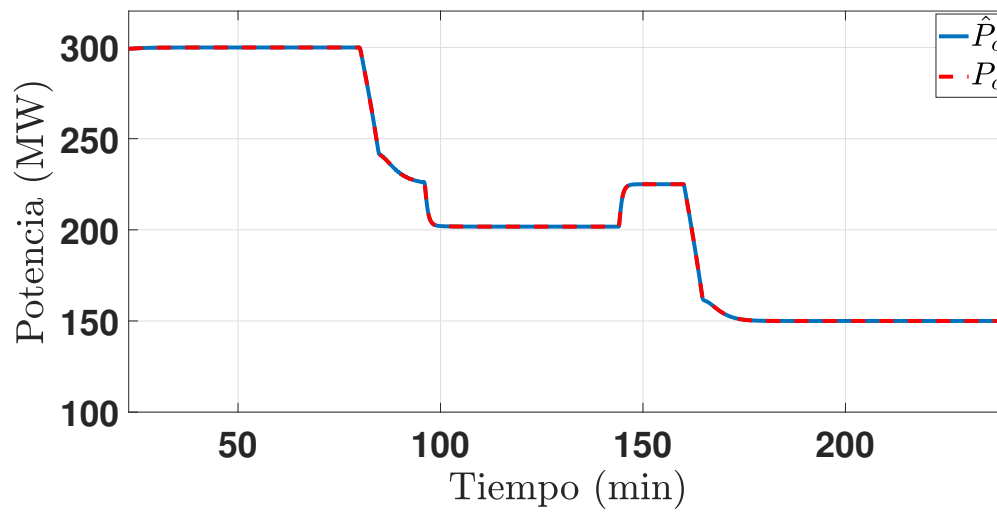


Fig. B.1.5. Anexo: P_o potencia eléctrica.

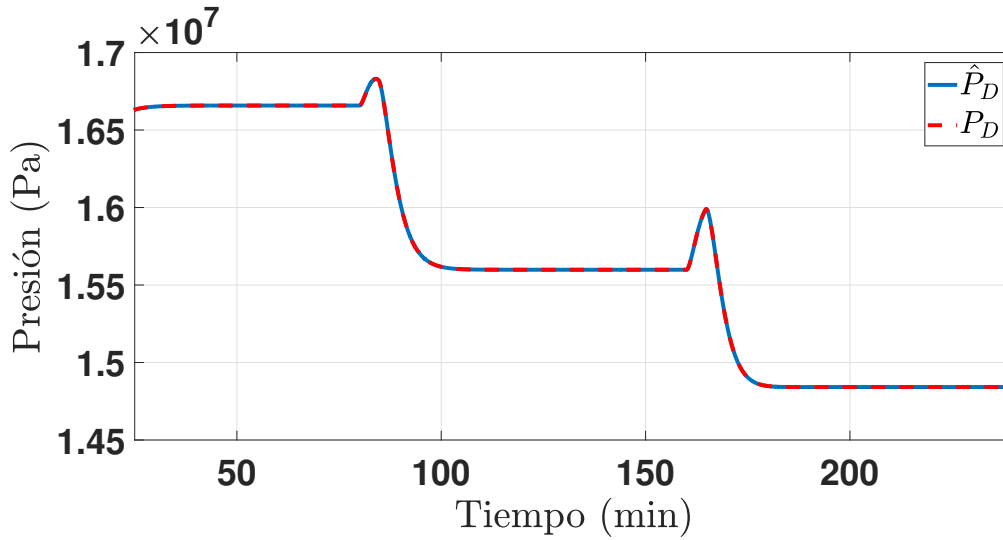


Fig. B.1.6. Anexo: P_D presión en el domo.

En las Figuras (B.1.3 - B.1.6) se muestran las gráficas de la convergencia de las señales estimadas del observador proporcional integral hacia las señales de salida del modelo no lineal reducido con presencia de perturbación en la salida (f_{vM}). Analizando los resultados se puede observar que las variables de salida presentan un comportamiento fuera de lo normal, ya que la estrategia FTC no fue diseñada para compensar perturbaciones en las variables de salida.

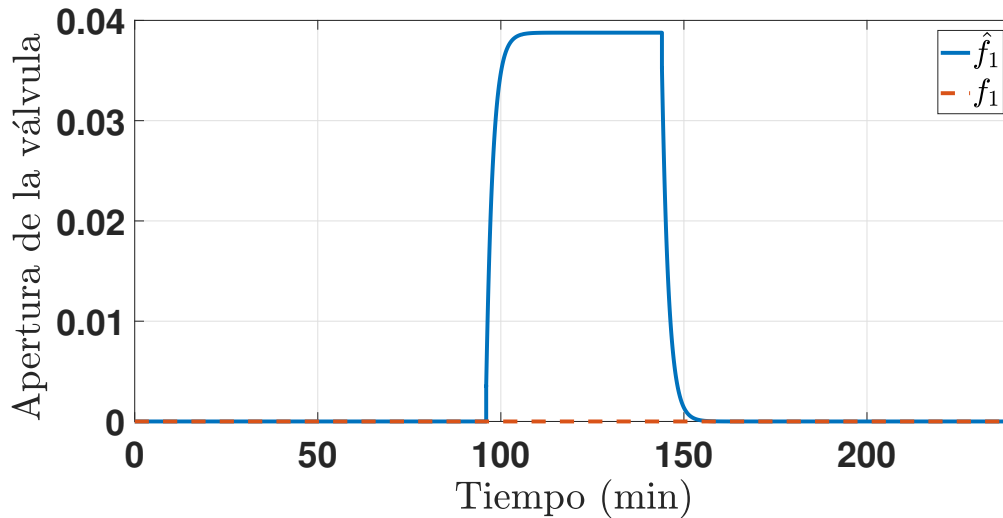


Fig. B.1.7. Anexo: Falla en el actuador u_1 y su estimación.

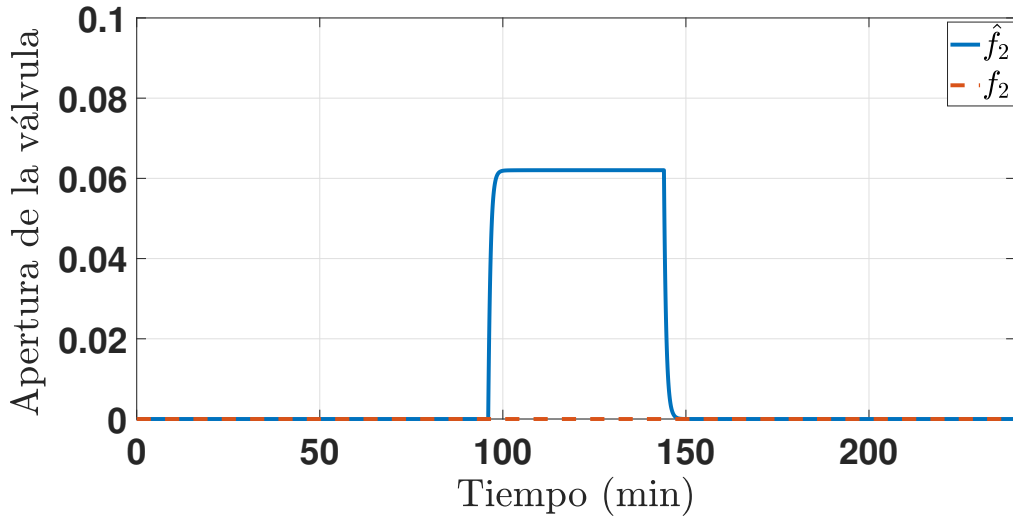


Fig. B.1.8. Anexo: Falla en el actuador u_2 y su estimación.

En las Figuras (B.1.7 y B.1.8) se puede apreciar que el observador PIO detecta y estima fallas en los dos actuadores aún cuando no se está presentando una falla en el actuador, esto se debe a que el observador PIO toma la perturbación de la salida (f_{vM}) como el efecto de una falla en los actuadores. Y aunque solo se perturbo el comportamiento de una de las salidas, el esquema FTC asume que ese efecto es a causa de fallas simultáneas en los actuadores.

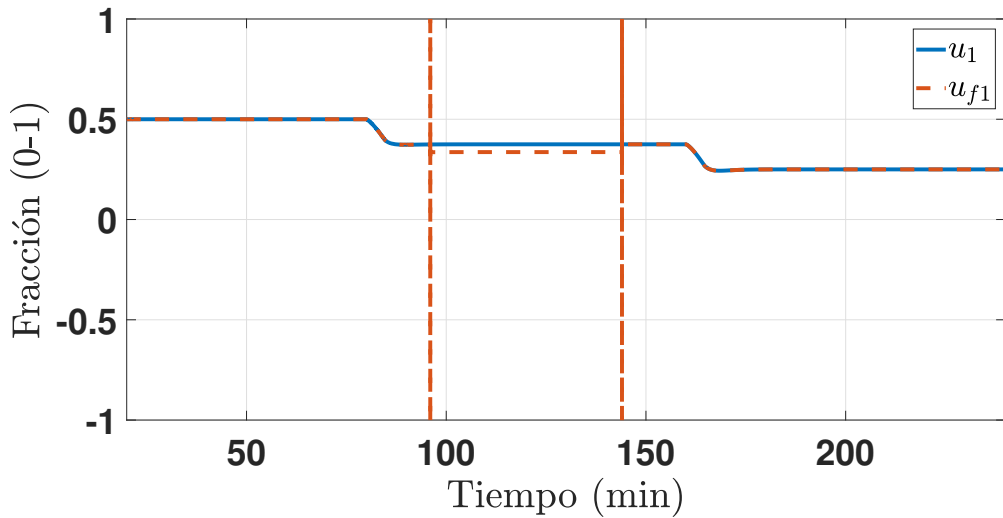


Fig. B.1.9. Anexo: Entrada u_1 del modelo de referencia y ley FTC

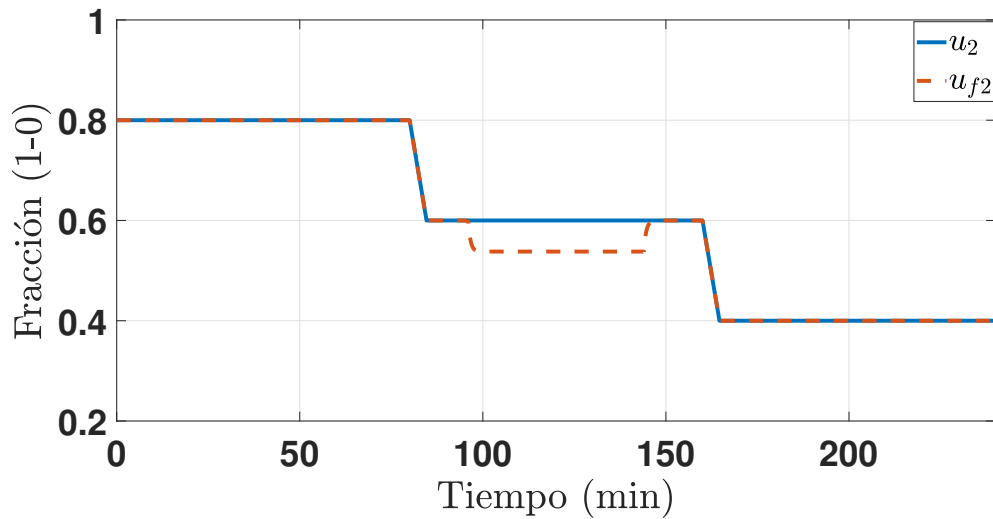


Fig. B.1.10. Anexo: Entrada u_2 del modelo de referencia y ley FTC

En las Figuras (B.1.9 y B.1.10) se presenta las entradas deseada del modelo de referencia T-S representadas por la línea azul y las entradas del control otorgada por la ley de FTC representadas por la línea punteada roja, en la cual se observa que el minuto 144 la ley de control comienza a realizar el acomodo de dicha perturbación.

Bibliografía

- Aguilar, R., González, J., Alvarez-Ramirez, J., and Barrón, M. A. (1997). Temperature regulation of a class of continuous chemical reactor based on a nonlinear luenberger-like observer. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 70(3):209–216.
- Amin, A. A. and Hasan, K. M. (2019). A review of fault tolerant control systems: Advancements and applications. *Measurement*, 143:58–68.
- Bacon, B., Ostroff, A., and Joshi, S. (2001). Reconfigurable NDI controller using inertial sensor failure detection & isolation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 37(4):1373–1383.
- Basseville, M. (1998). On-board component fault detection and isolation using the statistical local approach. *Automatica*, 34(11):1391–1415.
- Busawon, K. K. and Kabore, P. (2001). Disturbance attenuation using proportional integral observers. *International Journal of Control*, 74(6):618–627.
- Celani, F. (2006). A luenberger-style observer for robot manipulators with position measurements. In *2006 14th Mediterranean Conference on Control and Automation*. IEEE.
- Cheres, E. (1990). Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic response. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5(4):686–692.
- Coutinho, D. and Pereira, L. (2005). A robust luenberger-like observer for induction machines. In *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005*. IEEE.
- Damon, P.-M., Ichalal, D., and Arioui, H. (2019). Steering and lateral motorcycle dynamics estimation: Validation of luenberger LPV observer approach. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 4(2):277–286.

- Daren, Y. and Zhiqiang, X. (2005). Nonlinear coordinated control of drum boiler power unit based on feedback linearization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20(1):204–210.
- de Mello, F. (1991). Boiler models for system dynamic performance studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 6(1):66–74.
- Dhini, A., Kusumoputro, B., and Surjandari, I. (2017). Neural network based system for detecting and diagnosing faults in steam turbine of thermal power plant. In *2017 IEEE 8th International Conference on Awareness Science and Technology (iCAST)*. IEEE.
- Dochain, D., Perrier, M., and Ydstie, B. (1992). Asymptotic observers for stirred tank reactors. *Chemical Engineering Science*, 47(15-16):4167–4177.
- Grobbelaar, G. and MacLeod, I. (1999). Simulation and validation of a low-order, non-linear model of a boiler drum. *IFAC Proceedings Volumes*, 32(2):7247–7251.
- Hamdi, H., Rodrigues, M., Mechmeche, C., Theilliol, D., and Braiek, N. B. (2009). State estimation for polytopic LPV descriptor systems: Application to fault diagnosis. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(8):438–443.
- Hamed Badihi, Youmin Zhang, H. H. (2014). Fuzzy gain-scheduled active fault-tolerant control of a wind turbine. *Elsevier*.
- Hu, X., Sun, F., and Zou, Y. (2010). Estimation of state of charge of a lithium-ion battery pack for electric vehicles using an adaptive luenberger observer. *Energies*, 3(9):1586–1603.
- Ichalal, D., Marx, B., Ragot, J., and Maquin, D. (2010). Observer based actuator fault tolerant control for nonlinear takagi-sugeno systems : an LMI approach. In *18th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED10*. IEEE.
- Jiang, J. and Yu, X. (2012). Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches. *Annual Reviews in Control*, 36(1):60–72.
- Kazemi, A., Menhaj, M. B., Karrai, M., and Daneshnia, A. (2016). Control reconfiguration of a boiler-turbine unit after actuator faults. In *2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*. IEEE.

- Madrigal-Espinosa, G., Astorga-Zaragoza, C. M., Roman, M. V., Osorio-Gordillo, G. L., and Medina, M. A. (2018). Fault diagnosis in sensors of boiler following control of a thermal power plant. *IEEE Latin America Transactions*, 16(6):1692–1699.
- Madrigal-Espinosa, G., Osorio-Gordillo, G.-L., Astorga-Zaragoza, C.-M., Vázquez-Román, M., and Adam-Medina, M. (2017). Fault detection and isolation system for boiler-turbine unit of a thermal power plant. *Electric Power Systems Research*, 148:237–244.
- Mahmoud, M. M. (2003). *Active Fault Tolerant Control Systems*. Springer; 2003 edition (April 10 2003).
- Mantz, R. J. (2003). Observadores de estados. *Universidad Nacional de La Plata Facultad de Ingeniería*.
- Mogens Blanke., Michel Kinnaert LanLunze., M. S. (2006). *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer.
- Nemecio Tlalolini Ramos, José A. Ruz Hernández, D. A. S. C. A. S. L. A. Q. R. (2007). Diagnóstico de fallas en centrales termoeléctricas utilizando modelado neuronal y lógica difusa. In *Congreso Nacional de Control Automático C.N.C.A.*
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson.
- Pérez Estrada, A. J. (2019). Diseño de observadores adaptables para sistemas LPV. aplicación al control tolerante a fallas. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Quintero-Marmol, E., W. L. L. C. G. (1991). Aplicación de un observador de Luenberger extendido para el control de la destilación por lotes de múltiples componentes. *Investigación Química Industrial y de Ingeniería*.
- Rabaoui, B., HAMDI, H., Rodrigues, M., and Benhadj Braiek, N. (2017). A polytopic proportional integral observer design for fault diagnosis. In *International Conference on Advanced Systems and Electrical Technologies*.

- Reyes-Martínez, J. (2016). Detección de fallas mediante sistemas takagi-sugeno: Aplicación en una central termoeléctrica. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Rios-Bolivar, A. and Rivas, F. (2014). Diseñando observadores pi para sistemas lpv. In *Memorias del XVI Congreso Latinoamericano de Control Automático, CLCA 2014, At Cancún, Quintana Roo, México*.
- Rodarte, C. V. (2013). *Monitoreo Y Diagnostico Automatico De Fallas En Sistemas Dinamicos*. Instituto de Ingenieria UNAM.
- Sun, L., Li, D., Lee, K. Y., and Xue, Y. (2016). Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Engineering Practice*, 55:38–55.
- Wang, R. and Wang, J. (2011). Fault-tolerant control with active fault diagnosis for four-wheel independently driven electric ground vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(9):4276–4287.
- Wu, Y., Dong, J., Li, X.-J., and Yang, G.-H. (2016). A new fault detection observer scheme for t-s fuzzy systems with unmeasurable variables. *12th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*.
- Xie, X., Yue, D., Zhang, H., and Xue, Y. (2017). Fault estimation observer design for discrete-time takagi-sugeno fuzzy systems based on homogenous polynomially parameter-dependent lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 47(9):2504–2513.
- Youssef, T., Chadli, M., Karimi, H., and Wang, R. (2017). Actuator and sensor faults estimation based on proportional integral observer for TS fuzzy model. *Journal of the Franklin Institute*, 354(6):2524–2542.
- Youssfi, N. E., Oudghiri, M., and Bachtiri, R. E. (2019). Actuator fault estimation and fault tolerant control for vehicle lateral dynamics. In *Actuator fault*. Author(s).
- Zetina-Rios, I. I. (2019). Estimación de fallas en actuadores basada en observadores de aprendizaje para sistemas lpv. Master's thesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.

Zhongxu Han, X. Q. (2005). A dynamic non-linear simulation model of boiler turbine coordinated control systems and its application. In *International Conference on Electrical Engineering*.

Zsofia Lendek, T M Guerra, R. B. (2010). *Stability analysis and nonlinear observer design using TakagiSugeno fuzzy models*. volumen 262. Springer. Liu.